

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

EVELINE RAMOS

**HIDROQUÍMICA DO RESERVATÓRIO BORTOLAN
EM POÇOS DE CALDAS (MG)**

POÇOS DE CALDAS

2025

EVELINE RAMOS

**HIDROQUÍMICA DO RESERVATÓRIO BORTOLAN
EM POÇOS DE CALDAS (MG)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas.
Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Donizetti
Gonçalves de Souza

POÇOS DE CALDAS

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Ramos, Eveline.

Hidroquímica do reservatório Bortolan em Poços de Caldas (MG) /
Eveline Ramos. - Poços de Caldas, MG, 2025.
143 f. : il. -

Orientador(a): Diego de Souza Sardinha.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Limnologia. 3. Monitoramento ambiental. I.
Sardinha, Diego de Souza, orient. II. Título.

Eveline Ramos

HIDROQUÍMICA DO RESERVATÓRIO BORTOLAN EM POÇOS DE CALDAS (MG)

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia Ambiental da pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 08 de Maio de 2025.

Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Sheila Cardoso da Silva
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Diego de Souza Sardinha, Professor do Magistério Superior**, em 09/05/2025, às 15:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1511930** e o código CRC **CBEF5E7D**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, professores Diego Sardinha e Antônio Donizetti, por indicarem o caminho a ser seguido neste trabalho.

À banca de qualificação, professores Paulo Henrique e Sheila, pelas valiosas contribuições apresentadas.

À guarda municipal de Poços de Caldas por disponibilizar o barco utilizado nesta pesquisa e aos guardas Flávio Henrique Andrade e Francisco Baldin Filho por conduzi-lo.

Ao meu companheiro Fellipe pelo apoio e por emprestar o computador com capacidade de executar o QGIS com fluidez.

Ao meu amigo Marcos Fornaziero pelas conversas frutíferas sobre geografia e pelos conselhos cartográficos, além da revisão do texto.

À Patrícia Gonçalves por também revisar o texto.

A José Hilário Delconte Ferreira e Jocilene Barros pelos tutoriais sobre QGIS no youtube.

Aos meus pais e à minha turma de amigos de longa data pelo apoio.

Aos meus colegas de trabalho dos laboratórios do prédio C da Unifal Poços pelo companheirismo durante este estudo.

Aos que lutaram pela existência do Proqualitae e do PCCTAE.

Ao CNPq pela verba de bancada (processo 402613/2023-6).

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise hidroquímica do reservatório Bortolan, formado pelo represamento do ribeirão das Antas, cuja bacia de drenagem possui uma área de 371,8 km². O estudo teve como objetivos caracterizar o reservatório e sua bacia de drenagem, que se mostrou predominantemente agrícola (79% do uso do solo), com 3,4% de área urbanizada e 2,2% de área industrial. A região também conta com reservas minerais, incluindo argila, bauxita, ferro, manganês, potássio, terras raras e zircônio. O reservatório Bortolan tem como principal uso a geração de eletricidade, mas também é utilizado para lazer. Trata-se de um reservatório pequeno e raso (área: ~2 km²; volume: 6,9 milhões de m³; profundidade média: ~3 m), com um tempo de residência da água de ~11 dias. Foram avaliadas três regiões do reservatório (fluvial, intermediária e lacustre), com medições *in loco* de temperatura, turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, pH e potencial de oxirredução ao longo da coluna d'água. Em três profundidades de cada ponto, foram analisados alcalinidade, fosfato, nitrato, sulfato, cloreto, fluoreto, sódio, potássio, cálcio, magnésio, sílica, ferro, manganês, alumínio, cobre e níquel, todos na fração solúvel. As coletas foram realizadas em quatro campanhas, abrangendo períodos chuvosos e secos. A análise estatística revelou diferenças significativas ao longo do período de estudo, indicando uma dinâmica intensa. O reservatório apresentou estratificação térmica no verão, influenciando oxigênio dissolvido, pH e potencial redox. As concentrações de cloreto, sódio e potássio mostraram-se uniformes vertical e horizontalmente. Foi observada variação longitudinal na alcalinidade e na concentração de sílica. As concentrações de ferro e manganês pareceram estar relacionadas à pluviosidade. A classificação pelo diagrama de Piper indicou que as águas são predominantemente sódicas-potássicas, variando entre mistas e sulfatadas. Durante grande parte do estudo, o reservatório foi considerado eutrofizado, com essa condição mais acentuada na região fluvial. O índice de qualidade para enquadramento (ICE) com relação à classe 2 da Resolução CONAMA 357/2005, foi de 75/100, sugerindo que os parâmetros avaliados ocasionalmente se afastaram dos níveis naturais ou desejáveis. Os resultados evidenciaram que a composição química do reservatório sofre variações significativas, influenciadas tanto por fatores naturais (como temperatura e pluviosidade) quanto antrópicos (como o lançamento de efluentes). Isso mostra a importância do monitoramento contínuo e da adoção de medidas de manejo e recuperação ambiental para garantir a sustentabilidade do reservatório.

Palavras chave: recursos hídricos; limnologia; monitoramento ambiental.

ABSTRACT

This dissertation presents a hydrochemical analysis of the Bortolan Reservoir, formed by the damming of the ribeirão das Antas, whose drainage basin covers an area of 371.8 km². The study aimed to characterize the reservoir and its drainage basin, which was found to be predominantly agricultural (79% of land use), with 3.4% urbanized area and 2.2% industrial area. The region also contains mineral reserves, including clay, bauxite, iron, manganese, potassium, rare earth elements, and zirconium. The primary use of the Bortolan Reservoir is electricity generation, but it is also used for recreation and water sports. It is a small and shallow reservoir (area: ~2 km²; volume: 6.9 million m³; average depth: ~3 m), with a water residence time of approximately 11 days. Three regions of the reservoir (fluvial, intermediate, and lacustrine) were evaluated, with in situ measurements of temperature, turbidity, electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, and redox potential throughout the water column. At three depths in each sampling point, alkalinity, phosphate, nitrate, sulfate, chloride, fluoride, sodium, potassium, calcium, magnesium, silica, iron, manganese, aluminum, copper, and nickel were analyzed, all in the soluble fraction. Four sampling campaigns were conducted, covering both rainy and dry periods. Statistical analysis revealed significant differences throughout the study period, indicating an intense hydrochemical dynamic. The reservoir exhibited thermal stratification in summer, influencing dissolved oxygen, pH, and redox potential. Chloride, sodium, and potassium concentrations were uniform both vertically and horizontally. Longitudinal variation in alkalinity and silica concentration was observed. Iron and manganese concentrations appeared to be related to rainfall patterns. Classification using the Piper diagram indicated that the waters are predominantly sodium-potassium type, varying between mixed and sulfate-rich waters. For most of the study, the reservoir was considered eutrophic, with this condition more pronounced in the fluvial region. The Water Quality Index for classification (ICE), based on Class 2 of CONAMA Resolution 357/2005, was 75/100, suggesting that the evaluated parameters occasionally deviated from natural or desirable levels. The results demonstrated that the reservoir's chemical composition undergoes significant variations, influenced by both natural factors (such as temperature and rainfall) and anthropogenic factors (such as wastewater discharge). These findings highlight the importance of continuous monitoring and the implementation of management and environmental recovery measures to ensure the reservoir's sustainability.

Keywords: water resources; limnology; environmental monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O ciclo hidrológico.....	18
Figura 2 – Elementos da bacia hidrográfica.....	19
Figura 3 – Exemplos de padrões de drenagem.....	19
Figura 4 – Hierarquia fluvial em uma bacia hidrográfica conforme Strahler.....	21
Figura 5 – Tipos principais de canais fluviais.....	21
Figura 6 – Morfometria típica de (a) lagos e (b) represas.....	24
Figura 7 – Variação da temperatura de um lago tropical ao longo de um dia de verão.....	27
Figura 8 – Regiões numa condição de estratificação térmica em lagos.....	27
Figura 9 – Resistência térmica relativa.....	28
Figura 10 – Zonas longitudinais de um reservatório e alterações na extensão das zonas para diferentes tempos de retenção.....	29
Figura 11 – Diagrama dos mecanismos que controlam a química das águas superficiais.....	32
Figura 12 – Diagrama de Piper, representando a composição como porcentagens em equivalentes por litro.....	32
Figura 13 – Perfis de OD em função da profundidade em lagos, onde a curva tracejada representa a temperatura e a curva contínua representa a concentração de oxigênio	35
Figura 14 – Espécies carbonatadas em função do pH.....	36
Figura 15 – Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas.....	41
Figura 16 – Localização da represa do Bortolan e de sua bacia hidrográfica.....	49
Figura 17 – Localização da bacia hidrográfica do Lambari (nível 6) nas bacias de Otto de nível sucessivamente superior.....	50
Figura 18 – Bacia hidrográfica do rio Lambari e suas bacias de nível 7 de Otto.....	51
Figura 19 – Localização da bacia do Bortolan no Planalto de Poços de Caldas.....	51
Figura 20 – Climograma para o Planalto de Poços de Caldas de 1961 a 1985, com precipitação, temperaturas mínima e máxima.....	52
Figura 21 – Mapa geológico da caldeira vulcânica de Poços de Caldas (MG), com destaque para a bacia hidrográfica de estudo.....	53
Figura 22 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Bortolan.....	56
Figura 23 – Processos minerários na bacia de estudo por fase (1) e minérios (2).....	58
Figura 24 – Parâmetros morfométricos na bacia hidrográfica do Bortolan, com rede de drenagem na escala 1:50.000.....	61
Figura 25 – Meandro abandonado no baixo ribeirão das Antas.....	62
Figura 26 – Hierarquia fluvial, conforme método de Strahler, na bacia hidrográfica do Bortolan.....	63
Figura 27 – Reservatório Bortolan, com indicação dos pontos de amostragem.....	65

Figura 28 – Histórico da concentração de fósforo total, em mg/L, no reservatório Bortolan..	66
Figura 29 – Ribeirão das Antas na região de início do reservatório Bortolan.....	67
Figura 30 – Região de início do reservatório Bortolan no período de estudo.....	67
Figura 31 – Parâmetros morfométricos da represa do Bortolan.....	68
Figura 32 – Perfil longitudinal aproximado da represa Bortolan, com base na profundidade dos pontos de amostragem e na profundidade no barramento, na situação de 100% de volume.....	69
Figura 33 – Cota do reservatório no período de janeiro de 2019 a maio de 2024, com a média de 2019 a 2023, cota mínima de operação da PCH e cota do vertedouro.....	69
Figura 34 – Represa do Bortolan em 09/08/2021 e 4,34% de volume.....	70
Figura 35 – Pluviograma diário, com indicação das datas de amostragem, obtido pelo Pluviômetro Delta Ohm HD-2013 DB, na Unifal-MG de Poços de Caldas, a 4,5km do reservatório Bortolan.....	71
Figura 36 – Elevada presença de macrófitas na foz do córrego Amoras.....	72
Figura 37 – Lançamento de esgoto in natura na represa Bortolan.....	73
Figura 38 – Represa do Bortolan em 31/03/2024 com indicação das áreas com macrófitas....	74
Figura 39 – Temperatura na coluna d'água, em °C, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,3$ °C.....	75
Figura 40 – RTR a cada metro, no eixo inferior, adimensional; e temperatura na coluna d'água, no eixo superior, em °C, em P3, nas quatro campanhas.....	76
Figura 41 – Turbidez na coluna d'água, em unidade nefelométrica de turbidez (NTU), nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 1,0$ NTU.....	77
Figura 42 – Condutividade na coluna d'água, em $\mu\text{S}/\text{cm}$, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,1$ %.....	77
Figura 43 – Valores de condutividade na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	78
Figura 44 – pH na coluna d'água, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,1$ unidades de pH.....	78
Figura 45 – Valores de pH na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	79
Figura 46 – Concentração de oxigênio dissolvido (OD) na coluna d'água, em mg/L, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,2$ mg/L.....	80
Figura 47 – Saturação de oxigênio dissolvido na coluna d'água, em %, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas.....	81
Figura 48 – Potencial de óxido-redução na coluna d'água, em mV, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de ± 15 mV.....	81
Figura 49 – Alcalinidade, em mg HCO_3^-/L , em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de ± 3 mg HCO_3^-/L	82

Figura 50 – Valores de alcalinidade (mg HCO ₃ ⁻ /L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	83
Figura 51 – Concentração de fosfato dissolvido, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,05$ mg/L.....	83
Figura 52 – Valores de fosfato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	84
Figura 53 – Concentração de nitrato, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 1,3$ mg/L.....	85
Figura 54 – Valores de nitrato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	86
Figura 55 – Concentração de sulfato, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,5$ mg/L.....	87
Figura 56 – Valores de sulfato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	87
Figura 57 – Concentração de cloreto, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,5$ mg/L.....	88
Figura 58 – Valores de cloreto (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	88
Figura 59 – Concentração de fluoreto, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,04$ mg/L.....	89
Figura 60 – Valores de fluoreto (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	89
Figura 61 – Concentração de sódio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,1$ mg/L.....	90
Figura 62 – Concentração de potássio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,1$ mg/L.....	91
Figura 63 – Valores de sódio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	91
Figura 64 – Valores de potássio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	91
Figura 65 – Concentração de cálcio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,03$ mg/L.....	92
Figura 66 – Valores de cálcio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	92
Figura 67 – Concentração de magnésio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,02$ mg/L.....	93
Figura 68 – Valores de magnésio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	93
Figura 69 – Concentração de sílica, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,025$ mg/L.....	94

Figura 70 – Valores de sílica (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	95
Figura 71 – Concentração de ferro solúvel total, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,017$ mg/L.....	96
Figura 72 – Concentração de manganês solúvel, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,013$ mg/L.....	96
Figura 73 – Valores de ferro total (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	97
Figura 74 – Valores de manganês (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	97
Figura 75 – Concentração de ferro (II), em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,017$ mg/L.....	98
Figura 76 – Valores de alumínio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo.....	100
Figura 77 – Representação das médias das análises químicas das águas nos três pontos e três profundidades, com gráficos de barras de cátions e ânions, em miliequivalentes por litro.....	102
Figura 78 – Parâmetros químicos deste estudo com concentrações inferiores a 2 mg/L.....	103
Figura 79 – Parâmetros químicos deste estudo com concentrações superiores a 2 mg/L.....	103
Figura 80 – Componentes principais 1 e 2, agrupados por data da amostragem.....	108
Figura 81 – Dendrogramas por data, com indicação da distância euclidiana.....	109
Figura 82 – Diagramas de Gibbs para cátions (à esquerda) e ânions (à direita) no reservatório Bortolan, nos três pontos e quatro amostragens, para as águas superficiais.....	110
Figura 83 – Diagramas de Piper para o reservatório Bortolan, nos três pontos e quatro amostragens, para as águas superficiais.....	111
Figura 84 – Hidrografia e relevo na bacia hidrográfica de estudo.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de drenagem (em km/km ²) por autor.....	20
Quadro 2 – Coeficientes de correlação de Pearson, à esquerda, e de Spearman, à direita, acima de 0,65 ou inferior a -0,65, todas com p-valor < 0,001.....	105
Quadro 3 – Ficha do Campo 1 para P1.....	128
Quadro 4 – Ficha do Campo 2 para P1.....	128
Quadro 5 – Ficha do Campo 3 para P1.....	129
Quadro 6 – Ficha do Campo 4 para P1.....	129
Quadro 7 – Ficha do Campo 1 para P2.....	130
Quadro 8 – Ficha do Campo 2 para P2.....	130
Quadro 9 – Ficha do Campo 3 para P2.....	131
Quadro 10 – Ficha do Campo 4 para P2.....	132
Quadro 11 – Ficha do Campo 1 para P3.....	134
Quadro 12 – Ficha do Campo 2 para P3.....	135
Quadro 13 – Ficha do Campo 3 para P3.....	136
Quadro 14 – Ficha do Campo 4 para P3.....	137
Quadro 15 – Ficha de análise para as amostras do campo 1 (setembro de 2023).....	140
Quadro 16 – Ficha de análise para as amostras do campo 2 (outubro de 2023).....	141
Quadro 17 – Ficha de análise para as amostras do campo 3 (março de 2024).....	142
Quadro 18 – Ficha de análise para as amostras do campo 4 (julho de 2024).....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes do IQA para os estados de São Paulo e Minas Gerais.....	42
Tabela 2 – Classificação do Estado Trófico para reservatórios.....	42
Tabela 3 – Classes de qualidade do ICE.....	44
Tabela 4 – Principais parâmetros das águas superficiais de Poços de Caldas.....	55
Tabela 5 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Bortolan.....	57
Tabela 6 – Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET) à montante (BG091) e à jusante de Poços de Caldas (BG063) ao longo dos últimos anos.....	60
Tabela 7 – Parâmetros e índices morfométricos da bacia do Bortolan.....	61
Tabela 8 – Sinuosidade ao longo do ribeirão das Antas dentro da BH do Bortolan.....	62
Tabela 9 – Morfometria do reservatório Bortolan considerando duas delimitações.....	68
Tabela 10 – Médias dos dados de operação da represa do Bortolan no período de estudo.....	70
Tabela 11 – Precipitação acumulada nos dias anteriores às amostragens.....	71
Tabela 12 – Profundidade dos pontos de amostragem em cada campanha.....	72
Tabela 13 – Horário e temperatura ambiente no momento de cada amostragem.....	75
Tabela 14 – Concentração média de fósforo proveniente de fosfato dissolvido (P-PO43-), em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas.....	85
Tabela 15 – Concentração média de nitrogênio do nitrato dissolvido (N-NO3-), em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas.....	86
Tabela 16 – Concentração média de alumínio dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,013$ mg/L.....	99
Tabela 17 – Concentração média de cobre dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,02$ mg/L.....	101
Tabela 18 – Concentração média de níquel dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,008$ mg/L.....	101
Tabela 19 – Balanço de cargas por ponto e profundidade em cada amostragem.....	103
Tabela 20 – Teste de Shapiro-Wilk para normalidade.....	104
Tabela 21 – Componentes principais, autovalores e percentuais da variância.....	106
Tabela 22 – Cargas fatoriais das quatro primeiras componentes principais.....	106
Tabela 23 – ICE e seus parâmetros de cálculo para as águas superficiais do reservatório Bortolan no período estudado.....	111
Tabela 24 – Análise de Kruskal-Wallis.....	126
Tabela 25 – Coeficientes de correlação de Pearson, à esquerda, e de Spearman, à direita, com destaques para aqueles acima de $\pm 0,65$. Valor de p apresentado entre parênteses.....	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ARCAL	Acordo Regional de Cooperação para a Promoção da Ciência e Tecnologia Nucleares na América Latina e no Caribe
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DME	Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Índice de conformidade ao enquadramento
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IQA	Índice de qualidade da água
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
OD	Oxigênio dissolvido
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
pH	Potencial hidrogeniônico
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
STD	Sólidos totais dissolvidos
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1	CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	18
3.2	CARACTERIZAÇÃO DE LAGOS E RESERVATÓRIOS.....	23
3.3	ÍNDICES E LEGISLAÇÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	40
4	METODOLOGIA.....	45
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	45
5	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	49
5.1	POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS GEOGÊNICAS.....	53
5.2	POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS ANTROPOGÊNICAS.....	55
5.3	MORFOMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO.....	60
6	CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	64
6.1	MORFOMETRIA DO RESERVATÓRIO.....	66
6.2	CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO PERÍODO DE ESTUDO.....	71
6.3	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO-QUÍMICOS.....	74
6.4	DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS ÂNIONS.....	82
6.5	DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS CÁTIONS.....	90
6.6	DISTRIBUIÇÃO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS.....	94
6.7	BALANÇO DE CARGAS.....	102
6.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	103
6.9	DIAGRAMAS REPRESENTATIVOS E ÍNDICES.....	109
7	CONCLUSÕES.....	112
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
	REFERÊNCIAS.....	115
	APÊNDICES.....	125

1 INTRODUÇÃO

A qualidade das águas de Poços de Caldas é motivo de interesse dos cidadãos, conforme se observa por meio de demandas de representantes do poder público, nos veículos de mídia locais e também em redes sociais (Brasil, 2021, 2022; Poços de Caldas, 2012).

Considerando os anseios da sociedade e o objetivo da linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas de fornecer subsídios para o gerenciamento integrado de tais recursos, a realização de pesquisa sobre o reservatório Bortolan é pertinente ao programa, à linha de pesquisa e aos anseios da sociedade.

A represa do Bortolan foi construída em 1956 com o objetivo de regularizar a vazão para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), mas também tornou-se cartão postal da entrada da cidade, sendo utilizada pela população e por turistas para lazer, como passeios em barcos e pedalinhos, esportes náuticos e pesca, o que é compatível com o enquadramento do reservatório como águas de classe 2, conforme a resolução CONAMA 357/2005. Há um aumento recente do interesse pela prática de esportes no local, com destaque para a realização de eventos regionais e nacionais, como provas de triatlo, *stand up paddle* e moto aquática (Poços de Caldas, 2012, 2017, 2023a, 2023b, 2023c, 2023d).

A represa Bortolan pode se tornar um patrimônio cultural e imaterial da cidade. Uma lei já sancionada (Lei Ordinária Nº 9930/2024) determina o início do processo de registro pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico e Artístico local (Condephact). O reconhecimento busca preservar e valorizar esse espaço, promovendo estudos e ações para garantir sua sustentabilidade e desenvolvimento turístico e cultural (G1, 2024; Poços de Caldas, 2024b).

Por estar localizado no baixo curso do ribeirão das Antas, o reservatório Bortolan pode receber águas contaminadas de seus afluentes e também concentrar poluentes nos sedimentos. Isto foi verificado em trabalho de 2012, coordenado pela Comissão das Águas da Câmara Municipal (Poços de Caldas, 2012), quando foram identificadas altas quantidades de coliformes termotolerantes na água e concentração elevada de fósforo e níquel no sedimento. Estas alterações podem ser consequência do uso e ocupação do solo na bacia, que envolve atividades mineradoras, industriais, urbanas e agrícolas.

Além disso, é importante destacar que esta represa está localizada numa área ímpar do ponto de vista geológico, sendo um dos maiores maciços alcalinos do mundo, além de possuir riqueza em recursos minerais (Ellert, 1959).

Apesar da importância social, econômica, geológica e estratégica, o reservatório Bortolan ainda necessita de estudos detalhados. Diante disso, este trabalho pretende analisar a hidroquímica do reservatório, por meio da avaliação em três pontos e três profundidades, permitindo assim uma investigação mais ampla da dinâmica espacial e vertical do reservatório, identificando possíveis zonas de maior degradação ou variabilidade química.

Este tipo de estudo é essencial para embasar ações de manejo e conservação, garantindo que o reservatório continue a oferecer seus serviços ecossistêmicos e socioeconômicos de forma sustentável.

2 OBJETIVOS

Este trabalho pretende avaliar a hidroquímica do reservatório Bortolan, em Poços de Caldas (MG).

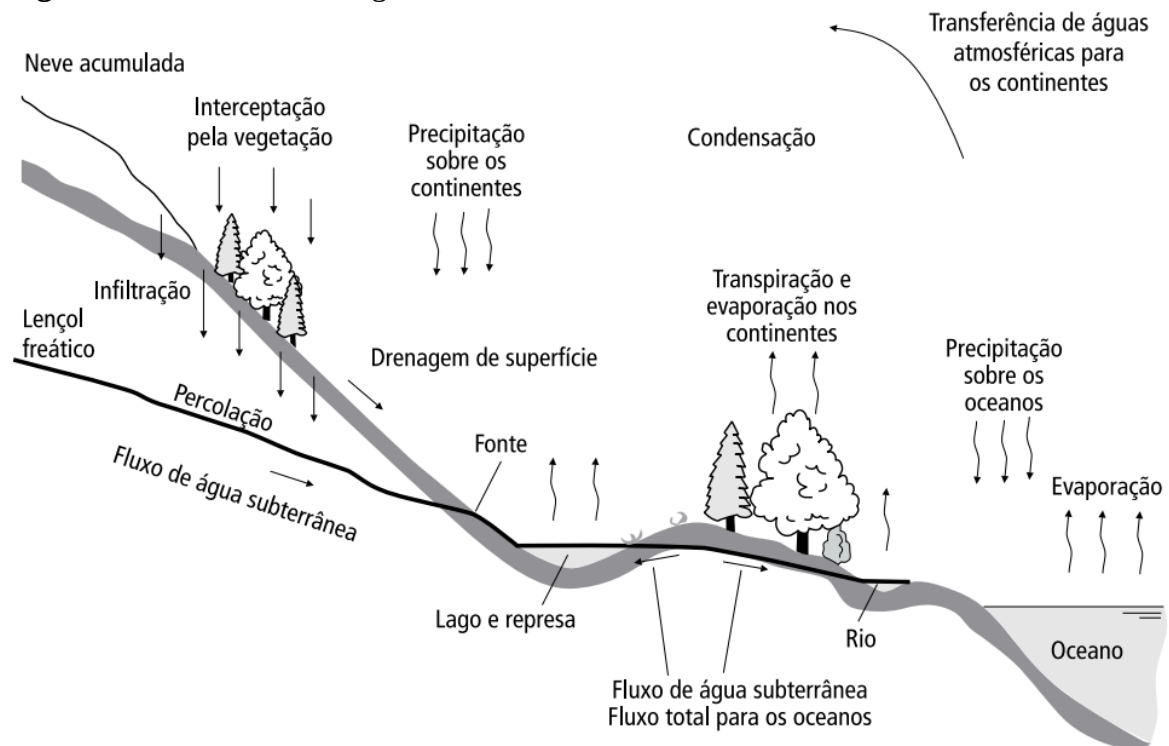
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar a bacia hidrográfica do reservatório;
- b) Caracterizar a morfometria do reservatório;
- c) Caracterizar a coluna de água em pontos representativos do reservatório;
- d) Avaliar o atendimento aos padrões de qualidade estabelecidos para águas de classe 2 segundo a resolução CONAMA 357/2005;
- e) Classificar a hidroquímica das águas através de diagramas representativos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A água está em constante movimentação entre atmosfera, superfície terrestre e oceanos, o que é representado pelo ciclo hidrológico (Figura 1). As águas superficiais e oceânicas evaporam por ação da radiação solar, em seguida se condensam sob a forma de nuvens, que podem precipitar como chuva ou neve. A precipitação que cai sobre o continente infiltra no solo, podendo retornar à atmosfera como vapor, ser absorvida pelas raízes das plantas e/ou atingir o lençol freático; esta água subterrânea flui pelo subsolo e pode retornar a superfície através de nascentes, que dão origem a rios. Além disso, a precipitação flui pela superfície, o que se denomina escoamento superficial; este pode ser transportado por rios e também armazenado em lagos e represas (Grotzinger; Jordan, 2013).

Figura 1 – O ciclo hidrológico



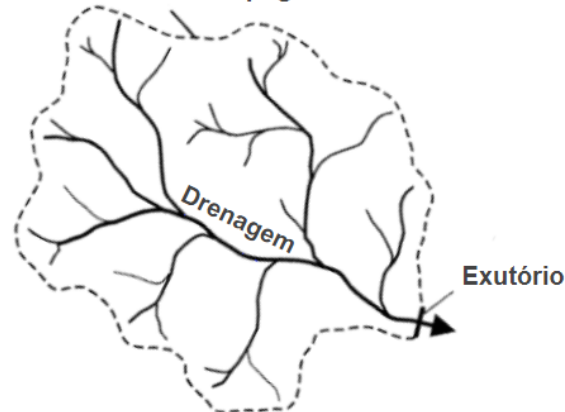
Fonte: Adaptado de Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica é uma unidade de estudo que permite compartmentalizar a análise do ciclo hidrológico na fase terrestre. Trata-se de uma área natural de captação de precipitação, delimitada por divisores que direcionam a água para ser drenada por uma rede de cursos d'água (Figura 2). O divisor é uma elevação no terreno que permite direcionar o escoamento para uma região. Todos os escoamentos da bacia hidrográfica convergem para um

único ponto, denominado “exutório” (Grotzinger; Jordan, 2013; Silveira, 2001; Teixeira, 2000). Santos *et al.* (2001) destacam ainda que as bacias hidrográficas são sistemas físicos extremamente complexos, com características anisotrópicas, heterogêneas e variáveis ao longo do tempo.

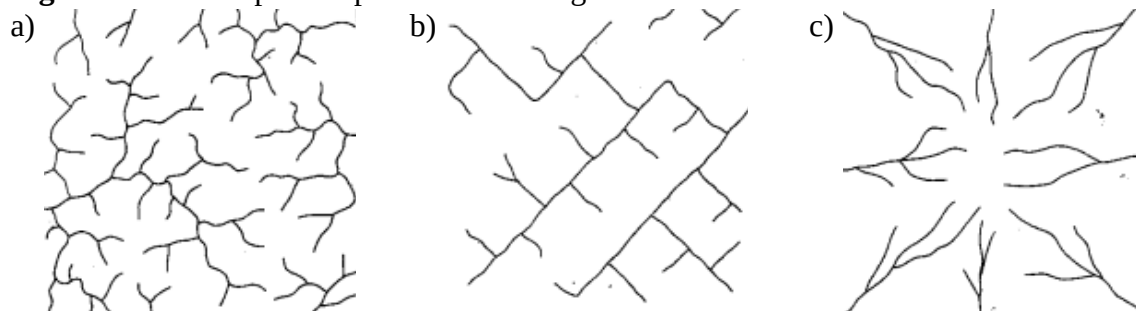
Figura 2 – Elementos da bacia hidrográfica



Fonte: Adaptado de Teixeira (2000).

As bacias hidrográficas podem ser avaliadas por meio de índices morfométricos, isto é, aqueles obtidos a partir de medidas de comprimentos, área e relevo. Assim é possível avaliar características da bacia de estudo e compará-la com outras bacias (Sukristiyanti; Maria; Lestiana, 2018). Com relação à drenagem, existem vários padrões de disposição dos canais na bacia hidrográfica (Figura 3), sendo influenciados por fatores como a geologia e a topografia (Christofolletti, 1980).

Figura 3 – Exemplos de padrões de drenagem



Fonte: Adaptado de Christofolletti (1980).

Legenda: a) dendrítica
 b) retangular
 c) radial.

A rede de drenagem pode ser avaliada por meio do índice denominado densidade de drenagem (D_D , em km/km^2), correspondente à razão entre o somatório dos comprimentos dos canais da rede de drenagem (L_{RD} , em km) e a área da bacia (A_B , em km^2). Silveira (2001)

salienta que o comprimento da rede de drenagem depende da escala do mapa, o que é exemplificado no trabalho de Dragičević, Karleuša e Ožanić (2019). Christofolletti (1979) esclarece que os primeiros trabalhos sobre este assunto, realizados por Horton, Strahler e Schumm, focaram em bacias de pequena extensão, o que resultava em valores de Dd elevados, possivelmente por diferenças metodológicas na delimitação dos canais e pela questão da escala. Isso posto, ao aplicar a mesma escala e metodologia, uma densidade de drenagem maior indica comparativamente uma bacia com solos menos permeáveis. As classes de interpretação para os valores da densidade de drenagem variam conforme o autor, como apresentado no Quadro 1. No entanto, convém destacar que Christofolletti (1979) considera estas classificações “simples adjetivação para expressar a percepção visual do pesquisador”.

Quadro 1 – Classes de drenagem (em km/km²) por autor

Strahler (1960 <i>apud</i> Christofolletti, 1979)	< 7,5: Baixa;	7,5-10,0: Média;	> 10: Alta.
Villela e Mattos (1975)	< 0,5: Pobre;	0,5-3,5: Média;	> 3,5: Boa.
Shankar e Mohan (2006)	< 1: Muito baixa; 1,0 - 2,0: baixa;	2,0 - 3,5: média; > 3,5: alta.	
Shekar e Mathew (2024)	< 1,24: muito grosseira; 1,24 - 2,49: grosseira; 2,49-3,73: moderada;	3,73 - 4,97: fina; > 4,97: muito fina;	

Fonte: A autora, com as fontes indicadas.

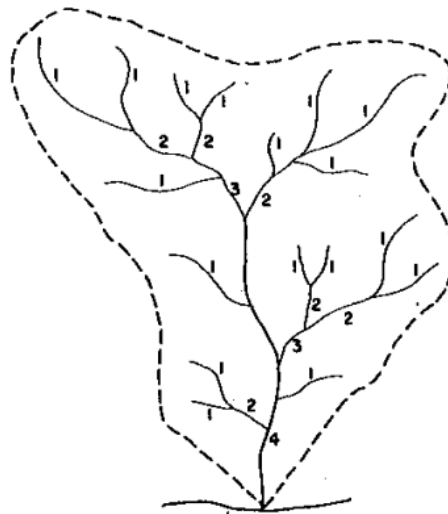
Os cursos d’água da rede de drenagem podem ser hierarquizados, o que permite compreender como a água flui dentro da bacia. A Agência Nacional de Águas (ANA) adota o método de Horton (1945) modificado por Strahler (1957), no qual os canais de primeira ordem são os trechos iniciais sem afluentes; os de segunda ordem são formados pelo encontro de canais de primeira ordem, e assim por diante (Brasil, 2012; Campos, 2018; Christofolletti, 1980), como exemplificado na Figura 4.

Os cursos d’água podem apresentar diversos formatos, como apresentado na Figura 5, sendo que cada tipo reflete condições específicas de escoamento, sedimentação e dinâmica ambiental. O meandrante apresenta curvas acentuadas e se forma em áreas de baixa inclinação, o que favorece a erosão nas margens externas e a sedimentação nas internas. Um canal é considerado meândrico se apresenta índice de sinuosidade superior a 1,5, sendo que o este índice (I_s) corresponde à razão entre o comprimento do canal (L_C , distância ao longo do leito do rio, em km) e o eixo do canal (L_{EC} , também chamado de comprimento do vale, é distância em linha reta do trecho considerado) (Christofolletti, 1980).

As bacias hidrográficas também podem ser hierarquizadas. A ANA utiliza o sistema de Otto Pfafstetter, que codifica e divide as bacias hidrográficas em níveis hierárquicos. Neste

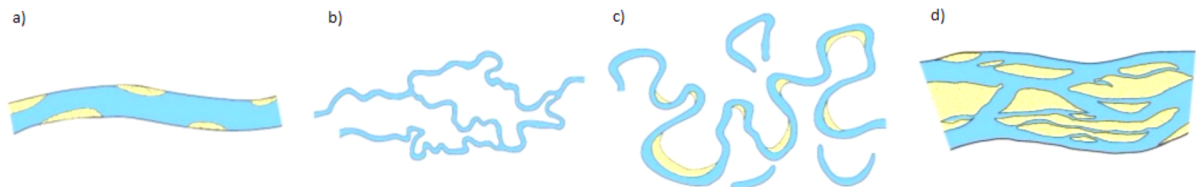
sistema, o nível 1 é o de maior escala, no qual se incluem as grandes bacias hidrográficas, como a do rio Amazonas. Em seguida, cada grande bacia é dividida em bacias menores, codificadas de acordo com posição e tamanho, sendo classificadas como nível 2, e assim sucessivamente, codificando e classificando bacias cada vez menores. Essa estrutura hierárquica permite a realização de análises em diferentes escalas, desde o planejamento hídrico de grandes regiões até a gestão em nível local (Brasil, 2012).

Figura 4 – Hierarquia fluvial em uma bacia hidrográfica conforme Strahler



Fonte: Christofolletti (1980, p. 107).

Figura 5 – Tipos principais de canais fluviais



Fonte: Adaptado de Teixeira (2008).

Legenda: a) retilíneo
b) anastomosado
c) meandrante
d) entrelaçado.

Outros parâmetros importantes na caracterização morfométrica de bacias hidrográficas são perímetro (P_B , em km), comprimento (Y_B , em km) e largura média (X_B , em km). Christofolletti (1980) apresenta várias formas de determinar o comprimento, em linha reta, tais como: maior distância da foz a um ponto qualquer do perímetro; ou distância da foz ao ponto mais alto do perímetro. Já para a largura média (X_B), Wetzel (2001) recomenda dividir a área (A_B) pelo eixo axial da bacia (Y_B).

Conforme Villela e Mattos (1975), fator de forma e coeficiente de compacidade são índices importantes para indicar a propensão da bacia a inundações. O fator de forma (K_f)

compara a bacia a um retângulo e é calculado pela relação entre a largura média da bacia (X_B) e seu comprimento axial (Y_B), conforme a Equação 1. Observando esta equação, é possível comparar bacias de área igual, assim conclui-se que bacias de forma mais alongada (maior Y_B e menor K_f) são menos propensas a inundações que bacias mais próximas a um quadrado (K_f mais próximo de 1). Isso ocorre porque nas alongadas é menos provável que uma chuva intensa alcance toda a extensão da bacia.

$$\text{Sendo: } X_B = A_B / Y_B,$$

$$\text{então: } K_f = \frac{X_B}{Y_B} = \frac{A_B / Y_B}{Y_B} \Rightarrow K_f = \frac{A_B}{Y_B^2}, \quad (1)$$

onde: A_B - área da bacia hidrográfica;

K_f - fator de forma;

X_B - largura média da bacia hidrográfica;

Y_B - comprimento axial da bacia hidrográfica.

Já o coeficiente de compacidade (K_c), também chamado de Índice de Gravelius, é calculado pela relação entre o perímetro da bacia (P_B) e o perímetro de um círculo de mesma área da bacia, conforme demonstrado abaixo (Equação 2). Assim, quanto mais uma bacia se aproxima de uma forma circular (isto é, K_c próximo de 1), mais compacta e maior é a sua susceptibilidade a inundação, pois concentra o escoamento superficial para um trecho menor de rio (Campos, 2018; Villela e Mattos, 1975).

$$\text{Sendo: } A_B = A_A = \pi R_A^2 \Rightarrow R_A = \sqrt{A_B / \pi}, \text{ então } C_A = 2\pi R_A = 2\sqrt{\pi A_B},$$

$$\text{então, } K_c = \frac{P_B}{C_A} = \frac{P_B}{2\sqrt{\pi A_B}} \Rightarrow K_c = 0,28 \frac{P_B}{\sqrt{A_B}}. \quad (2)$$

onde: A_A - área da circunferência de mesma área da bacia;

A_B - área da bacia hidrográfica;

C_A - perímetro da circunferência de mesma área da bacia;

K_c - coeficiente de compacidade;

P_B - perímetro da bacia hidrográfica;

R_A - raio da circunferência de mesma área da bacia;

O índice de circularidade (I_C) é semelhante ao coeficiente de compacidade, pois mede a razão entre a área da bacia (A_B) e a área de um círculo que possui o mesmo perímetro da bacia (Equação 3). Da mesma forma, quanto mais próximo de 1, mais circular é a bacia

(Campos, 2018; Christofolletti, 1980).

Sendo $P_B = C_C = 2\pi R_C \Rightarrow R_C = P_B/2\pi$, então $A_C = \pi R_C^2 = P_B^2/4\pi$,

$$\text{então, } I_C = \frac{A_B}{A_C} = \frac{A_B}{P_B^2/4\pi} \Rightarrow I_C = 12,57 \frac{A_B}{P_B^2}, \quad (3)$$

onde: A_B - área da bacia hidrográfica;

A_C - área do círculo de mesmo perímetro da bacia;

C_C - perímetro do círculo de mesmo perímetro bacia;

I_C - índice de circularidade;

P_B - perímetro da bacia hidrográfica;

R_C - raio do círculo de mesmo perímetro da bacia.

Outro aspecto importante na caracterização de uma bacia hidrográfica é o uso e cobertura da terra. Basicamente, a cobertura da terra refere-se aos elementos que recobrem a superfície enquanto o uso da terra está associado às atividades humanas desenvolvidas sobre ela. Alterações nessas características impactam a qualidade da água e o equilíbrio dos ecossistemas. Como exemplos de impactos nas bacias hidrográficas, é possível citar: o desmatamento, que pode causar a erosão e levar ao assoreamento de corpos hídricos e cursos d'água bem como afetar a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a recarga dos aquíferos; a agricultura e a urbanização, que contribuem para a poluição dos rios por fertilizantes, pesticidas e esgotos (Lollo *et al.*, 2018).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

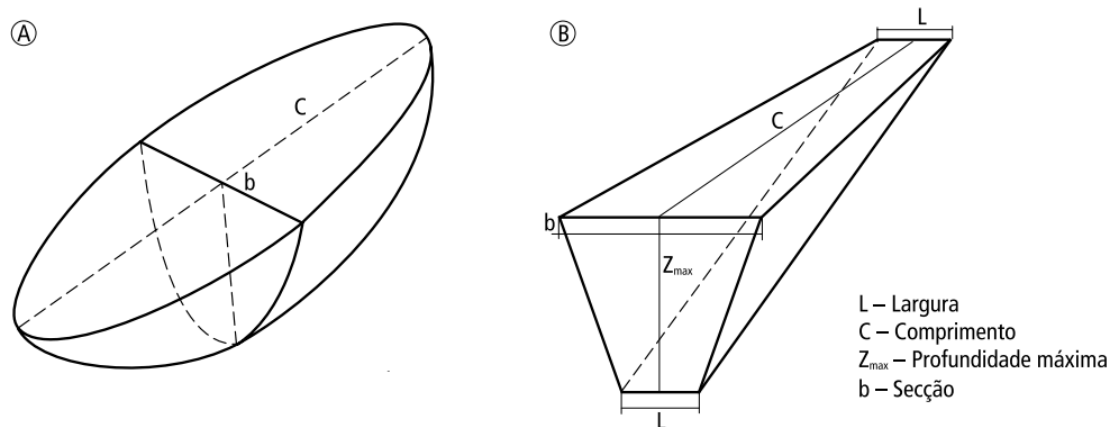
Os ecossistemas aquáticos continentais podem ser classificados quanto ao fluxo de água. Os ambientes lóticos são aqueles que apresentam águas moventes, como nos rios. Já os ambientes lênticos são marcados por água com movimento lento, como os lagos. Esta classificação pode ser feita com base no tempo de residência (também chamado de tempo de retenção hidráulica), que é o período médio em que a água permanece em um sistema antes de ser renovada e pode ser estimado pela razão entre o volume do corpo d'água e a vazão de entrada ou saída. A Resolução CONAMA nº 357/2005 considera a existência de um ambiente intermediário entre esses dois extremos, com tempo de residência entre 2 e 40 dias (Brasil, 2005). Margalef (1983 *apud* Ferrari, 2010) classifica os reservatórios como ecossistemas de transição entre lótico e lêntico, assim como Henry (1999) *apud* Viana (2009), que acrescenta ainda que os reservatórios para geração de energia costumam apresentar tempo de residência

inferior àqueles para abastecimento.

Lagos e represas se distinguem pela origem: lagos são naturais e represas são artificiais. Segundo Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008), represas são construídas pela humanidade há milhares de anos, mas se tornaram numerosas a partir do final do século XIX; ou seja, são jovens do ponto de vista do tempo geológico quando comparadas aos lagos, que são do período pleistoceno ou anterior.

Quanto à morfometria, os lagos normalmente são regulares, de formato oval ou circular, com profundidade máxima no centro; já as represas podem apresentar formato irregular, tendo a profundidade máxima próxima ao barramento, conforme Figura 6 (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Figura 6 – Morfometria típica de (a) lagos e (b) represas



Fonte: Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008, p. 61).

Alguns parâmetros que podem ser utilizados para descrever a morfometria de lagos e reservatórios são: área (A_R), volume (V_R), perímetro (P_R) e profundidade máxima ($Z_{m\acute{a}x}$). Com relação ao comprimento, Hakanson (1981) apresenta o comprimento máximo (Y_R) como a linha que conecta os dois pontos mais distantes no perímetro, sem cruzar terras, podendo ser uma linha curva, enquanto o comprimento máximo efetivo segue as mesmas regras, mas é obrigatoriamente uma linha reta. A largura máxima é a maior reta perpendicular ao comprimento máximo enquanto a largura média (X_R) é calculada do mesmo modo que a largura média da bacia hidrográfica, ou seja, com a razão da área (A_R) pelo comprimento (Y_R). Analogamente, a profundidade média ($Z_{m\acute{e}d}$) pode ser calculada pela razão entre o volume (V_R , m³) e a área (A_R , m²).

A partir destes parâmetros, podem ser calculados índices, como desenvolvimento de margem (D_M , Equação 4), que descreve o grau de irregularidade das margens por meio da razão entre o perímetro e o comprimento de uma circunferência de área igual ao lago, obtido

da mesma maneira que o coeficiente de compacidade da bacia hidrográfica, K_c . Lagos muito circulares apresentam valores próximos de 1. No entanto, a maioria dos lagos possui formato elíptico, com D_M em torno de 2. Lagos alongados ou com contornos dendríticos apresentam valores maiores, entre 3 e 5. Valores acima de 10 são raros (Hakanson, 1981; Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008; Wetzel, 2001).

$$D_M = \frac{P_R}{2\sqrt{\pi A_R}} = 0,28 \frac{P_R}{\sqrt{A_R}}. \quad (4)$$

Analogamente, existe um índice chamado desenvolvimento de volume (D_V , Equação 5), definido como a razão entre o volume do lago e o volume de um cone cuja base tem a mesma área do lago e cuja altura corresponde à profundidade máxima (Hakanson, 1981; Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

$$\begin{aligned} \text{Sendo: } V_C &= \frac{1}{3} A_b \cdot h = \frac{1}{3} A_R \cdot Z_{\text{máx}}; \\ Z_{\text{méd}} &= V_R / A_R; \\ \text{então: } D_V &= \frac{V_R}{V_C} = \frac{V_R}{(1/3) A_R \cdot Z_{\text{máx}}} = 3 \frac{V_R}{A_R} \frac{1}{Z_{\text{máx}}} \Rightarrow D_V = 3 \frac{Z_{\text{méd}}}{Z_{\text{máx}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

onde: A_b - área da base do cone;

A_R - área da represa ou lago;

D_V - desenvolvimento de volume;

h - altura do cone;

V_C - volume do cone;

V_R - volume da represa;

$Z_{\text{máx}}$ - profundidade máxima da represa ou lago;

$Z_{\text{méd}}$ - profundidade média da represa ou lago.

Outro índice morfométrico é a profundidade relativa (Z_{rel}), que indica relação da profundidade máxima com a área superficial do lago, por meio da razão entre a profundidade máxima e o diâmetro de um círculo de área igual à área da represa ou lago, sendo expressa em porcentagem (Equação 6). A maioria dos lagos possui Z_{rel} inferior a 2%, enquanto lagos mais profundos e de área superficial pequena tendem a apresentar valores superiores a 4%. Quanto maior a profundidade relativa, maior a probabilidade de o lago apresentar estratificação térmica estável (Hakanson, 1981; Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008; Wetzel, 2001).

$$\text{Sendo: } A_R = A_{c'} = \pi R_{c'}^2 \Rightarrow R_{c'} = \sqrt{A_R / \pi}, \text{ então: } d = 2R_{c'} = 2\sqrt{A_R / \pi}.$$

$$\text{Sendo: } Z_{rel\%} = 100 \frac{Z_{m\acute{a}x}}{d} = 100 \frac{Z_{m\acute{a}x}}{2\sqrt{A_R/\pi}} = 50 \frac{Z_{m\acute{a}x}\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_R}}$$

$$\therefore Z_{rel\%} = 88,62 \frac{Z_{m\acute{a}x}}{\sqrt{A_R}}, \quad (6)$$

onde: A_c - área da circunferência de mesma área da represa ou lago;

A_R - área da represa ou lago;

d - diâmetro de um círculo de área igual à área da represa ou lago;

R_c - raio da circunferência de mesma área da bacia

$Z_{m\acute{a}x}$ - profundidade máxima da represa ou lago;

$Z_{rel\%}$ - profundidade relativa, em porcentagem.

Finalmente, é possível calcular o fator de envolvimento (F_E), que é a razão entre a área da bacia e a área da massa d'água. Von Sperling (1999) afirma que este índice relaciona-se ao transporte de sedimentos e nutrientes para o reservatório, influenciando processos como o assoreamento e a eutrofização. Em lagos naturais, esse fator geralmente apresenta valores na ordem de algumas dezenas, enquanto em represas pode alcançar centenas e, em alguns casos, ultrapassar 1000.

Com relação à caracterização do reservatório do ponto de vista físico, destaca-se a interação com a radiação solar, que atinge os corpos hídricos e sofre processos de reflexão, refração e absorção. A absorção varia de acordo com a quantidade de compostos dissolvidos, material particulado e organismos fotossintetizantes (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

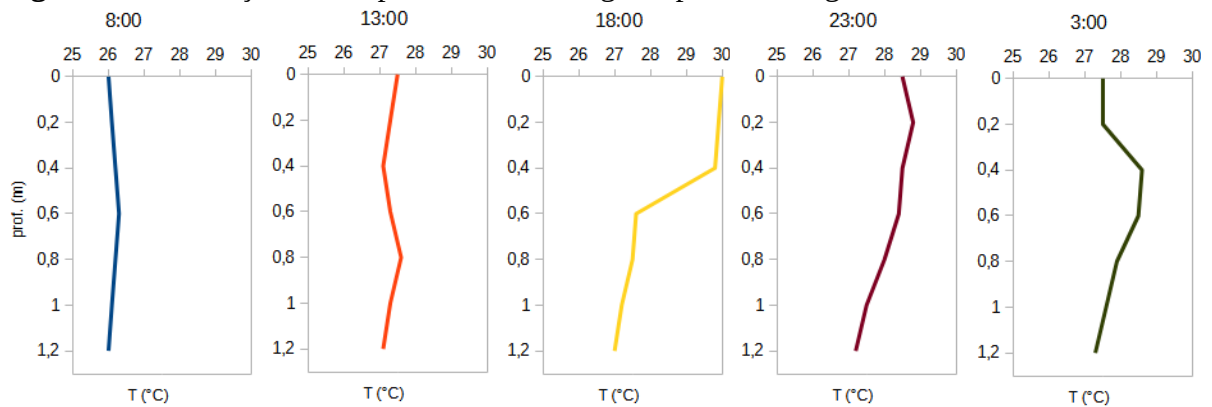
A camada iluminada do corpo d'água recebe o nome de zona eufótica enquanto a camada não iluminada recebe o nome de zona afótica. A profundidade da zona eufótica depende dos fatores mencionados anteriormente para a absorção, além das estações do ano e eventos climáticos. A extensão dessa camada influencia fortemente a dinâmica vertical do ecossistema aquático, pois é onde ocorre a fotossíntese (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

A temperatura de lagos e reservatórios em função da profundidade apresenta vários padrões de comportamentos, que variam de acordo com a estação do ano e com o tipo de clima. Os lagos tropicais apresentam temperaturas uniformes no inverno e estratificação térmica na primavera, verão e outono. Este fenômeno acontece também ao longo do dia, com estratificação máxima entre 16 e 17 horas e desestratificação ao longo da noite, conforme apresentado na Figura 7 (Esteves, 2011).

O aquecimento da água ocorre principalmente pela absorção da radiação solar na frequência do infravermelho nos primeiros centímetros da coluna d'água. Nas estações

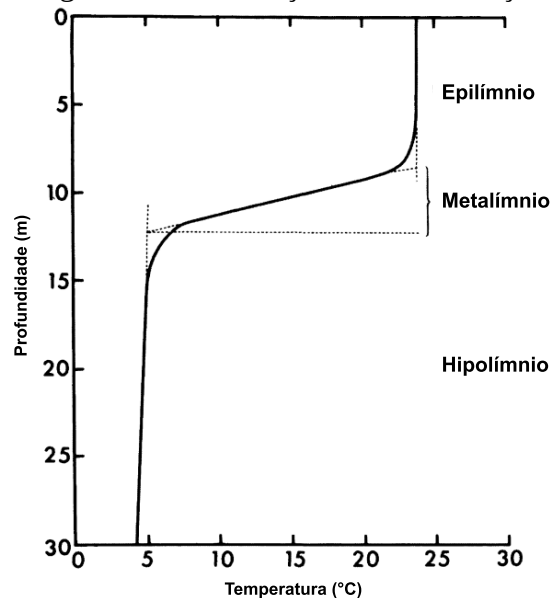
quentes, a estratificação térmica é observada pela formação de uma camada de maior temperatura na superfície, denominada epilímnio; conseqüentemente, esta camada de maior temperatura possui menor densidade por conta da dilatação térmica. Analogamente, a camada profunda, o hipolímnio, é mais fria e mais densa. Entre estas duas camadas, encontra-se o metalímnio, uma região de transição (Figura 8). Se não houver vento suficiente, estas camadas de diferentes densidades não se misturam (Esteves, 2011).

Figura 7 – Variação da temperatura de um lago tropical ao longo de um dia de verão



Fonte: A autora a partir de dados de Esteves (2011).

Figura 8 – Regiões numa condição de estratificação térmica em lagos



Fonte: Adaptado de Wetzel (2001).

Por outro lado, na estação fria, há perda de calor para a atmosfera. Então pode ocorrer uniformidade na temperatura da coluna d'água e, por conseguinte, da densidade. Ou seja, não se formam barreiras de densidade e assim o calor se propaga de maneira eficiente, promovendo uma circulação vertical completa (Esteves, 2011).

A resistência térmica relativa à mistura (RTR) quantifica a estabilidade da

estratificação térmica em lagos, ou seja, quão resistente a coluna d'água é à mistura vertical devido a diferenças de densidade em virtude das diferenças de temperatura. Em outras palavras, quanto maior a RTR de uma camada, maior a diferença de densidade e mais difícil é a mistura vertical. Esse índice é calculado dividindo-se o lago verticalmente em camadas, utilizando a Equação 7, e é exemplificado na Figura 9.

$$RTR = \frac{d_{T1} - d_{T2}}{d_4 - d_5}, \quad (7)$$

onde: d_{T1} e d_{T2} - densidades da água nas temperaturas $T1$ e $T2$;

d_4 e d_5 : densidades da água nas temperaturas de 4 e 5°C.

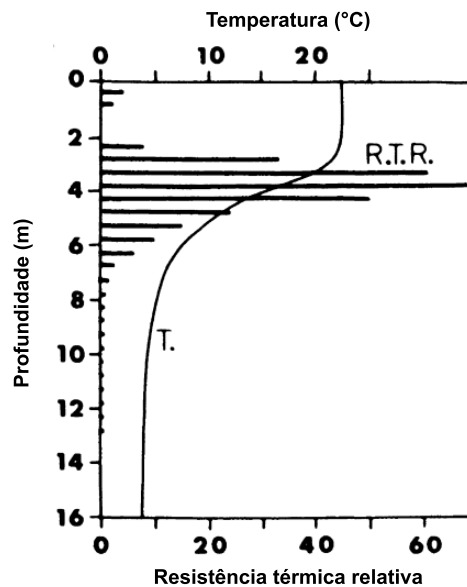
Por sua vez, a densidade em função da temperatura pode ser estimada com equações, como a de Krambeck, apresentada a seguir (Rodríguez-Rodríguez, M. *et al.*, 2004).

$$d = 0,999869 + 6,67413 \cdot 10^{-5} T - 8,85556 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,23031 \cdot 10^{-8} T^3 - 5,51577 \cdot 10^{-10} T^4, \quad (8)$$

onde: d - densidade da água;

T - temperatura em °C.

Figura 9 – Resistência térmica relativa

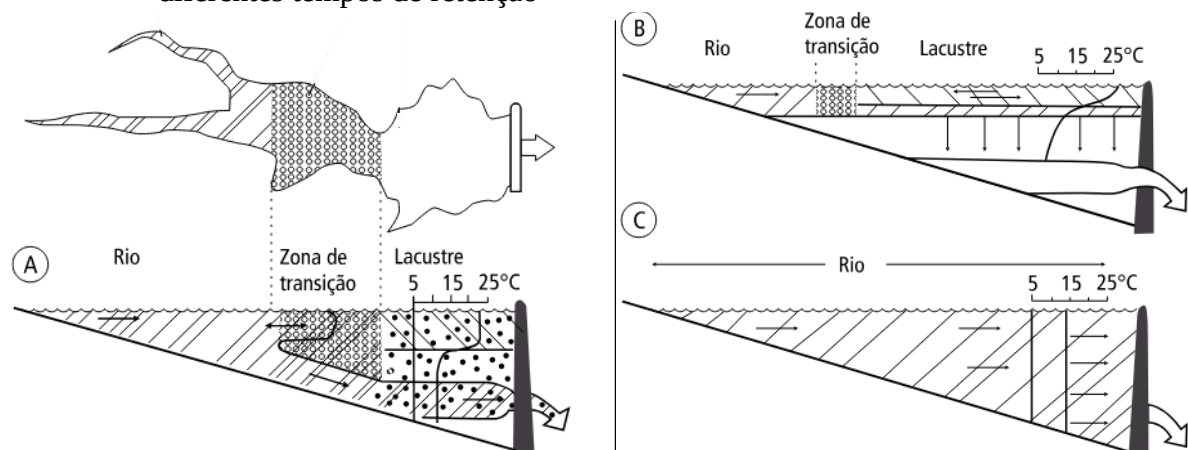


Fonte: Adaptado de Wetzel (2001).

Lehmusluoto *et al.* (1999) *apud* Branco (2009), estudando lagos na Indonésia, classificou como fracamente estratificados aqueles com RTR variando entre 16 e 64, nitidamente estratificados quando entre 56 e 156. Já Kortmann (2003) *apud* López e Cuartas (2024), afirma que os valores de RTR superiores a 20 entre camadas adjacentes de 1 m de profundidade geram resistência à mistura.

Além da estratificação vertical, podem ocorrer gradientes horizontais. Nas represas, estes gradientes são provocados principalmente pela direção do fluxo de água, o que causa a distinção de três áreas: a primeira, fluvial, sob influência dos afluentes; uma região intermediária; e a última, de comportamento mais lacustre. Conforme ilustrado na Figura 10, a extensão de cada uma destas zonas depende do tempo de retenção. A zona fluvial normalmente é estreita, com velocidade da água maior, alta turbidez e alta carga de matéria orgânica, resultando em consumo de oxigênio. Na zona de transição, a velocidade da água diminui, permitindo a sedimentação de partículas e aumentando a penetração de luz, o que favorece a produtividade do fitoplâncton. Por fim, a zona lacustre apresenta características semelhantes aos lagos naturais, com estratificação térmica e processos de produção e decomposição de matéria orgânica, que podem ser afetados pela retirada de água no fundo do reservatório (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008; Wetzel, 2001).

Figura 10 – Zonas longitudinais de um reservatório e alterações na extensão das zonas para diferentes tempos de retenção



Fonte: Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008, p. 332).

Legenda: a) tempo de retenção entre 10 e 100 dias

b) tempo de retenção superior a 100 dias

c) tempo de retenção de 10 dias.

Com relação à caracterização química de lagos e represas, há grande influência de processos de intemperismo e das condições climáticas locais. Basicamente, ocorrem interações entre rochas e solos com a água, o que pode provocar a formação de minerais secundários bem como a liberação de íons que são drenados através dos cursos d'água. Além disso, interações com a atmosfera, sedimentos e organismos afetam as características físicas e químicas da água.

As águas apresentam sólidos que podem estar suspensos ou dissolvidos. Define-se como sólidos totais o resíduo após secar uma amostra de água a 105°C. Ao realizar este procedimento em uma amostra filtrada em filtro de poro 2,0 µm ou inferior, obtém-se os

sólidos totais suspensos (STS) para a fração retida no filtro e sólidos totais dissolvidos (STD) para a fração que passa através do filtro. Todas estas frações podem ser calcinadas, obtendo-se os sólidos fixos enquanto a massa volatilizada é chamada de sólidos voláteis, que correspondem a decomposição de matéria orgânica e de também de alguns compostos inorgânicos (APHA, 2012).

A turbidez é uma propriedade óptica relacionada à absorção e ao espalhamento da luz por sólidos suspensos ou coloidais em uma amostra. Estes sólidos podem ser argila, silte, compostos orgânicos e inorgânicos finamente divididos, e microorganismos (APHA, 2012).

A turbidez da água pode ser aumentada pela erosão das margens dos rios durante períodos de chuva, assim como pelo despejo de esgotos e resíduos industriais. Essa maior turbidez interfere na fotossíntese, o que pode afetar negativamente a vida aquática. Além disso, a turbidez elevada prejudica o uso da água para fins domésticos, industriais e de lazer (CETESB, 2023).

A condutividade elétrica mede a capacidade de uma solução conduzir uma corrente elétrica (APHA, 2012). Esta propriedade está diretamente relacionada aos compostos iônicos dissolvidos na água, que correspondem à fração iônica dos sólidos totais dissolvidos (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

No caso de águas com valores extremos de pH (abaixo de cinco ou acima de 9), os íons hidrônio e hidroxila contribuem significativamente para o valor da condutividade (Esteves, 2011).

Em regiões tropicais, a condutividade varia de acordo com as chuvas, sendo menor na estação seca e maior na estação chuvosa. Também se relaciona com o estado trófico e com a influência antrópica, sendo menor em ambientes preservados e maior em ambientes alterados (Esteves, 2011). Valores de condutividade acima de $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ são encontrados em ambientes degradados (CETESB, 2023).

Com relação à variação vertical da condutividade, há relação com a estratificação térmica. Em homotermia, a condutividade apresenta pouca variação vertical. Em estratificação, o hipolímnio tende a apresentar maior condutividade que o epilímnio (Esteves, 2011).

Quanto à composição, as águas naturais apresentam diversas substâncias dissolvidas, como os gases atmosféricos nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2). Também encontram-se dissolvidos diversos íons, que podem ser divididos em principais, nutrientes e traços. Os íons principais são considerados conservativos, pois suas concentrações não são afetadas pela atividade de organismos. Este grupo é formado por sódio

(Na⁺), potássio (K⁺), magnésio (Mg²⁺), cálcio (Ca²⁺), sulfato (SO₄²⁻), cloreto (Cl⁻) e bicarbonato (HCO₃⁻), encontrados em concentrações na ordem de mg.L⁻¹ (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

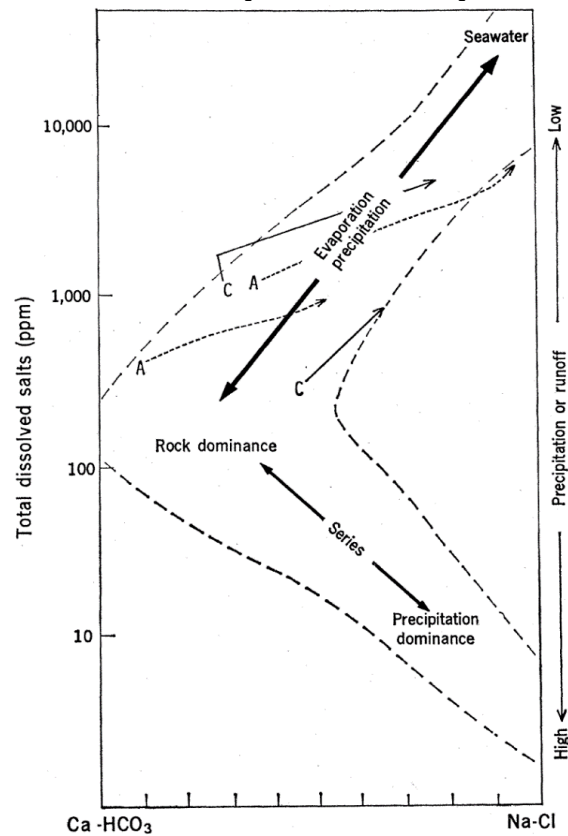
Em seguida, há os íons nutrientes principais, que não são conservativos e são encontrados em concentrações entre µg.L⁻¹ e mg.L⁻¹. Este grupo contém fosfato (PO₄³⁻), nitrato (NO₃⁻), amônio (NH₄⁺), sílica (SiO₂), ferro III (Fe³⁺) e manganês (Mn³⁺). Os íons traço encontram-se dissolvidos em concentrações entre µg.L⁻¹ e mg.L⁻¹ e compreende diversos metais como cobre (Cu²⁺), vanádio (V⁵⁺), zinco (Zn²⁺), cobalto (Co²⁺) e ânions como fluoreto (F⁻) e brometo (Br⁻). Além disso, encontram-se substâncias orgânicas, que podem ser lábeis (de fácil decomposição), na ordem de µg.L⁻¹ e mg.L⁻¹, ou refratárias (de difícil decomposição), na ordem de ng.L⁻¹ a µg.L⁻¹ (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

A concentração de sais dissolvidos apresenta grandes variações nas águas continentais, pois depende da interação com rochas e solos de cada local durante a drenagem. Solos de origem vulcânica, por exemplo, contribuem com ferro, enquanto rochas sedimentares liberam sulfato, carbonato e fosfato. E a capacidade de dissolução destes sais pela água é aumentada pela ação da temperatura, acidez, fluxo de água e oxigênio dissolvido na água. Como exemplos, podemos citar a dissolução de alumínio e ácido silícico em pH abaixo de 4,5 (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Os principais mecanismos que controlam a concentração dos íons principais nas águas em nível global foram estudados por Gibbs (1970). O autor avaliou a composição de diversos rios e lagos, bem como a precipitação em suas bacias hidrográficas; a partir da diferença entre as concentrações de alguns íons destes dois parâmetros, determinou quanto era proveniente da dissolução de rochas e solos, encontrando o padrão representado na Figura 11.

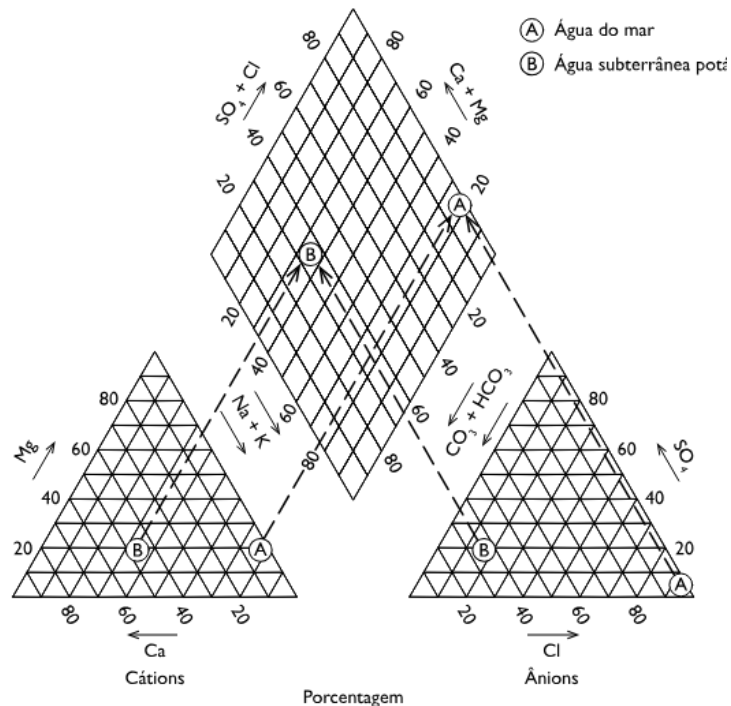
Os rios e lagos de regiões tropicais apresentam poucos sólidos totais dissolvidos (STD) e estão sujeitos a altas precipitações. Por isso, suas águas apresentam pouco cálcio em relação ao sódio, então estes dados ficam localizados à direita do diagrama. Já nas regiões áridas ocorre dominância de evaporação. Conforme STD aumenta, há precipitação de CaCO₃, o que faz a concentração de sódio ser maior que a de cálcio, deslocando os dados para a direita do diagrama. Numa situação intermediária, encontram-se os rios e lagos cuja composição é significativamente influenciada pela interação com rochas e solos. Nestes, a concentração de cálcio passa a ser mais importante que nas situações anteriores, deslocando os dados para a esquerda do diagrama.

Figura 11 – Diagrama dos mecanismos que controlam a química das águas superficiais



Fonte: Gibbs (1970, p. 1089).

Figura 12 – Diagrama de Piper, representando a composição como porcentagens em equivalentes por litro.



Fonte: Freeze e Cherry (1979, cap. 7).

Outro diagrama para classificação de águas quanto à composição química foi

desenvolvido por Piper em 1944 e é utilizado para representar a relação entre principais cátions e ânions presentes na água (Figura 12). O diagrama consiste em dois triângulos ternários, um para cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) e outro para ânions (SO_4^{2-} , Cl^- e $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$). Esses triângulos são projetados em um losango central, facilitando a comparação entre diferentes amostras e a identificação de padrões químicos (Freeze; Cherry, 1979).

A composição das águas é bastante influenciada pelo pH. A sigla pH significa potencial hidrogeniônico. Trata-se de uma escala anti-logarítmica para a concentração de íons hidrogênio em um meio (Equação 9), que varia de 0 a 14, indicando acidez quando menor que 7, neutralidade quando 7 ou alcalinidade para valores acima de 7 (Von Sperling, 2014).

$$\text{pH} = -\log[H^+]. \quad (9)$$

O pH de um corpo hídrico é influenciado por fatores naturais, como a dissolução de gás carbônico (discutida adiante) e de rochas, bem como por causas antropogênicas, como lançamento de efluentes domésticos e industriais (Von Sperling, 2014).

Os lagos em geral apresentam pH entre 6 e 9 (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008). Valores mais elevados indicam um ambiente eutrofizado, com proliferação de algas, enquanto valores inferiores são indicativos de despejo de efluentes industriais (Von Sperling, 2014).

Convém destacar que o pH influencia a solubilidade dos metais. Em meio ácido, a dissolução dos metais é favorecida, pois reduz a formação de compostos insolúveis, como hidróxidos e carbonatos. Já em meio básico, muitos metais formam precipitados insolúveis, como hidróxidos (ex.: $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_3$) e carbonatos (ex.: PbCO_3 , ZnCO_3), reduzindo sua solubilidade e biodisponibilidade (Peng *et al.*, 2009).

Em conjunto com o pH, os processos de oxidação-redução são fundamentais na química das águas naturais, influenciando a mobilidade e a disponibilidade de diversos elementos químicos. Nestes sistemas, o principal agente oxidante é o oxigênio dissolvido, que reduz o seu nox de 0 para -2. Enquanto a principal substância oxidada é a matéria orgânica, produzindo dióxido de carbono e água. Já em condições anaeróbicas, os processos de redução predominam. Por exemplo, sulfatos podem ser reduzidos a ácido sulfídrico num processo mediado por bactérias anaeróbicas (Hem, 1985; Esteves, 2011).

Estes processos são mensurados pelo potencial de oxirredução, que mede a espontaneidade de uma espécie química receber elétrons, ou seja, ser reduzida; neste caso, valores positivos indicam uma reação de redução espontânea. Então, numa situação de potencial redox baixo, dizemos que o meio é redutor pois há elétrons facilmente disponíveis para provocar a redução de outra substância. Analogamente, um meio oxidante possui

potencial redox alto pois sofre redução e provoca a oxidação de outro reagente (Esteves, 2011).

Em termos numéricos, para valores de potencial redox acima de +400 mV, o oxigênio é o principal receptor de elétrons. Quando o potencial redox fica entre +100 e +300 mV, houve consumo de oxigênio, assim nitrato e manganês (IV) passam a ser receptores de elétrons. Numa situação de consumo ainda maior de oxigênio, levando o potencial redox de 0 a -300 mV, ferro (III), sulfato, matéria orgânica e gás carbônico tornam-se receptores de elétrons (Jardim, 2014).

Segundo Peng *et al.* (2009), o potencial de oxirredução é um fator importante na mobilidade dos metais pesados nos sedimentos. Em condições redutoras, metais como cádmio, cobre, chumbo e zinco podem se ligar a sulfetos e formar compostos insolúveis. No entanto, quando o potencial de oxirredução aumenta, ocorre a oxidação dos sulfetos metálicos e da matéria orgânica, liberando os metais adsorvidos ou complexados.

Muito relacionada ao potencial redox, temos a concentração de oxigênio dissolvido. Primeiramente, convém destacar que a solubilidade de gases na água depende de alguns fatores como a pressão atmosférica (diretamente proporcional), temperatura (inversamente proporcional) e salinidade (inversamente proporcional). A partir disso, pode-se definir a saturação de oxigênio como a quantidade máxima de oxigênio que pode estar dissolvido a uma dada temperatura e pressão; ao nível do mar e a 20°C, a concentração de saturação em água pura é de 9,2 mg/L. A partir deste conceito, define-se a porcentagem de saturação de oxigênio, que também é utilizada para expressar a concentração de oxigênio dissolvido (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008; Von Sperling, 2014).

A principal fonte de oxigênio para a água é o transporte decorrente da turbulência provocada pelo vento ou por desníveis. Numa condição de circulação completa e de baixa produtividade, observa-se uma distribuição vertical de oxigênio uniforme, com leve aumento com a profundidade em decorrência do decréscimo da temperatura (Figura 13a). Já em um lago estratificado e produtivo, observa-se saturação de oxigênio no epilímnio e anoxia no hipolímnio (Figura 13b); esse consumo de oxigênio é decorrente da interação com o sedimento, onde ocorre decomposição de matéria orgânica e oxidação de cátions.

A atividade fotossintética também acrescenta oxigênio à água (Equação 10), o que em condições de acúmulo de fitoplâncton e macrófitas pode levar à supersaturação de oxigênio no metalímnio (Figura 13b). Por outro lado, a respiração de plantas, animais e microrganismos consomem oxigênio (Equação 11). As perdas de oxigênio dissolvido também podem ocorrer pelo aumento de material em suspensão em decorrência da drenagem após

fortes precipitações (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

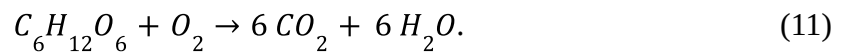
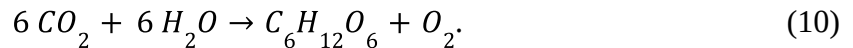
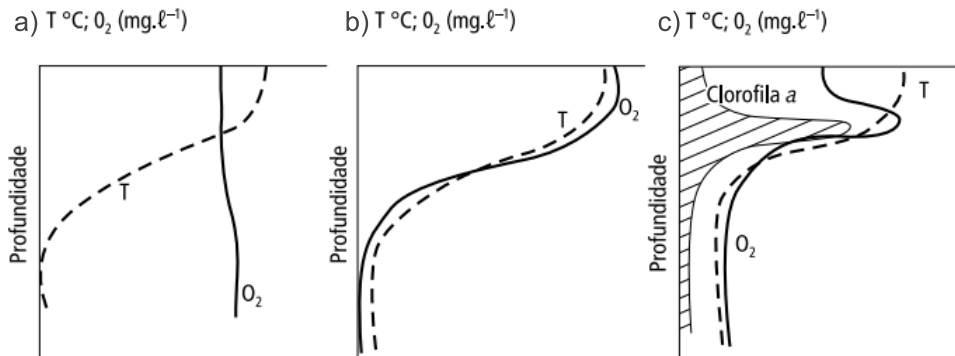


Figura 13 – Perfis de OD em função da profundidade em lagos, onde a curva tracejada representa a temperatura e a curva contínua representa a concentração de oxigênio

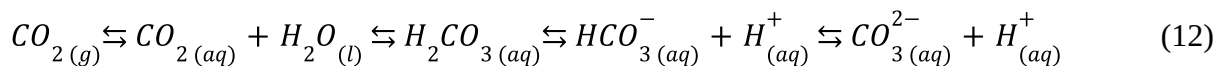


Fonte: Adaptado de Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008).

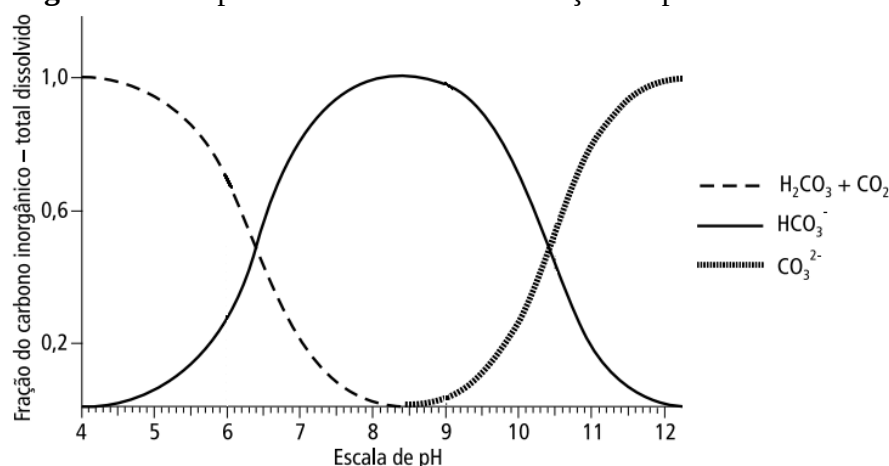
Legenda: a) Ortograda;
b) Clinograda;
c) Heterograda positiva.

O oxigênio é um gás essencial para a vida e desempenha um papel crucial em diversas reações químicas que ocorrem num corpo hídrico. Para fins de interpretação de valores, Von Sperling (2014) afirma que “com OD em torno de 4-5 mg/L, os peixes mais exigentes não sobrevivem; com OD igual a 2 mg/L, praticamente todos os peixes não sobrevivem; com OD igual a 0 mg/L, tem-se condições de anaerobiose, com possível geração de maus odores”.

O gás carbônico atmosférico também se dissolve na água, o que provoca a formação de ácido carbônico (H_2CO_3), conforme a Equação 12. Estabelece-se um equilíbrio químico entre ácido carbônico e seus ânions bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) em função do pH do meio, conforme o gráfico da Figura 14 (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008). Estas espécies são classificadas como carbono inorgânico (Esteves, 2011).



A distribuição vertical de gás carbônico é complementar à curva de OD. Por exemplo, no caso de uma curva clinograda de OD, a curva de gás carbônico é uma clinograda inversa. Então, neste caso, observa-se um acúmulo de gás carbônico no hipolímnio (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Figura 14 – Espécies carbonatadas em função do pH

Fonte: Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008, p. 115).

Ainda sobre o equilíbrio da Equação 12, é importante mencionar a relação com o conceito de alcalinidade, que é a capacidade de neutralizar ácidos. Esta capacidade é proveniente do somatório de todas as bases presentes na água. Destas, predominam hidróxido, carbonato e bicarbonato, sendo o bicarbonato a principal base para a maioria das águas doces, cujo pH situa-se de 6 a 9, conforme Figura 14 (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008; APHA, 2012). Sais de ácidos fracos inorgânicos (boratos, silicatos e fosfatos) e orgânicos (ácido húmico, entre outros) também afetam a alcalinidade, mas não costumam ser considerados pela baixa influência que exercem (CETESB, 2023).

Carbonatos podem ser encontrados em águas com excesso de algas, especialmente quando há muita luz solar, o que leva ao consumo de gás carbônico durante a fotossíntese, aumentando o pH da água. Além disso, a alcalinidade por hidróxidos em águas naturais muitas vezes é proveniente de resíduos industriais que utilizam substâncias como soda cáustica e cal hidratada (CETESB, 2023). A dissolução de minerais carbonáticos, como calcita e dolomita, também pode aumentar a alcalinidade da água (Hem, 1985).

O nitrogênio é encontrado na água de diversas formas: nitrato, nitrito, amônio e compostos nitrogenados, como ureia e aminoácidos. O nitrogênio atmosférico também se dissolve na água e pode ser fixado por alguns microorganismos (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Nas regiões tropicais, os lagos geralmente apresentam baixas concentrações de nitrato, pois os solos são pobres neste composto. No entanto, a fertilização do solo e o despejo de esgotos domésticos podem elevar a concentração deste nutriente, aumentando assim o processo de eutrofização (Smith, 2003; Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Com relação ao nitrito, normalmente a concentração é baixa (abaixo de 60 μg

$\text{N-NO}_2^-/\text{L}$), sendo difícil detectá-lo. Ele pode ser aumentado em situações onde a concentração de oxigênio for menor que $1 \text{ mg O}_2/\text{L}$ (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008). O amônio também é encontrado em baixas concentrações em águas naturais (abaixo de $100 \text{ } \mu\text{g N-NH}_4^+/\text{L}$) mas pode atingir valores maiores (de 1 a $2 \text{ mg N-NH}_4^+/\text{L}$) em situações de anoxia, pela redução do nitrato a amônio (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

Outro nutriente que pode estar presente nas águas é o fósforo. O fósforo na forma de fosfato pode ser proveniente da lixiviação de minerais, como a apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$). Também ocorre reciclagem do fósforo por meio de decomposição e excreção de organismos aquáticos (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

O ciclo do fósforo relaciona-se ao ciclo do ferro, ao potencial redox e à interação com o sedimento. Em um ambiente redutor, o íon ferro (II) e o fosfato encontram-se dissolvidos no hipolímnio. Quando acontece a oxigenação deste ambiente, ocorre a oxidação para ferro (III) o que leva à precipitação do fosfato de ferro (III) no sedimento (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008).

A sílica também é um nutriente. A decomposição de silicatos de alumínio é a principal fonte de sílica para os corpos hídricos, que pode se apresentar de três formas: solúvel, na forma de SiO_4^{4-} ; coloidal; ou particulada, SiO_2 , podendo estar incorporada ao fitoplâncton ou na forma de quartzo, silicato e também adsorvida a substâncias orgânicas e inorgânicas (Esteves, 2011).

A sílica solúvel - também chamada de reativa - é a forma que é assimilada por organismos, como as diatomáceas, para a formação de carapaça, na qual passa a ser denominada sílica biogênica, na forma de SiO_2 (Esteves, 2011).

A distribuição vertical de sílica nos lagos tropicais nos períodos de estratificação tende a ser pobre no epilímnio e rica no hipolímnio. Já nos períodos de homotermia, a distribuição pode ser homogênea, mas também pode apresentar redução na parte superior. No caso de lagos eutróficos, porém transparentes, pode ocorrer floração de diatomáceas no metalímnio, levando à redução acentuada de sílica neste estrato (Esteves, 2011).

Em seguida, há ferro e manganês, comuns na crosta terrestre, por isso são encontrados em todos os corpos hídricos (Esteves, 2011). Suas concentrações aumentam em períodos chuvosos devido à drenagem dos solos e também como resultado de lançamento de efluentes industriais (CETESB, 2023).

Estes elementos apresentam número de oxidação que varia com as condições do meio, em especial com o potencial redox e o pH. Quando há oxigênio em toda a coluna d'água e o pH é levemente básico, o ferro encontra-se com nox igual a três, precipitado como hidróxido

($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ou fosfato (FePO_4); por conta disso, há pouco ferro dissolvido na coluna d'água, ocorrendo o mesmo com o manganês (Esteves, 2011).

Já em condições de baixa concentração de oxigênio e baixo potencial redox, que podem ocorrer no hipolímnio, ferro e manganês encontram-se reduzidos (Fe^{2+} e Mn^{2+}) e solubilizados (Esteves, 2011), porém, se houver sulfeto suficiente, pode haver precipitação de FeS (Kalff, 2002).

Como mencionado anteriormente, são íons principais nas águas naturais sódio, potássio, magnésio, cálcio, cloreto e sulfato, além do bicarbonato, já discutidos. A concentração total destes íons é responsável pela salinidade das águas interiores (Kalff, 2002).

O sódio está presente naturalmente nas águas devido à sua abundância na Terra e à alta solubilidade de seus sais. A quantidade de sódio nas águas superficiais é influenciada pelas características geológicas da bacia hidrográfica, variando de 1 a 10 mg/L, sendo afetada também pela descarga de efluentes domésticos e industriais, o que pode elevar a concentração até 50 mg/L (CETESB, 2023).

O potássio ocorre em baixas concentrações nas águas naturais devido à resistência das suas rochas ao intemperismo, sendo encontrado geralmente em concentrações inferiores a 10 mg/L. No entanto, sais de potássio são amplamente utilizados na indústria e em fertilizantes agrícolas, o que contribui para sua presença nas águas através de efluentes industriais e drenagem de áreas cultivadas (CETESB, 2023).

O cálcio presente nas águas superficiais é proveniente de rochas que contêm minerais de cálcio, principalmente carbonatos (como o calcário, CaCO_3) e sulfatos (como a gipsita, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sendo que a chuva ácida pode intensificar a liberação de cálcio do solo para as águas subterrâneas. As concentrações naturais de cálcio na água geralmente são inferiores a 15 mg/L, porém em regiões com rochas ricas em carbonato, os níveis podem variar de 30 a 100 mg/L. Como influência antrópica, há processos de tratamento de água e efluentes que utilizam cal, contribuindo para aumentar os níveis de cálcio na água (CETESB, 2023).

O magnésio das águas naturais é oriundo especialmente de rochas carbonáticas e minerais ferromagnesianos. Sua concentração varia bastante conforme os tipos de rochas encontradas na bacia hidrográfica, sendo encontrado de 1 mg/L a mais de 100 mg/L. Há pouca influência antrópica na quantidade de magnésio encontrado nas águas superficiais (CETESB, 2023).

O cloreto também é procedente da drenagem de solos e rochas. Esgotos domésticos contribuem bastante com a concentração deste íon pois cada pessoa elimina cerca de 4 g de cloreto por dia pela urina; isso resulta em concentrações de cloreto nos esgotos que podem

exceder 15 mg/L. Por conta disso, o cloreto era usado como indicador de contaminação por esgoto sanitário, mas atualmente utiliza-se testes de coliformes termotolerantes para essa finalidade (CETESB, 2023).

Com relação ao enxofre, as principais fontes para os corpos hídricos são a dissolução de rochas, chuva e a drenagem de solos agrícolas fertilizados. O enxofre pode se apresentar de diversas formas, sendo o sulfato (SO_4^{2-}) e o gás sulfídrico (H_2S) as mais comuns (Esteves, 2011).

O gás sulfídrico é formado pela decomposição de compostos orgânicos sulfurosos, como alguns aminoácidos, especialmente por bactérias saprofíticas, que são encontradas em abundância no sedimento de lagos eutrofizados. O gás sulfídrico também pode ser formado pela redução biológica de sulfato em condições anaeróbicas; nestas condições, há acúmulo do gás no hipolímnio, o que torna essa região nociva aos organismos aquáticos. Já na presença de oxigênio, o gás sulfídrico oxida-se quimicamente a enxofre e biologicamente a sulfato (Esteves, 2011).

A concentração de sulfato é baixa ($< 1 \text{ mg/L}$) em represas brasileiras de regiões com ausência de rochas sulfatadas e sem influência marítima. Contudo, nas mesmas condições, porém sujeitos à contaminação por esgotos, os valores podem ser superiores a 20 mg/L (Esteves, 2011).

O sulfato também pode ser proveniente de chuva ácida, que ocorre quando dióxido de enxofre proveniente da queima de combustíveis fósseis atinge a atmosfera e interage com a água formando ácidos sulfúrico e sulfuroso (Esteves, 2011).

Finalmente, há os elementos traços. O flúor, na forma de fluoreto, é encontrado em baixas concentrações nas águas naturais, sendo mais elevadas em águas subterrâneas. Em bacias hidrográficas ricas em minerais de flúor ou em depósitos geológicos de origem marinha, podem ocorrer concentrações de até 10 mg/L (CETESB, 2023).

Embora o alumínio seja o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, sua concentração em águas naturais geralmente não ultrapassa décimos ou centésimos de miligramas por litro (Hem, 1985). O alumínio pode entrar na atmosfera na forma de partículas devido à suspensão de poeira do solo e à queima de carvão, retornando à superfície pela chuva (CETESB, 2023).

Na água, este metal pode existir em várias formas, variando com pH, temperatura e pela presença de fluoretos, sulfatos, matéria orgânica e outros compostos ligantes. A solubilidade do alumínio é fortemente controlada pelo pH, sendo que em pH 6,5, seu limite de solubilidade é de 20 $\mu\text{g/L}$, enquanto em pH 5 pode ultrapassar 1000 $\mu\text{g/L}$; ou seja, a

acidificação dos corpos d'água pode mobilizar o metal a partir de minerais, solos e partículas suspensas. Já um aumento do pH pode levar à sua precipitação (Rodriguez *et al.* 2019).

A concentração de alumínio está relacionada ao regime de chuvas, aumentando no período chuvoso e diminuindo gradualmente conforme o tempo fica mais seco. Quanto à distribuição vertical, o alumínio tende a acumular-se no hipolímnio por conta do menor pH e menor concentração de oxigênio (CETESB, 2023).

O cobre ocorre naturalmente nos seres vivos, sendo um nutriente essencial em baixas doses, porém é tóxico em doses elevadas. Situação parecida acontece com o zinco, geralmente encontrado abaixo de 10 µg/L em águas superficiais naturais. Destaca-se ainda o cromo, que é um micronutriente na forma trivalente, mas tóxico na forma hexavalente, também encontrado abaixo de 10 µg/L em águas superficiais naturais (CETESB, 2023).

Outros metais, como cádmio, chumbo e mercúrio, podem se acumular nos organismos aquáticos e são tóxicos aos seres vivos. Todos estes podem ter sua concentração no ambiente acentuada por diversas atividades antrópicas (CETESB, 2023).

3.3 ÍNDICES E LEGISLAÇÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os índices de qualidade da água desempenham um papel fundamental na comunicação com a sociedade, pois transformam dados técnicos em informações sintéticas e compreensíveis para o público em geral.

O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi desenvolvido a partir de um estudo da National Sanitation Foundation, dos Estados Unidos, em 1970. A CETESB adaptou esse índice, que começou a ser utilizado em 1975 para avaliar a qualidade das águas no estado de São Paulo, com foco principal em sua adequação para o abastecimento público. Hoje este índice é utilizado em vários estados brasileiros, podendo apresentar adaptações em cada estado (CETESB, 2023; IGAM 2023).

O cálculo do IQA é feito através de um produto ponderado (Equação 13), onde cada variável tem um peso que reflete sua importância relativa para a qualidade da água (Figura 15). O resultado final é um número que pode variar entre 0 e 100, sendo classificado em diferentes faixas que indicam a qualidade da água, variando entre os estados (Tabela 1).

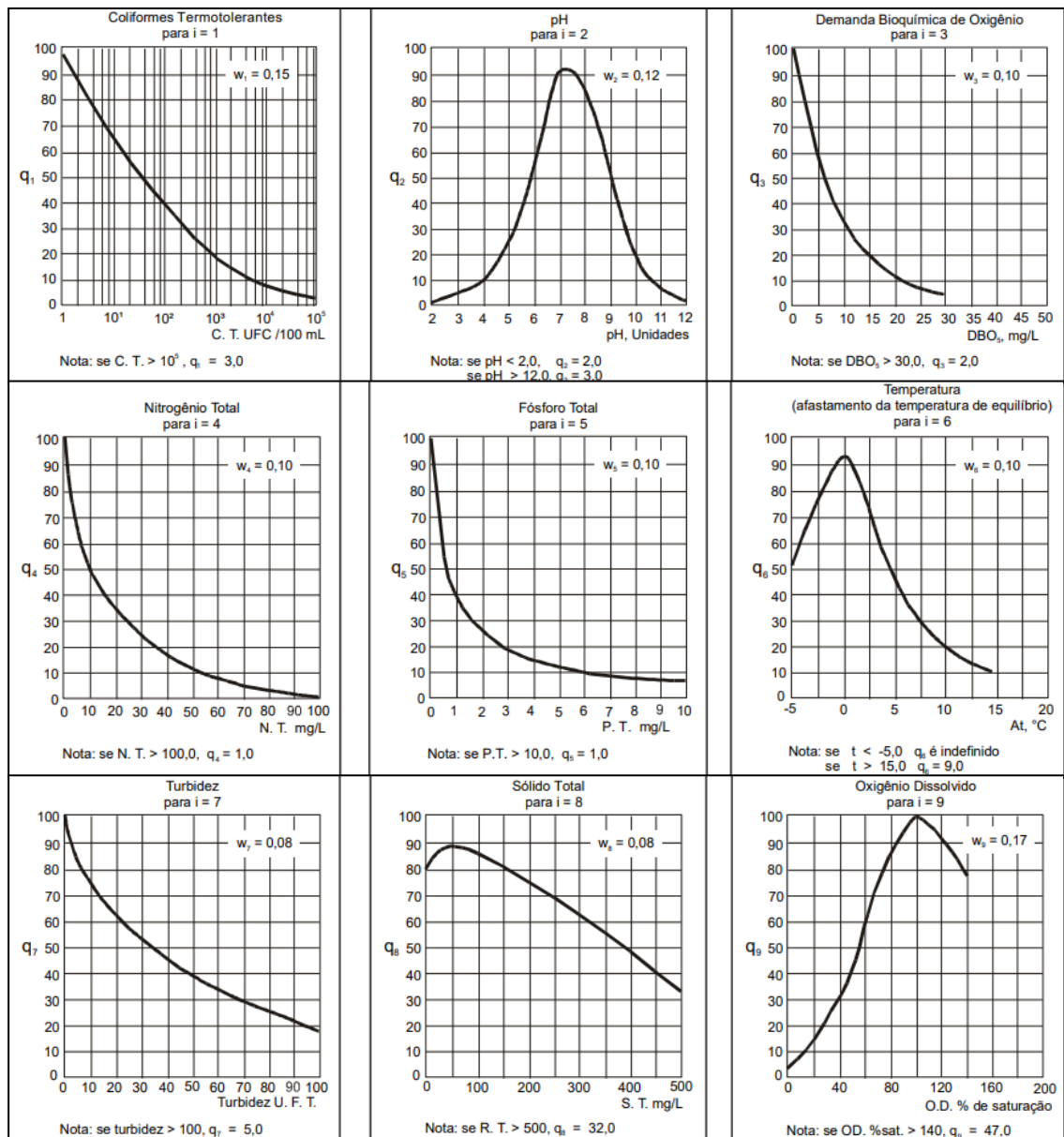
$$IQA = \sum_{i=1}^n q_i \cdot w_i, \quad (13)$$

onde, IQA: Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;

q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua medida;
 w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1;
 n : número de variáveis do cálculo do IQA.

Embora seja uma ferramenta útil e amplamente adotada em diversos estados brasileiros, o IQA apresenta algumas limitações, pois não leva em consideração a presença de substâncias tóxicas, como metais pesados, pesticidas e compostos orgânicos, que podem ser prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

Figura 15 – Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas



Fonte: CETESB (2023).

Tabela 1 – Classes do IQA para os estados de São Paulo e Minas Gerais

MG		SP	
Classes	Valor do IQA	Classes	Valor do IQA
Excelente	$90 < IQA \leq 100$	Ótima	$79 < IQA \leq 100$
Bom	$70 < IQA < 90$	Boa	$51 < IQA \leq 79$
Médio	$50 < IQA < 70$	Regular	$36 < IQA \leq 51$
Ruim	$25 < IQA < 50$	Ruim	$19 < IQA \leq 36$
Muito ruim	$IQA \leq 25$	Péssima	$IQA \leq 19$

Fonte: Adaptada de CETESB (2023) e IGAM (2023).

O fósforo é um nutriente essencial para processos biológicos, então sua concentração influencia o desenvolvimento de algas e plantas aquáticas. Por conta disso, o fósforo é uma variável para o cálculo do Índice de Estado Trófico (IET), juntamente com a clorofila, conforme as equações 14, 15, 16. Basicamente, o fósforo pode ser entendido como a causa da eutrofização, enquanto a clorofila é o efeito. A classificação do estado trófico conforme este índice e as concentrações correspondentes são apresentadas na Tabela 2 (Lamparelli, 2004; CETESB, 2023).

$$IET_{CL(reservatórios)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{0,92 - 0,34 (\ln CL)}{\ln 2} \right] \right\}, \quad (14)$$

$$IET_{PT(reservatórios)} = 10 \left\{ 6 - \left[\frac{1,77 - 0,42 (\ln PT)}{\ln 2} \right] \right\}, \quad (15)$$

$$IET = (IET_{CL} + IET_{PT}) / 2, \quad (16)$$

Onde, PT: concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg/L;

CL: concentração de clorofila medida à superfície da água, em µg/L.

Tabela 2 – Classificação do Estado Trófico para reservatórios

Estado trófico	IET	Fósforo Total (mg/m³)	Clorofila (mg/m³)
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$	$P \leq 8$	$CL \leq 1,17$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$	$8 < P \leq 19$	$1,17 < CL \leq 3,24$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	$19 < P \leq 52$	$3,24 < CL \leq 11,03$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	$52 < P \leq 120$	$11,03 < CL \leq 30,55$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	$120 < P \leq 233$	$30,55 < CL \leq 69,05$
Hipereutrófico	$IET > 67$	$233 < P$	$69,05 < CL$

Fonte: Adaptado de CETESB (2023) e IGAM (2023).

O índice de qualidade da água canadense (CCME WQI, *Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index*), chamado Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) no Brasil, é um índice de qualidade da água utilizado para indicar a condição de conformidade da qualidade da água de um corpo hídrico em relação aos padrões estabelecidos pela legislação. O ICE se baseia na comparação dos valores dos dados de

monitoramento da qualidade da água com os parâmetros legislativos. É necessário definir no mínimo quatro parâmetros de qualidade da água e ter pelo menos quatro dados de monitoramento para cada parâmetro ao longo do período de estudo (CCME, 2017; Silva, 2017).

O ICE é composto por três fatores: abrangência do impacto causado pela desconformidade (F1), frequência das desconformidades (F2) e amplitude das variações dos parâmetros de qualidade da água (F3), conforme demonstrado a seguir (CCME, 2017; Silva, 2017).

$$F_1 = \frac{\text{quantidade de variáveis que violaram os limites da legislação pelo menos uma vez}}{\text{quantidade total de variáveis analisadas}} \cdot 100. \quad (17)$$

$$F_2 = \frac{\text{quantidade de testes que violaram os limites da legislação}}{\text{quantidade total de testes realizados}} \cdot 100. \quad (18)$$

Para o cálculo do terceiro fator (amplitude), primeiramente é necessário calcular cada variação (Δv), para posterior soma normalizada destas variações (snv) e assim o determinar F3. Tem-se:

- no caso de parâmetro que não deve ultrapassar um valor máximo:

$$\Delta v = \frac{\text{valor do teste que falhou}}{\text{valor do padrão}} - 1; \quad (19)$$

- no caso de parâmetro que não deve ser inferior a um valor mínimo:

$$\Delta v = \frac{\text{valor do padrão}}{\text{valor do teste que falhou}} - 1; \quad (20)$$

$$\text{Então: } snv = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta v_i}{\text{quantidade total de testes realizados}}. \quad (21)$$

$$F_3 = \frac{snv}{(0,01 \cdot snv) + 0,01}. \quad (22)$$

$$\text{Finalmente: } ICE = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right). \quad (23)$$

A divisão por 1,732 é realizada para normalizar o termo da raiz quadrada no valor máximo de 100, garantindo assim que o menor valor de ICE possível seja zero:

$$\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2} = \sqrt{100^2 + 100^2 + 100^2} = 173,2.$$

Os resultados do ICE podem ser classificados em diferentes categorias de qualidade, que variam de "Excelente" a "Ruim", conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes de qualidade do ICE

Classe	Valores	Interpretação
Excelente	95 - 100	Os parâmetros estiveram muito próximos dos níveis naturais ou desejados.
Bom	80 - 94	Os parâmetros raramente se afastaram dos níveis naturais ou desejados.
Mediano	65 - 79	Os parâmetros às vezes se afastaram dos níveis naturais ou desejados.
Ruim	45 - 64	Os parâmetros muitas vezes se afastaram dos níveis naturais ou desejados.
Muito ruim	0 - 44	Os parâmetros quase sempre se afastaram dos níveis naturais ou desejados.

Fonte: Adaptado de CCME (2017) e Silva (2017).

A principal legislação federal sobre a qualidade das águas é a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, além de definir condições e padrões de lançamento de efluentes. No âmbito estadual, há Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG Nº 8, de 21 de novembro de 2022.

Na legislação federal e estadual, as águas doces são divididas em cinco classes: classe especial e classes 1 a 4. Quando não há enquadramento aprovado para um corpo hídrico, como é o caso do ribeirão das Antas, ele é considerado classe 2, que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000, ou norma que a substitua;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto;
- e) à aquicultura e à atividade de pesca (Brasil, 2005; MINAS GERAIS, 2022).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Foi realizada revisão da literatura para caracterização da área de estudo e levantamento de possíveis influências geogênicas e antropogênicas na composição das águas. Além disso, pesquisou-se material técnico e cartográfico sobre a área de estudo com a finalidade de caracterizar a bacia hidrográfica do reservatório Bortolan e assim produzir cartas temáticas sobre o local.

A bacia hidrográfica de estudo foi delimitada com dados da Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA (Brasil, 2022), com o exutório ajustado para coincidir com o vertedouro da represa Bortolan, por meio da análise do modelo digital de elevação obtido pela SRTM (NASA, 2013), utilizando o plugin GRASS no *software* QGIS versão 3.34.11.

O mapa de uso e cobertura do solo foi produzido a partir de dados do Projeto MapBiomass (2024), acrescido de informações sobre áreas urbanizadas (IBGE, 2019), áreas industriais (Google, 2024), corpos hídricos (Brasil, 2019b; Brasil 2022), rodovias e ferrovias (IBGE, 2023), locais de disposição de resíduos sólidos urbanos (IDE-SISEMA, 2022), estações de tratamento de esgotos (Brasil, 2019a) e estações elevatórias de esgoto (DMAE, 2013).

Além disso, o QGIS foi utilizado para medição dos parâmetros morfométricos (área, perímetro, eixo principal, largura média, eixo do canal principal, comprimento do canal principal, comprimento da rede de drenagem e dos canais por ordem) para o cálculo dos índices morfométricos (densidade de drenagem, índice de sinuosidade do canal principal, fator de forma, coeficiente de compacidade e índice de circularidade).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO

Foi realizada pesquisa bibliográfica para localizar estudos anteriores sobre o reservatório Bortolan, bem como estudos sobre as características das águas do planalto de Poços de Caldas.

Para delimitação do reservatório foi necessário realizar edições manuais sobre os limites do reservatório definidos na carta topográfica do IBGE (1972) no *software* QGIS versão 3.34.11, pois verificou-se que a dinâmica fluvial da represa alterou-se substancialmente ao longo do tempo. Para isso, utilizou-se imagens de satélite da plataforma Google e da base OpenStreetMap. Em seguida, foram medidos os parâmetros morfométricos

(área, perímetro e comprimento) no mesmo *software*. Os valores de volume e profundidade máxima foram levantados da literatura (Ferrari, 2010). A partir destes dados, foram calculados índices morfométricos (largura média, profundidade média, profundidade relativa, desenvolvimento de margem, desenvolvimento de volume e fator de envolvimento).

A localização dos pontos de amostragem foi realizada com equipamento de GPS (*Global Positioning System*) modelo Garmin GPSMAP 62S (precisão de ± 3 metros).

A coluna d'água em três pontos representativos do reservatório (região fluvial, intermediária e lacustre) foi caracterizada físico e quimicamente com leitura direta no local de amostragem utilizando medidor portátil Horiba modelo *U-50 Multiparameter Water Quality Checkers*, previamente calibrado, sendo medidas as seguintes variáveis em função da profundidade (Horiba, 2009):

- a) temperatura (termistor, de -10 a $55^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$);
- b) turbidez (fonte de luz LED, de $0,0$ a $800,0$ NTU $\pm 1,0$ NTU);
- c) condutividade elétrica (eletrodo 4AC, de $0,0$ a $100,0$ $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 0,1$ %);
- d) oxigênio dissolvido (método polarográfico, de $0,0$ a $50,0$ mg/L $\pm 0,2$ mg/L);
- e) pH (eletrodo de vidro, de $0,0$ a $14,0 \pm 0,1$ pH);
- f) potencial redox (eletrodo de platina, de -2000 a 2000 mV ± 15 mV).

Foram coletadas amostras em três níveis de profundidade em cada um dos pontos utilizando garrafa Van Dorn horizontal, armazenadas em vasilhames de polietileno e acondicionadas em isopor com gelo, para determinação das concentrações de sódio, potássio, cloreto, alcalinidade, fluoreto, sulfato, fosfato, nitrato, sílica, cálcio, magnésio, ferro, alumínio, cobre, manganês e níquel.

As amostras foram filtradas a vácuo com membranas com poros de $0,45$ μm como preparo para determinação do teor dissolvido dos componentes listados adiante. Além disso, foi realizada digestão com ácido nítrico concentrado P.A. para determinação de metais.

Os teores de sódio e potássio foram determinados com Fotômetro de Chama MOD. 910 MS (padrão de Na^+ e K^+ de 20 ppm ou 100 ppm) resolução de $1,0 \pm 0,1$ ppm (Analyser, 2010).

O fotômetro multiparâmetro Hanna HI83300 foi utilizado para determinação de alcalinidade (método colorimétrico 610 nm, de 0 a 300 ± 3 mg/L HCO_3^-) e cloreto (método de tiocianato de mercúrio (II), de $0,0$ a $20,0 \pm 0,5$ mg/L) (Hanna, 2020).

As demais concentrações foram obtidas com espectrofotômetro modelo DR 890 da Hach Company (Hach, 2013), sendo:

- a) Alumínio - método do Aluminon, de $0,013$ a $0,80 \pm 0,013$ mg/L;

- b) Cálcio - método da calmagita colorimétrica, de 0,03 a $1,60 \pm 0,03$ mg/L;
- c) Magnésio - método da calmagita colorimétrica, de 0,03 a $0,97 \pm 0,02$ mg/L;
- d) Cobre - método do bicinconinato, 0,02 a $5,00 \pm 0,02$ mg/L;
- e) Ferro II - método da orto-fenantrolina, de 0,03 a $3,00 \pm 0,017$ mg/L;
- f) Ferro total - método da orto-fenantrolina, de 0,03 a $3,00 \pm 0,017$ mg/L;
- g) Fluoreto - método SPADNS 2, de 0,05 a $2,0 \pm 0,035$ mg/L;
- h) Fosfato - método do ácido ascórbico, de 0,05 a $2,50 \pm 0,05$ mg/L;
- i) Manganês - método PAN (1-(2-Piridilazo)-2-Naftol), 0,020 a $0,700 \pm 0,013$ mg/L;
- j) Nitrato - método de redução de cádmio, de 0,5 a $30,0 \pm 0,3$ mg/L;
- k) Níquel - método PAN, 0,013 a $1,000 \text{ mg/L} \pm 0,008$ mg/L;
- l) Sílica - método Silicomolibdato, de 1,0 a $75,0 \pm 1,0$ mg/L;
- m) Sulfato - método turbidimétrico de sulfato de bário, de 4,9 a $70,0 \pm 0,9$ mg/L.

O balanço de carga foi utilizado para avaliar os resultados analíticos de composição de águas naturais, pois se pressupõe uma condição de eletroneutralidade nas soluções (Equação 7). Os desvios desta condição são expressos pela Equação 8 (Freeze; Cherry, 1979).

$$\sum z. M_c = \sum z. M_a, \quad (24)$$

$$E_{\%} = \frac{\sum z. M_c - \sum z. M_a}{\sum z. M_c + \sum z. M_a} \cdot 100, \quad (25)$$

Onde, z: valência iônica;

M_c : molaridade das espécies catiônicas;

M_a : molaridade das espécies aniônicas;

$E_{\%}$: erro do balanço de carga ou variabilidade iônica.

A análise estatística foi elaborada nos softwares Past 4.17 e Jamovi 2.3.28. A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk. A correlação entre as variáveis foi analisada pelos coeficientes de Pearson e Spearman. Os dados foram agrupados entre coletas, profundidade e local. Para a comparação entre grupos, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, um teste estatístico não paramétrico. Também foi utilizada a análise de agrupamento (*clusters*) para agrupar os dados. A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e verificar quais parâmetros são mais relevantes para explicar a variância das observações.

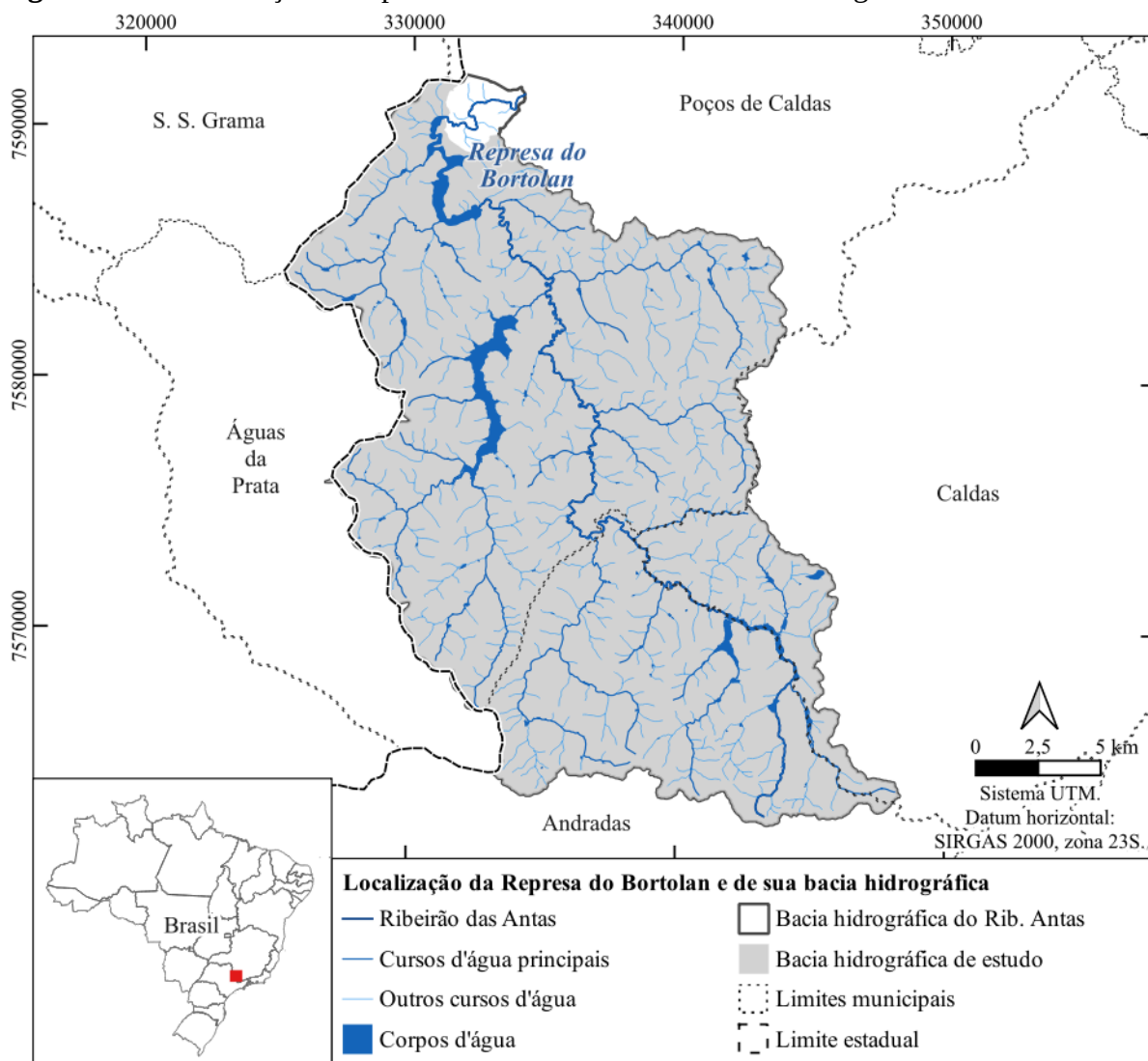
Além disso, foram utilizadas ferramentas gráficas para análises dos resultados. O

diagrama de Gibbs foi construído no *software* Calc do pacote LibreOffice 24.2 e o diagrama de Piper foi construído no *software* Qualigraf v 1.1, ambos com dados das águas superficiais. Ainda com os dados superficiais, foram calculados os valores do ICE para cada ponto.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Bortolan é formado pelo represamento do ribeirão das Antas, localizado a cerca de 3 km do exutório da bacia das Antas, sendo que a área de drenagem que converge para o reservatório corresponde a 98% da bacia hidrográfica. Geograficamente, a bacia localiza-se nos municípios de Andradas, Caldas e Poços de Caldas, na região sul de Minas Gerais, no limite com o estado de São Paulo (Figura 16).

Figura 16 – Localização da represa do Bortolan e de sua bacia hidrográfica



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022) e IBGE (2023).

A delimitação da bacia das Antas varia conforme o autor, com Christofolletti (1979) apresenta uma área de 423 km² enquanto Alberti (2008) apresenta uma área de 455 km², considerando o exutório na Cascata das Antas. No presente trabalho, optou-se pela delimitação da ANA, com o exutório na confluência com o ribeirão dos Poços, resultando na

área de 371,8 km².

Segundo a delimitação da ANA, que utiliza o sistema de Otto Pfafstetter, a bacia hidrográfica do ribeirão das Antas localiza-se na bacia do rio Lambari e corresponde a união das bacias do ribeirão das Vargens, Cipó, Tamanduá, alto, médio e baixo Antas, todas de nível 7, como apresentado na Figura 18. O ribeirão das Antas se une ao ribeirão dos Poços para formar o rio Lambari (nível 6), um afluente do alto rio Pardo (nível 5), sendo uma subdivisão do rio Pardo (nível 4), que deságua no rio Grande (nível 3), contido na bacia do rio Paraná (nível 2), pertencente à bacia do rio da Prata (nível 1), conforme ilustrado na Figura 17.

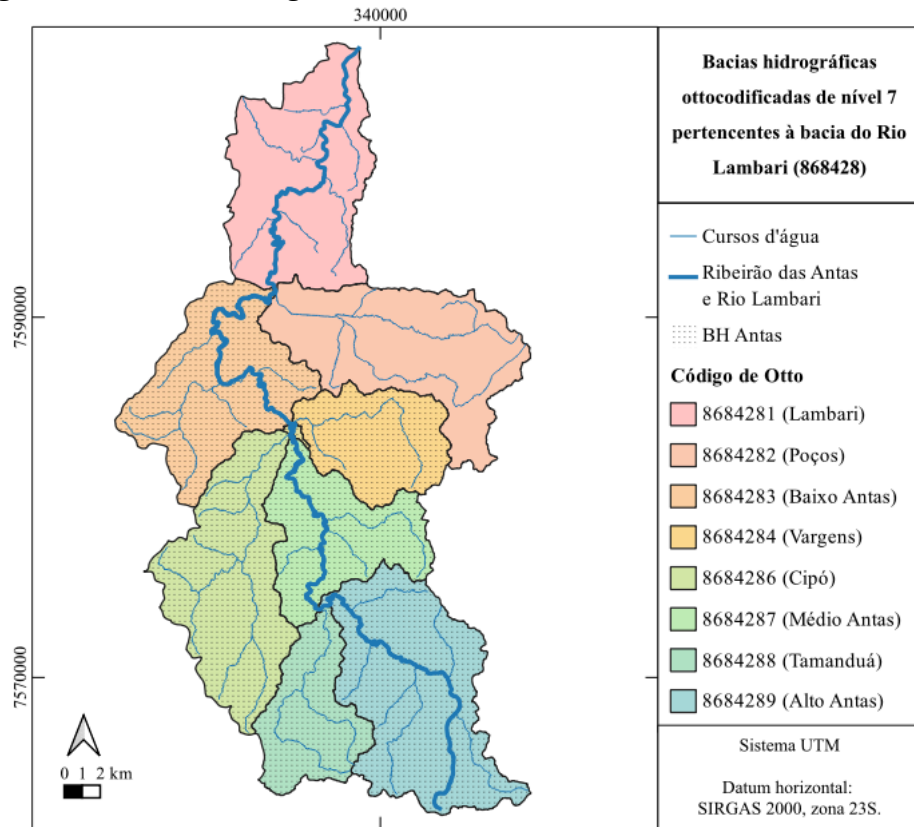
Figura 17 – Localização da bacia hidrográfica do Lambari (nível 6) nas bacias de Otto de nível sucessivamente superior



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022).

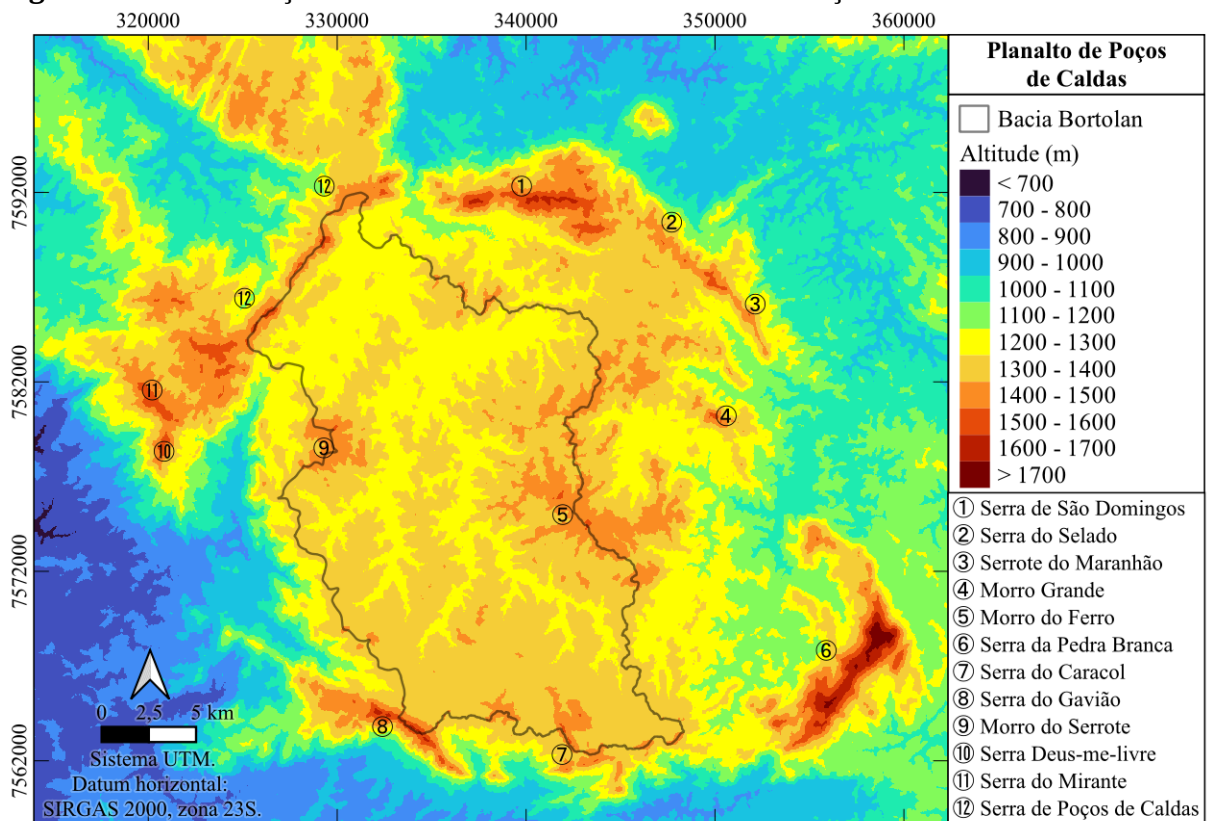
Do ponto de vista geomorfológico, a bacia hidrográfica do Bortolan está inserida no Planalto de Poços de Caldas, um maciço alcalino de formato elíptico, com 35 km de extensão na direção NE-SW e 30 km na direção NW-SE, totalizando aproximadamente 800 km² (Ellert, 1959). A altitude do planalto varia significativamente, oscilando entre 1.200 metros e mais de 1.600 metros em alguns pontos, como a Serra de São Domingos, a Serra do Gavião e a Serra da Pedra Branca, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 18 – Bacia hidrográfica do rio Lambari e suas bacias de nível 7 de Otto



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022).

Figura 19 – Localização da bacia do Bortolan no Planalto de Poços de Caldas



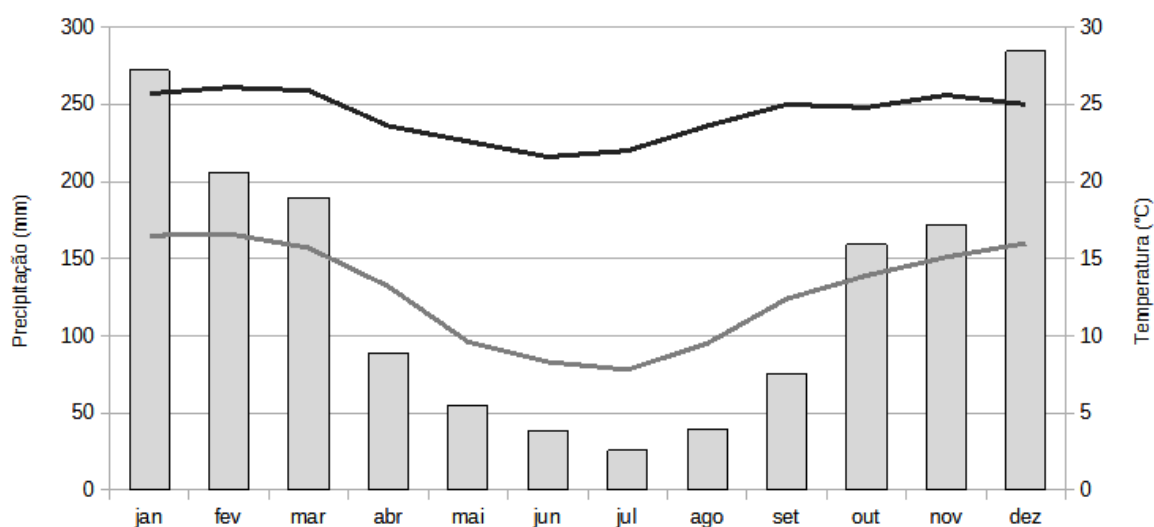
Fonte: A autora com dados de Brasil (2022), IBGE (1972) e NASA (2013).

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas é uma área ímpar, conforme bem resumido por Souza *et al.* (2013, p. 64) pois:

É o maior complexo alcalino do Brasil e uma das maiores ocorrências de magmatismo alcalino registradas no mundo [...]. É interpretado como resultante do colapso de uma cratera vulcânica (Grohmann; Riccomini; Alves, 2007) datada do Mesozoico-Cenozoico (Moreira; Almeida-Filho; Câmara, 2003), e está encaixado em rochas metamórficas arqueanas (gnaisses, migmatitos e granulitos). Também é onde se encontra a maior anomalia radioativa natural encontrada na crosta terrestre (Morro do Ferro).

Como consequência da altitude, o clima do o planalto de Poços de Caldas é do tipo Cwb no Sistemas de Classificação Climática de Köppen, ou seja, mesotérmico (temperado quente ou subtropical) com seca no inverno e verão temperado, conforme levantamento realizado por Martins *et al.* (2018). O padrão climático está representado na Figura 20.

Figura 20 – Climograma para o Planalto de Poços de Caldas de 1961 a 1985, com precipitação, temperaturas mínima e máxima



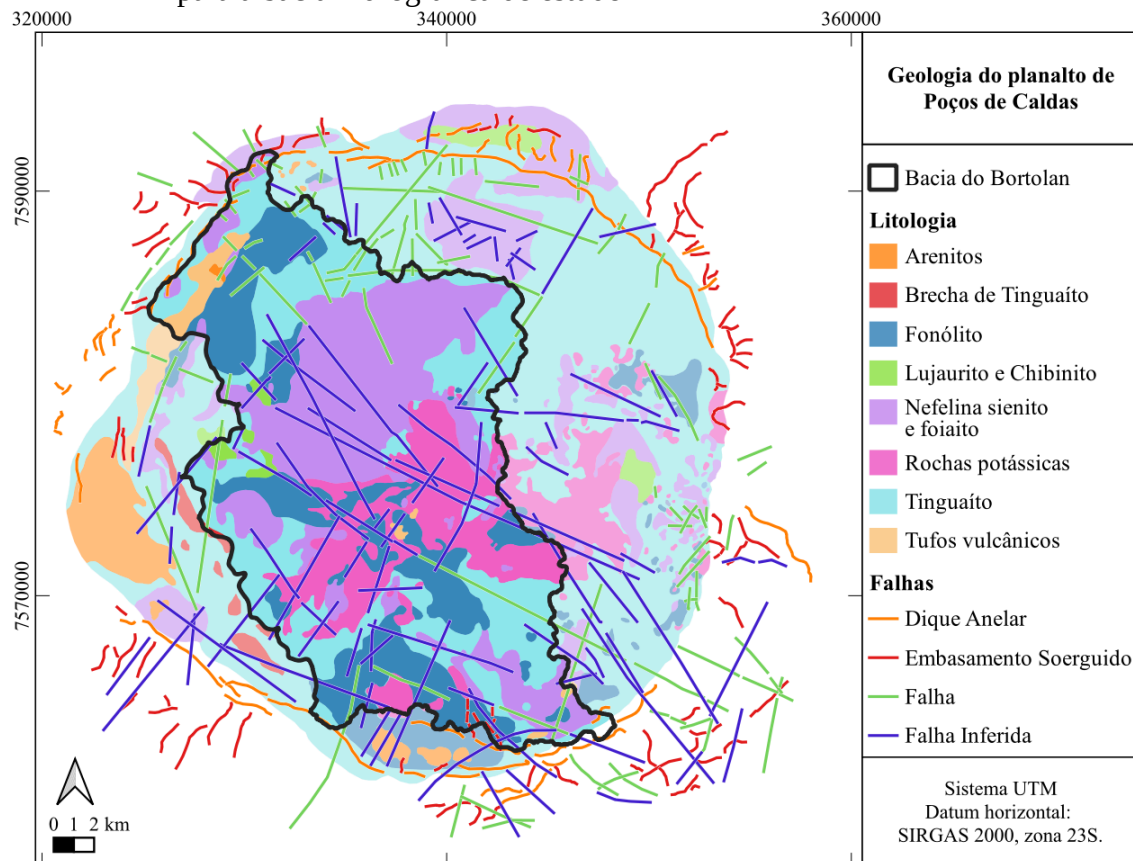
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de Costa, Carmo e Delgado (2001).

Diversos estudos geológicos foram realizados no planalto de Poços de Caldas. Convém destacar que os tipos de rochas mais frequentes são foiaítos, tinguaitos e fonólitos (Figura 21), que apresentam composição química semelhante, distinguindo-se pela granulação. Quanto à composição mineral, há anortoclásio ((Na,K)AlSi₃O₈), sanidina ((K,Na)(Al,Si)₄O₈), nefelina ((Na,K)AlSiO₄) e egrina (NaFeSi₂O₆); existem também minerais acessórios, como analcita (NaAlSi₂O₆·H₂O), titanita (CaTiSiO₅), magnetita (Fe₃O₄), cancrinita ((Na,Ca,K)₆₋₈Al₆Si₆O₂₄·(CO₃,SO₄,Cl)₁₋₂·1-5H₂O), fluorita (CaF₂) e zircão (ZrSiO₄) (Costa; Carmo; Delgado, 2001).

Além disso, no planalto de Poços de Caldas ocorre a "Rocha Potássica", um tipo de foiaito com mais potássio do que o usual. Enquanto o foiaito inalterado tem entre 7 e 8% de

K_2O , a "Rocha Potássica" tem de 10 a 14% de K_2O e menos de 1% de Na_2O . Estudos mostram que o aumento de potássio nesta rocha também é causado pelo intemperismo, pois abaixo de 50 metros, a concentração de potássio diminui e a de sódio aumenta (Costa; Carmo; Delgado, 2001).

Figura 21 – Mapa geológico da caldeira vulcânica de Poços de Caldas (MG), com destaque para a bacia hidrográfica de estudo



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de Chapman *et al.* (1991), Ellert (1959) e Schorscher e Shea (1992 *apud* Sardinha; Godoy, 2020).

5.1 POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS GEOGÊNICAS

Valeton *et al.* (1997) investigaram a alteração supérgena das rochas alcalinas em bauxitas e saprólitos da caldeira vulcânica, e concluíram que: a perda de magnésio, cálcio, sódio e potássio é quase total; menos completa no caso de manganês, alumínio, ferro, fósforo e titânio; sendo parte do silício incorporado em Al-goethita; e há lixiviação acentuada de níquel, cobalto, cobre, zinco, rubídio, bário, estrôncio, ítrio, lantânio e neodímio.

Estudos sobre intemperismo foram feitos na sub-bacia do córrego Ariranha por Sardinha *et al.* (2018) e Mello *et al.* (2022). Trata-se de uma área composta predominantemente por tinguaitos e rochas piroclásticas, onde o principal processo de

intemperismo químico identificado por Sardinha *et al.* (2018) é a monossilificação, uma reação de hidrólise de silicatos que leva à formação de argilominerais, sílica e íons, que são carregados pela drenagem (Teixeira *et al.*, 2000). Mello *et al.* (2022) descrevem as águas desta bacia como diluídas e pouco mineralizadas, tendo sódio e bicarbonato como íons majoritários.

No planalto de Poços de Caldas, há ocorrência de minerais de urânio e tório (Tolbert, 1966), o que motiva estudos para avaliar a presença destes elementos e seus produtos de decaimento nas águas. Os estudos realizados por Ferreira *et al.* (2022) e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (Brasil, 2021) avaliaram a presença de séries radioativas naturais nas estações de tratamento de água de Poços de Caldas e encontraram níveis seguros para consumo humano, de acordo com a legislação vigente, nas águas brutas e de abastecimento. As pequenas quantidades de radionuclídeos na água bruta são removidas durante a etapa de decantação devido ao carregamento pelos oxihidróxidos de ferro e manganês.

O radônio é um produto de decaimento do urânio. Em virtude disso, Moreira *et al.* (2018) determinaram a concentração de radônio em minas de água utilizadas pela população no Planalto de Poços de Caldas. As águas foram classificadas conforme o Código de Águas Minerais (Lei 7.841/1945), sendo 36% não radioativas, 28% fracamente radioativas e 36% radioativas. Esta grande diferença de concentrações foi atribuída a diferenças nas características das rochas percoladas pela água, bem como ao tempo de contato. Nenhuma das amostras foi considerada perigosa para o consumo humano.

Há diversos estudos sobre as águas de Poços de Caldas, conforme apresentados por Costa, Carmo e Delgado (2001), em uma revisão da literatura sobre a composição química destas águas a partir de amostragens não sistemáticas, em diferentes épocas do ano, cujos dados para as águas superficiais são apresentados na Tabela 4. Marques (2018) também fez um estudo dos mananciais de Poços de Caldas a partir de dados da empresa de saneamento no período de 2013 a 2017.

Um estudo mais detalhado da bacia do ribeirão das Antas foi realizado em 2012 pela Comissão das Águas da Câmara Municipal de Poços de Caldas. Na maioria dos locais amostrados, foram observadas elevadas concentrações de alumínio, ferro e manganês na água, o que os autores atribuem à abundância destes metais no Planalto de Poços de Caldas (Poços de Caldas, 2012).

Atualmente existem poucos estudos sobre nascentes ou cursos d'água de áreas de baixa influência antrópica no planalto de Poços de Caldas, o que permitiria estabelecer uma condição de referência para avaliar com mais precisão o nível de impacto de influências antropogênicas nas águas da região.

Tabela 4 – Principais parâmetros das águas superficiais de Poços de Caldas

Parâmetros	mínimo	máximo	média
pH	6,2	7,4	6,6
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	10,5	60	25,7
Ca^{2+} (mg/L)	0,16	8	2,14
Mg^{2+} (mg/L)	0,13	3,36	0,88
Na^{+} (mg/L)	0,26	0,91	0,64
K^{+} (mg/L)	1,19	2,27	1,53
HCO_3^{-} (mg/L)	6,10	18,30	11,48
Cl^{-} (mg/L)	0,70	2,2	1,65
Fe total (mg/L)	0,11	2,0	0,81
F^{-} (mg/L)	0,10	1,41	0,44

Fonte: Costa, Carmo e Delgado (2001, p. 45).

Como exemplo, existe um estudo sobre a condição de referência em pontos à montante da unidade de tratamento de minério das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) elaborado pelo Projeto Arcal (2009) que avaliou as concentrações de amônio, alumínio, manganês, ferro, fluoreto, nitrato, fósforo, sólidos dissolvidos e suspensos, DBO5, coliformes termotolerantes, pH, oxigênio dissolvido e condutividade. Outro estudo sobre *background* foi feito por Pereira (2017) em nascente na Serra de São Domingos, no qual foram avaliados pH, condutividade, turbidez, oxigênio dissolvido, sólidos (dissolvidos e suspensos) e fósforo total.

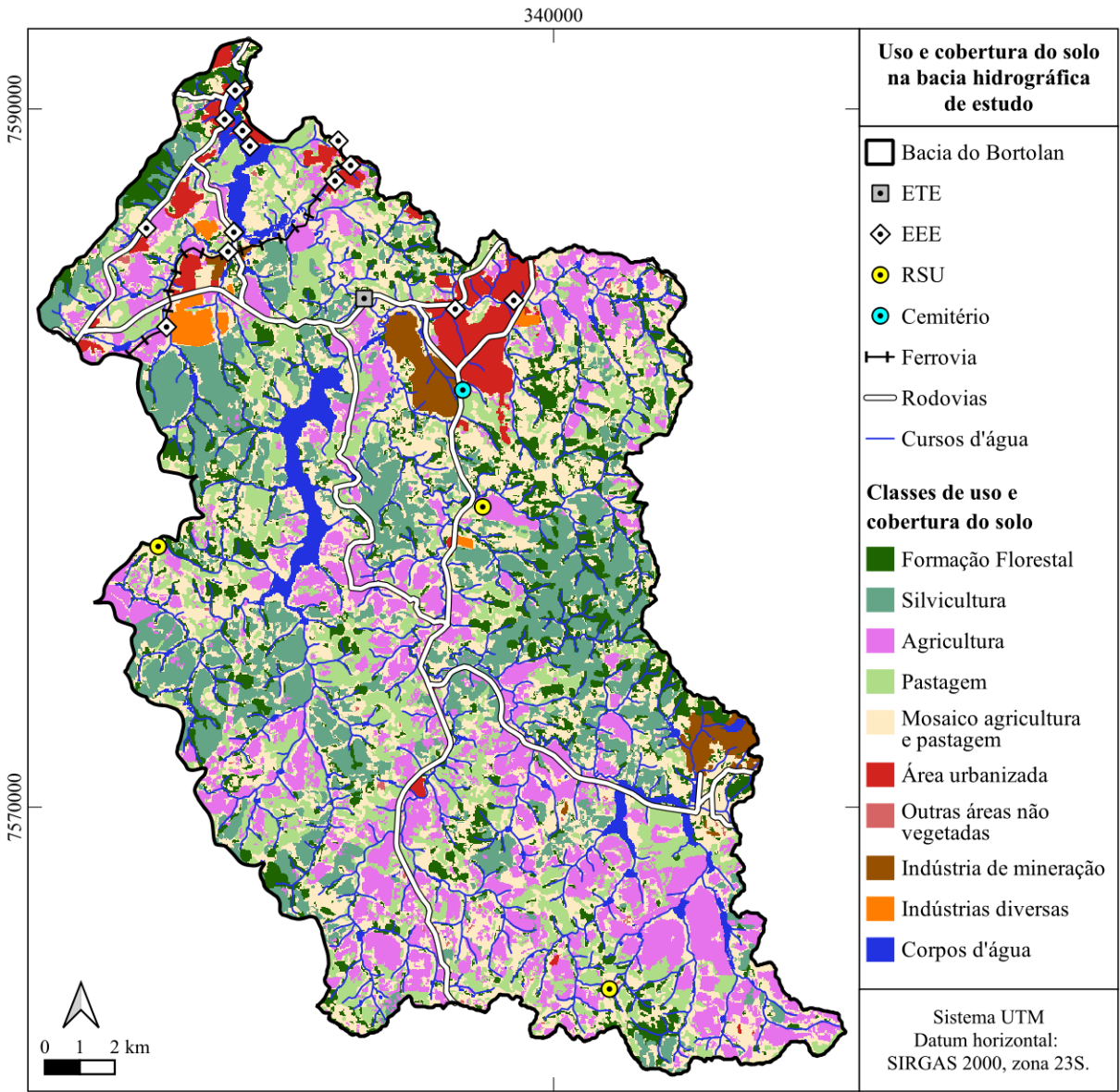
Alguns estudos em pequenas bacias hidrográficas sob baixa pressão antrópica do planalto de Poços de Caldas também podem ser utilizados como *background* para alguns parâmetros químicos e físico-químicos (íons principais, pH, condutividade, entre outros), como os estudos de Conceição (2024) sobre o córrego das Amoras e o estudo de Mello *et al.* (2022) sobre o córrego da Ariranha.

5.2 POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS ANTROPOGÊNICAS

O uso da terra na bacia do ribeirão das Antas compreende atividades industriais, urbanas e agrícolas, conforme apresentado na Figura 22 e Tabela 5. Todos estes usos em conjunto com processos geogênicos podem contribuir para a concentração de nutrientes e metais no reservatório Bortolan.

A maior parte do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica de estudo engloba agricultura e pastagem (63,9%). Os impactos da atividade agrícola foram verificados por Sardinha *et al.* (2019) ao monitorarem fósforo no exutório da sub-bacia do córrego Ariranha durante um ano hidrológico. Os autores verificaram que há um aumento na concentração deste elemento nas épocas de preparo de solos agrícolas, pela aplicação de fertilizantes.

Figura 22 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Bortolan



Fonte: A autora com dados de Brasil (2019a, 2019b, 2022), DMAE (2013), Google (2024), IBGE (2019, 2023); Minas Gerais (2022) e Projeto MapBiomias (2024).

Legenda: ETE - estação de tratamento de esgoto;
EEE - estação elevatória de esgoto;
RSU - resíduos sólidos urbanos.

Em seguida, a silvicultura ocupa 15,2% da área da bacia do Bortolan. Segundo Salgado e Magalhães Jr. (2006), a silvicultura de eucalipto está associada ao aumento das taxas de turbidez das águas fluviais, especialmente durante o corte das árvores, o que contribui para o assoreamento dos cursos d'água.

As indústrias de mineração ocupam 1,6% da bacia, área superior às demais indústrias (0,6%). As indústrias que ocupam a maior área são a Alcoa (produção de alumínio e derivados) e INB (mineração de urânio em fase de descomissionamento).

Tabela 5 – Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Bortolan

Classes de uso e ocupação do solo	Área (km ²)	Área (%)
Formação florestal	43,7	11,9
Silvicultura	55,4	15,2
Pastagem	54,8	15,0
Agricultura	65,3	17,9
Mosaico de agricultura e pastagem	113,6	31,1
Área urbanizada	12,5	3,4
Indústria de Mineração	6,0	1,6
Indústrias diversas	2,4	0,6
Outras áreas não vegetadas	0,5	0,1
Corpos d'água	11,5	3,1

Fonte: A autora com dados de Brasil (2019a, 2019b, 2022), DMAE (2013), Google (2024), IBGE (2019, 2023); Minas Gerais (2022) e Projeto MapBiomias (2024).

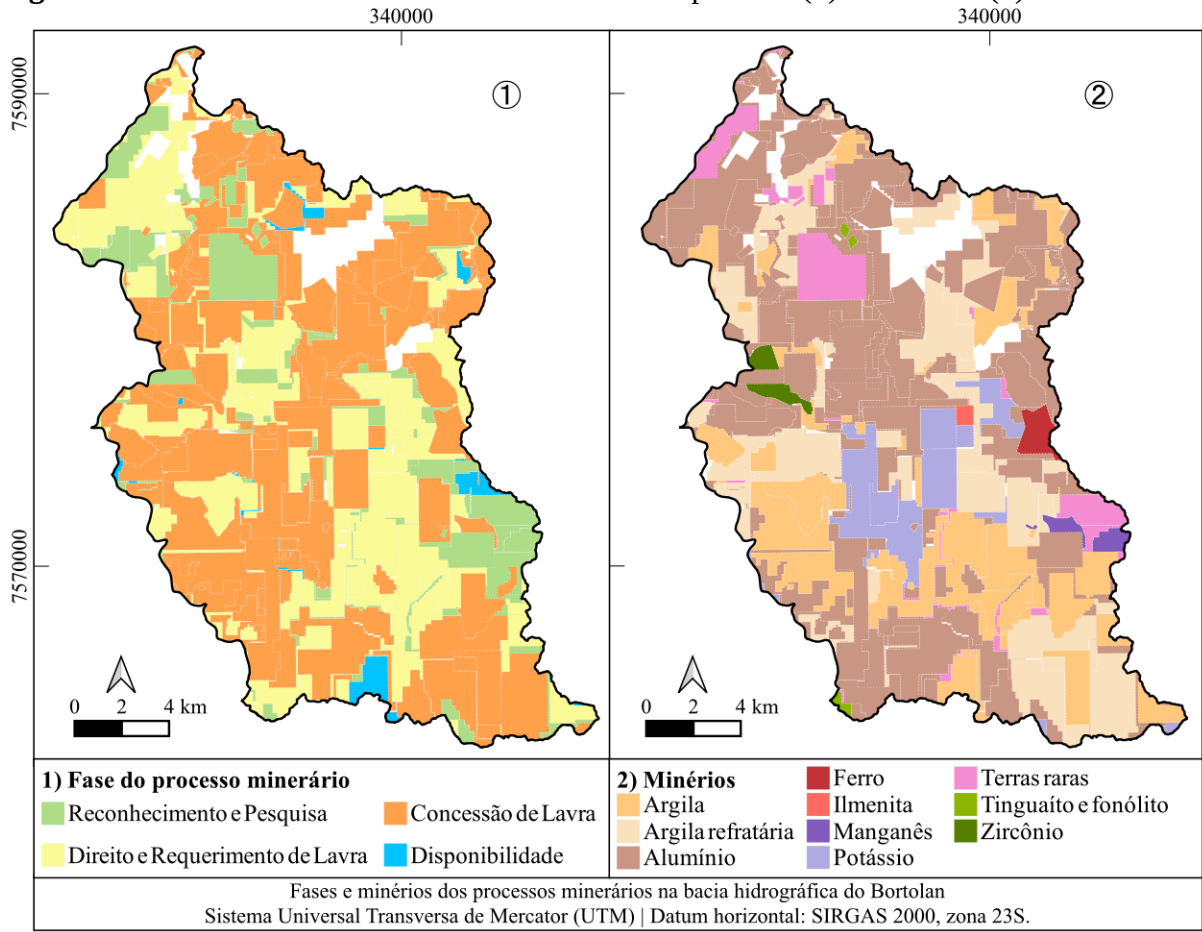
Além disso, existem grandes reservas minerais, onde há antigas e atuais áreas de mineração, além de várias áreas que já possuem licença para exploração, conforme apresentado na Figura 23.

No caso da bauxita, a mineração é realizada na área desde a década de 1940. A extração é normalmente realizada em pequenas covas com vida útil de 2 a 8 anos, em glebas de até 50 hectares e produção de minério entre 15.000 e 20.000 toneladas/mês (Melo e Sánchez, 2020).

Entre os impactos ambientais desta atividade, o estudo de Melo e Sanches (2020) em minas de bauxita reabilitadas em Poços de Caldas observou erosão do solo e sedimentação de córregos devido ao escoamento superficial. A mineração também provoca geração de poeira, que pode ser transportada pela atmosfera e alterar as águas pluviais. Estes impactos foram investigados por Sardinha *et al.* (2022) nas sub-bacias dos córregos Gigante e Chapadão, onde verificaram atenuação do transporte de sólidos suspensos pela cobertura vegetal nas redes de drenagem; no entanto, quanto à deposição atmosférica, foram encontrados valores acima de outras bacias da região do Planalto de Poços de Caldas.

A poluição atmosférica ocasionada pela mineração de bauxita afeta também outras sub-bacias da região, conforme observado por Mello *et al.* (2022) na sub-bacia do córrego Ariranha. Os autores encontraram concentrações dos íons alumínio, ferro (III) e fluoreto nas águas pluviais acima do esperado por contribuição do intemperismo químico. Como a sub-bacia não apresenta outras atividades que liberam estes elementos, os autores atribuíram o resultado às emissões atmosféricas de material particulado e compostos fluoretados provenientes da cadeia produtiva do alumínio nas regiões vizinhas.

Figura 23 – Processos minerários na bacia de estudo por fase (1) e minérios (2)



Fonte: A autora com dados de SISEMA/ANM (2025).
Legenda: 1) Fase do processo minerário; 2) Minérios de cada processo minerário.

A mineração de zircônio ocorreu na mina do Serrote, localizada na sub-bacia do córrego das Amoras, tributário direto do reservatório Bortolan. Segundo Tolbert (1966), o zircônio foi minerado em depósitos aluviais, eluviais e de veios, no entanto, as operações foram interrompidas quando as paredes não sustentadas das trincheiras cederam e tornaram o trabalho perigoso.

Ocorreu também a mineração de urânio na mina Osamu Utsumi pela Indústrias Nucleares do Brasil (INB), com exploração a céu aberto, de 1982 a 1995; desde então, a área encontra-se em descomissionamento (INB, 20--). Os impactos desta atividade foram e vêm sendo objeto de diversos estudos, conforme revisado por Casagrande (2019). Souza, Silveira e Pereira (2013), por exemplo, identificaram a liberação de elementos traços da mina (urânio, arsênio, manganês, bário, cézio e chumbo) no córrego da Consulta, afluente da bacia do ribeirão das Antas. A liberação de manganês também foi observada pelo Projeto Arcal (2009).

Pereira *et al.* (2020) estudaram o reservatório de Águas Claras, que recebe efluentes

tratados da Unidade de Tratamento de Minério da INB, em 2011 quanto à segurança radiológica, concluindo que a água liberada pela INB é considerada radiologicamente segura para uso humano. Moreira (2017) estudou o alto ribeirão das Antas em pontos à jusante da INB. O autor observou que os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U analisados nas amostras de águas e de sedimentos suspensos foram inferiores aos limites estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores. Diante disso, concluiu-se que não havia carreamento significativo destes elementos da INB para o ribeirão das Antas.

No entanto, Ferrari *et al.* (2017) realizaram ensaios ecotoxicológicos com organismos aquáticos (*Ceriodaphnia silvestrii* e *Daphnia magna*), no período de 2014 a 2015, no reservatório de Águas Claras, observando toxicidade aguda em várias amostras, especialmente durante períodos de seca, como consequência da presença de efluentes da Unidade de Tratamento de Minério.

Outra contribuição antrópica é a presença de um lixão, onde foram dispostos os resíduos urbanos e hospitalares do município de Poços de Caldas de 1985 a 2022. O local fica ao lado do córrego dos Moinhos, tributário do ribeirão das Antas. Na ocasião do estudo de Palma e Zuquette (2005), os resíduos eram apenas recobertos, sem nenhum procedimento de controle de poluição. Situação parecida foi relatada por Medeiros *et al.* (2009), que destacaram o risco de contaminação do referido córrego. Atualmente, o local não recebe mais os resíduos sólidos do município, que são encaminhados ao aterro sanitário de Casa Branca (SP) a 71 km de Poços de Caldas (G1, 2022). A literatura carece de pesquisas mais recentes sobre as condições atuais do local.

A área urbana e industrial corresponde a 4,1% do uso do solo na bacia. Apesar de ser uma área relativamente pequena, contribui com lançamentos de esgotos, que são fontes importantes de poluição que atingem o reservatório Bortolan.

O lançamento de esgoto sem tratamento foi verificado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que realiza monitoramento do ribeirão das Antas em dois pontos, a montante de Poços de Caldas (latitude -21,93, longitude 46,59) e a jusante da cidade de Poços de Caldas (latitude -21,73, longitude -46,61) - onde passa a receber o nome de rio Lambari -, denominados BG096 e BG063, respectivamente. Os resultados na forma de índices são apresentados na Tabela 6 (IGAM, 2018, 2021, 2023).

Nos últimos anos, foi observada piora nos índices de BG063 quando comparado a BG091. Em geral, as águas em BG091 são de boa qualidade e oligotróficas a mesotróficas, enquanto em BG063 são de qualidade ruim a média e eutróficas a supereutróficas. Ou seja, há entrada de poluentes e perda de qualidade da água ao longo do percurso do rio. Os problemas

mais frequentes de BG063 apontados pelos relatórios do IGAM foram presença de *E. coli*, enriquecimento orgânico por fósforo total e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) elevada (IGAM, 2018, 2021, 2023).

Tabela 6 – Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET) à montante (BG091) e à jusante de Poços de Caldas (BG063) ao longo dos últimos anos

Estação	IQA					IET				
	2017	2019	2020	2021	2022	2017	2019	2020	2021	2022
BG091	72,4	70,2	74,4	69,9	74,8	51,5	50,0	52,4	51,7	52,4
BG063	47,3	42,7	46,8	52,6	57,8	61,5	63,3	62,2	65,2	60,2

Fonte: IGAM (2018, 2021, 2023).

Legenda: IQA ■excelente ■bom ■médio ■ruim ■muito ruim

IET ■ultraoligotrófico ■oligotrófico ■mesotrófico ■eutrófico ■supereutrófico ■hipereutrófico

Em estudo elaborado pela empresa Ryma Recursos Hídricos, em 2021, sobre a proliferação de macrófitas no reservatório Bortolan, foram identificadas duas estações elevatórias de efluentes inoperantes (ribeirão das Vargens, no Bairro Kennedy e ribeirão das Antas, no remanso da represa Bortolan), o que resultou em lançamento de esgoto diretamente nestes rios, que são afluentes do Bortolan. No mesmo estudo, foi encontrada uma estação de tratamento de efluentes inoperante (RYMA, 2021). Outro relato parecido foi feito por Sardinha *et al.* (2023), no qual demonstrou piora nos indicadores de qualidade da água por consequência do lançamento de esgoto no córrego das Amoras em decorrência de elevatória inoperante.

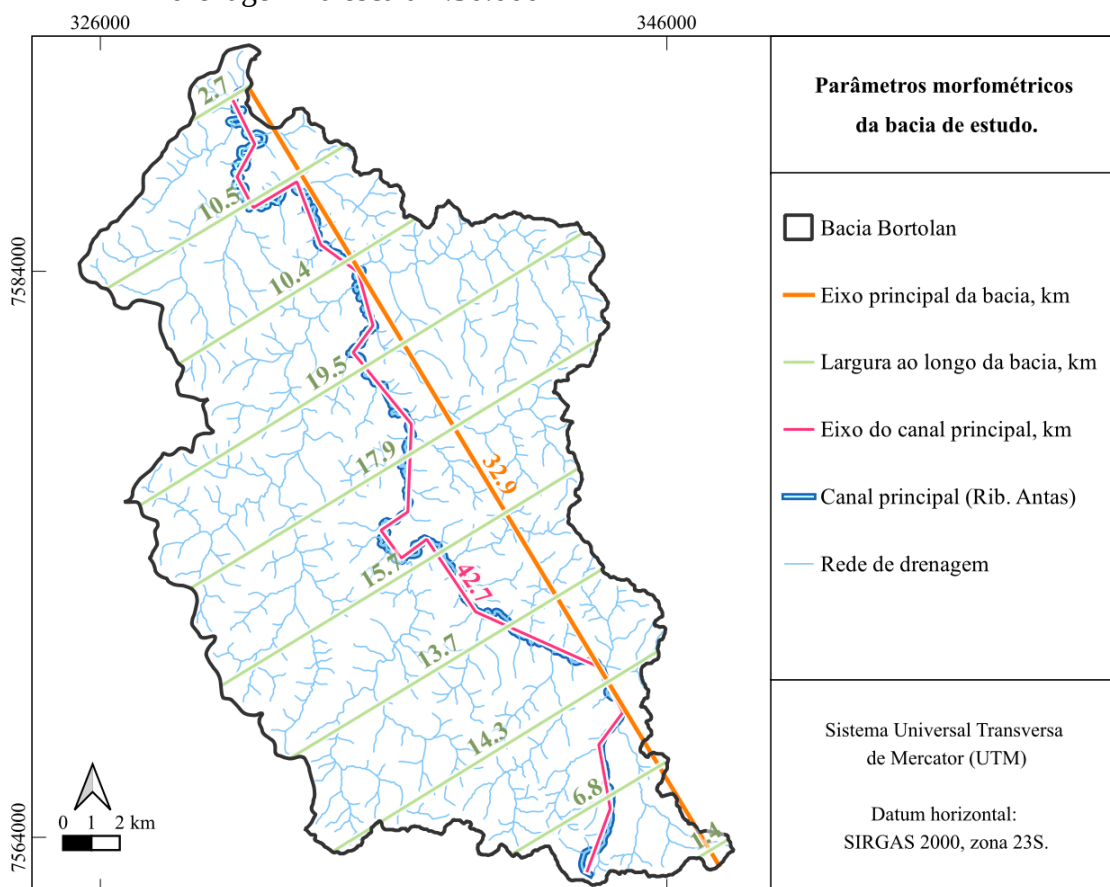
5.3 MORFOMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO

O relevo da bacia hidrográfica e a rede de drenagem estão detalhados na Figura 85 (apêndices). Com isso, foi possível determinar a altitude máxima da bacia do Bortolan de 1.566 metros e a mínima de 1.244 metros, resultando na amplitude altimétrica de 322 metros.

Na Figura 24 são apresentados alguns parâmetros morfométricos, sendo que para determinação do eixo principal da bacia, considerou-se a maior distância da foz a um ponto do perímetro. Os índices e parâmetros morfométricos são apresentados na Tabela 7.

A densidade de drenagem da BH Bortolan, 1,704 km/km², é semelhante aos valores encontrados na BH Antas, que foram reportados por Christofolletti (1979), 1,614 km/km², e por Alberti (2008), 1,91 km/km². A D_D encontrada é classificada como baixa por Shankar e Mohan (2006) ou grosseira por Shekar e Mathew (2024).

Figura 24 – Parâmetros morfométricos na bacia hidrográfica do Bortolan, com rede de drenagem na escala 1:50.000



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022).

Tabela 7 – Parâmetros e índices morfométricos da bacia do Bortolan

Parâmetro/Índice	Valor
Área (A_B)	365,9 km ²
Perímetro (P_B)	118,6 km
Eixo principal (Y_B)	32,9 km
Largura média ($X_B = A_B / Y_B$)	11,1 km
Comprimento da rede de drenagem (L_D)	623,3 km
Comprimento do canal principal (L_C)	58,2 km
Comprimento do eixo do canal principal (L_{EC})	42,7 km
Densidade de drenagem ($D_D = L_{RD} / A_B$)	1,704 km/km ²
Índice de sinuosidade do canal principal ($I_S = L_C / L_{EC}$)	1,362
Fator de forma ($K_f = L_{LB} / L_{EB}$)	0,339
Coeficiente de compacidade ($K_c = 0,28 P_B / A_B^{1/2}$)	1,735
Índice de circularidade ($I_C = 12,57 A_B / P_B^2$)	0,327

Fonte: A autora (2025).

Os índices que caracterizam a forma (K_f , K_c e I_C) revelam que se trata de uma bacia alongada e de baixa circularidade, o que a torna pouco suscetível a inundações, de um modo geral. Uma análise detalhada deste assunto pode ser consultada no trabalho de Alberti (2008),

onde foi determinado o coeficiente de compacidade e o fator forma para cada uma das sub-bacias da bacia hidrográfica das Antas.

Na região do médio e baixo Antas, observa-se que o canal principal é meândrico, com a presença de meandros abandonados, como exemplificado na Figura 25. Este rio apresenta índice de sinuosidade de 1,362 quando considerada toda sua extensão. Dividindo o trecho do ribeirão das Antas contido na bacia do Bortolan pelas bacias ottocodificadas apresentadas na Figura 18, encontram-se os índices de sinuosidade apresentados na Tabela 8. Christofolletti (1980) considera meandrante quando o curso d'água apresenta I_s superior a 1,5, o que é observado no médio e no baixo curso deste rio.

Figura 25 – Meandro abandonado no baixo ribeirão das Antas



Fonte: A autora com dados de OpenStreetMap Foundation (2025).

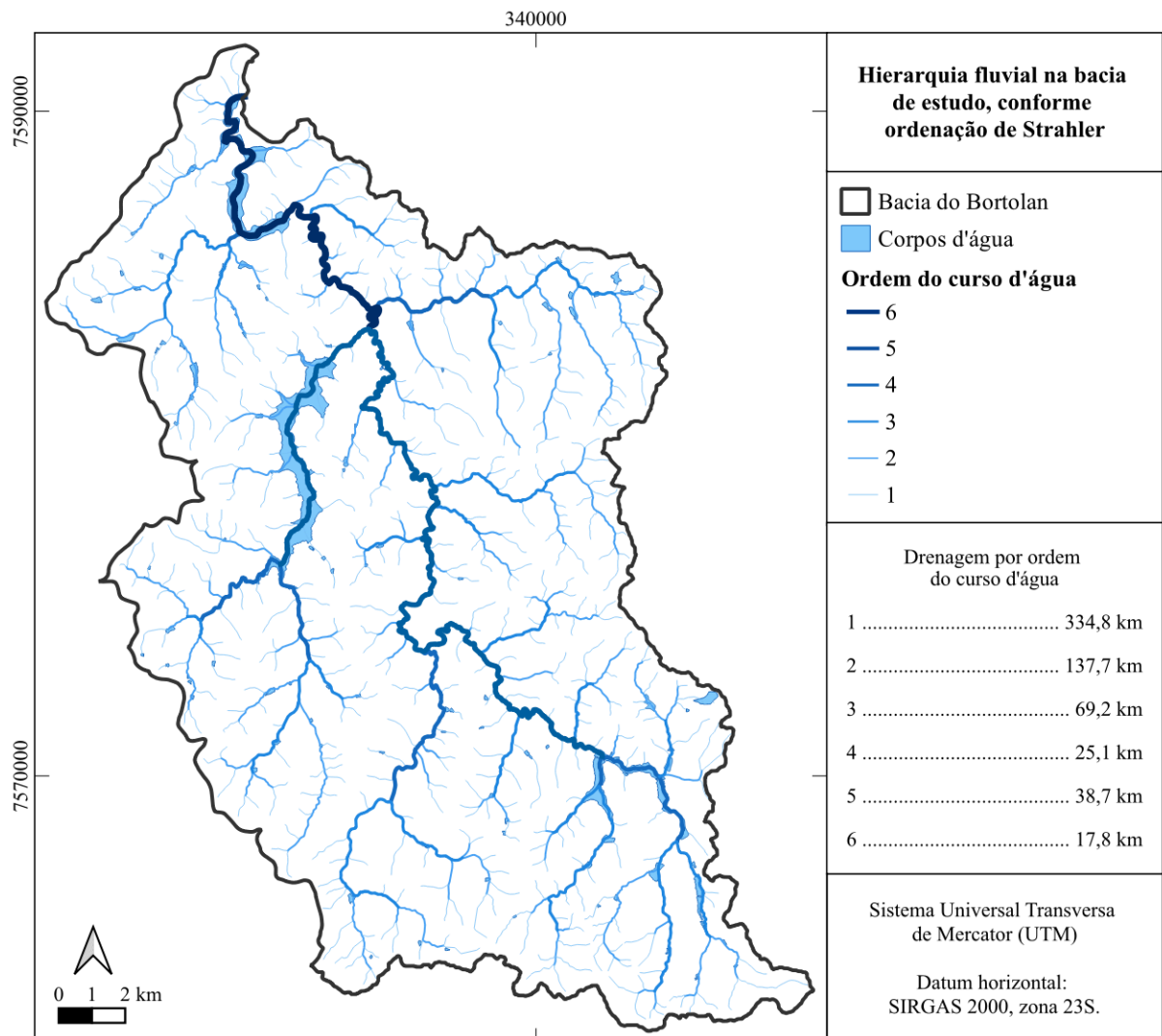
Tabela 8 – Sinuosidade ao longo do ribeirão das Antas dentro da BH do Bortolan

Parâmetro/Índice	Alto curso	Médio curso	Baixo curso
Comprimento do canal (L_C)	21,42	18,71	19,13
Comprimento do eixo do canal (L_{EC})	16,92	11,78	10,88
Índice de sinuosidade ($I_s = L_C / L_{EC}$)	1,266	1,589	1,759

Fonte: A autora (2025).

Quanto à hierarquia fluvial, a bacia hidrográfica do Bortolan é de sexta ordem pelo método de ordenação de Strahler, conforme apresentado na Figura 26. O ribeirão das Antas é de quarta ordem a partir da entrada do córrego das Pitangueiras, tornando-se quinta ordem após a represa de Águas Claras e sexta ordem com a entrada do ribeirão do Cipó.

Figura 26 – Hierarquia fluvial, conforme método de Strahler, na bacia hidrográfica do Bortolan



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022).

Na Figura 26 também é possível observar o padrão de drenagem dendrítica na bacia, que Christofolletti (1980) afirma ocorrer "sobre rochas de resistência uniforme, ou em estruturas sedimentares horizontais".

6 CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO

O reservatório do Bortolan é um represamento do ribeirão das Antas, inaugurado em 1956, sendo responsável pela regularização do escoamento que alimenta as turbinas da PCH José Togni (Bortolan) e demais PCHs instaladas à sua jusante (Ryma, 2021). Também é utilizado para atividades de recreação de contato primário e pesca, conforme exposto na introdução.

Além do ribeirão das Antas, a represa recebe o córrego das Amoras e o córrego da Ariranha (também chamado de córrego do Chiqueirão), e outros pequenos afluentes, conforme pode ser observado na Figura 27, na qual também são apresentados os pontos amostrados neste estudo.

O reservatório Bortolan foi avaliado como parte da pesquisa de Laje Filho (1996) sobre as características ecológicas da Bacia Hidrográfica do ribeirão das Antas. O estudo avaliou a qualidade da água, sedimentos e comunidades biológicas em dez pontos (no caso do Bortolan, também em três pontos no eixo vertical), em um período de 10 dias no início de novembro de 1994. Foram identificadas fontes de poluição associadas a atividades industriais, urbanas e agrícolas. O estudo também concluiu que a represa Bortolan apresenta características intermediárias entre rio e lago, o que o autor definiu como “comportamento de rio regulado”, devido à presença tanto de organismos de ambiente lótico quanto de ambiente lêntico.

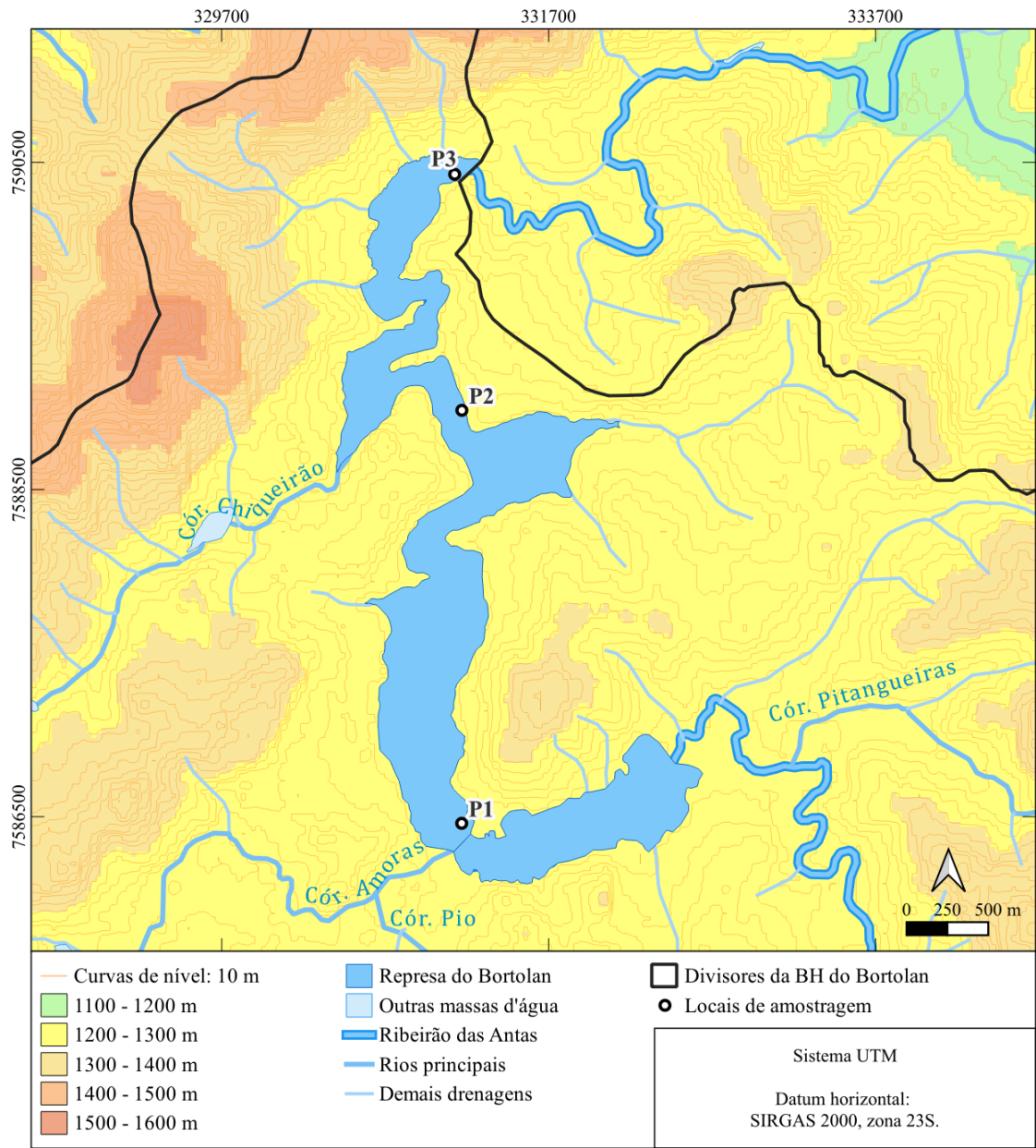
Um estudo elaborado no âmbito do Projeto Arcal (2009), com apoio da Agência Internacional de Energia Atômica e coordenação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), avaliou a qualidade da água do ribeirão das Antas em sete pontos ao longo do ribeirão (incluindo o reservatório Bortolan, próximo ao barramento), além de quatro pontos de *background*, ao longo do ano de 2008, com quatro campanhas de coleta. A principal conclusão do estudo para o reservatório Bortolan foi a contaminação por esgoto doméstico devido às concentrações de coliformes termotolerantes acima do limite para águas de classe 2 em 75% das amostras.

Ferrari (2010) e Ronqui (2013) realizaram estudos para avaliar os impactos ambientais de efluentes da mineração de urânio na cava da mina, e nos reservatórios das Antas e Bortolan. Ambos os estudos apontam que o reservatório Bortolan é menos impactado pelos efluentes radioativos, sofrendo maior influência da poluição urbana.

No estudo coordenado pela Comissão das Águas da Câmara Municipal de Poços de Caldas, o reservatório Bortolan foi monitorado em dois pontos, tendo sido detectadas baixas

quantidades de oxigênio dissolvido e níveis elevados de coliformes termotolerantes na água. Quanto aos sedimentos, observou-se concentração de fósforo e de níquel superior aos demais pontos da bacia.

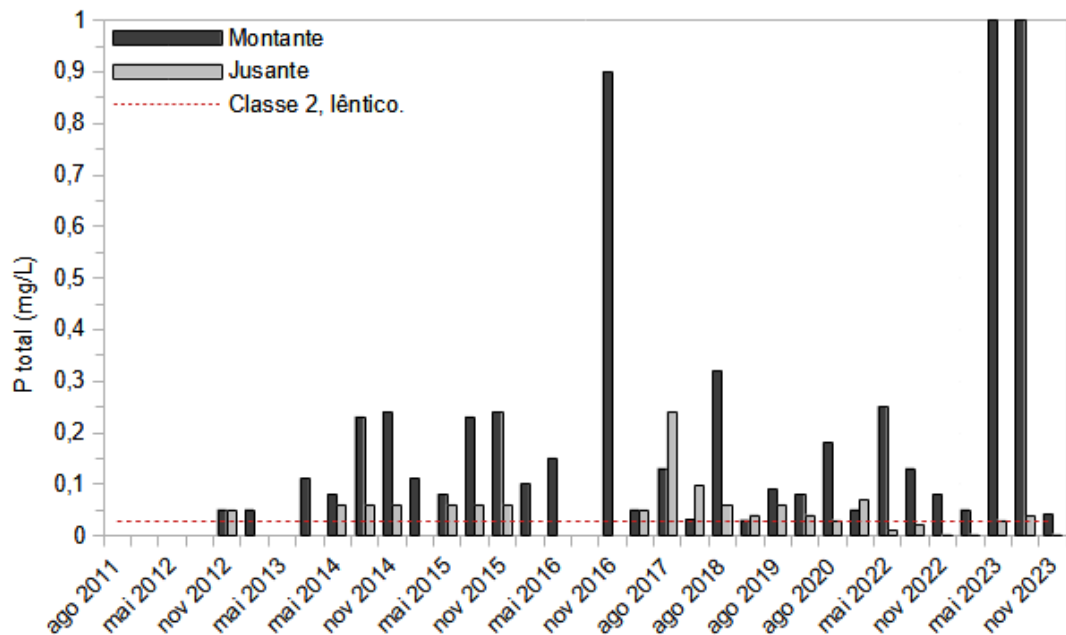
Figura 27 – Reservatório Bortolan, com indicação dos pontos de amostragem



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022).

Além disso, dados do monitoramento do reservatório Bortolan feitos pelo DME de 2011 a 2023 apresentam com frequência não conformidades para água de classe 2 nos parâmetros coliformes termotolerantes e fósforo total (Figura 28), o que reforça a presença de esgotos e fertilizantes no local (Ryma, 2021; Bioética Ambiental, 2022, 2024).

Figura 28 – Histórico da concentração de fósforo total, em mg/L, no reservatório Bortolan



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de Ryma (2021) e Bioética Ambiental (2022, 2024).

6.1 MORFOMETRIA DO RESERVATÓRIO

O início do reservatório é uma área de difícil delimitação, necessitando de mais estudos para defini-lo adequadamente. Observando a imagem de satélite (Figura 29), notam-se pequenas áreas alagadas junto ao rio principal cuja origem não pode ser determinada, pois podem ser meandros abandonados, uma várzea, ou efetivamente parte do reservatório.

A região foi avaliada ao longo do tempo por meio de imagens de satélite, conforme apresentado na Figura 30 e também disponibilizado pela autora na forma de vídeos para o período de 2017 a 2024 (Ramos, 2025). No período analisado, observou-se o ribeirão das Antas distinto da represa no trecho, com as pequenas regiões alagadas bem definidas. Não foi observado nível alto o suficiente para dar um aspecto de unidade e uniformidade à região, o que acontece apenas a partir da entrada do córrego das Amoras.

No entanto, de acordo com a carta topográfica da região (IBGE, 1972), esta região é considerada como parte do reservatório. É possível que da época deste documento até o momento atual tenha ocorrido algum assoreamento da área.

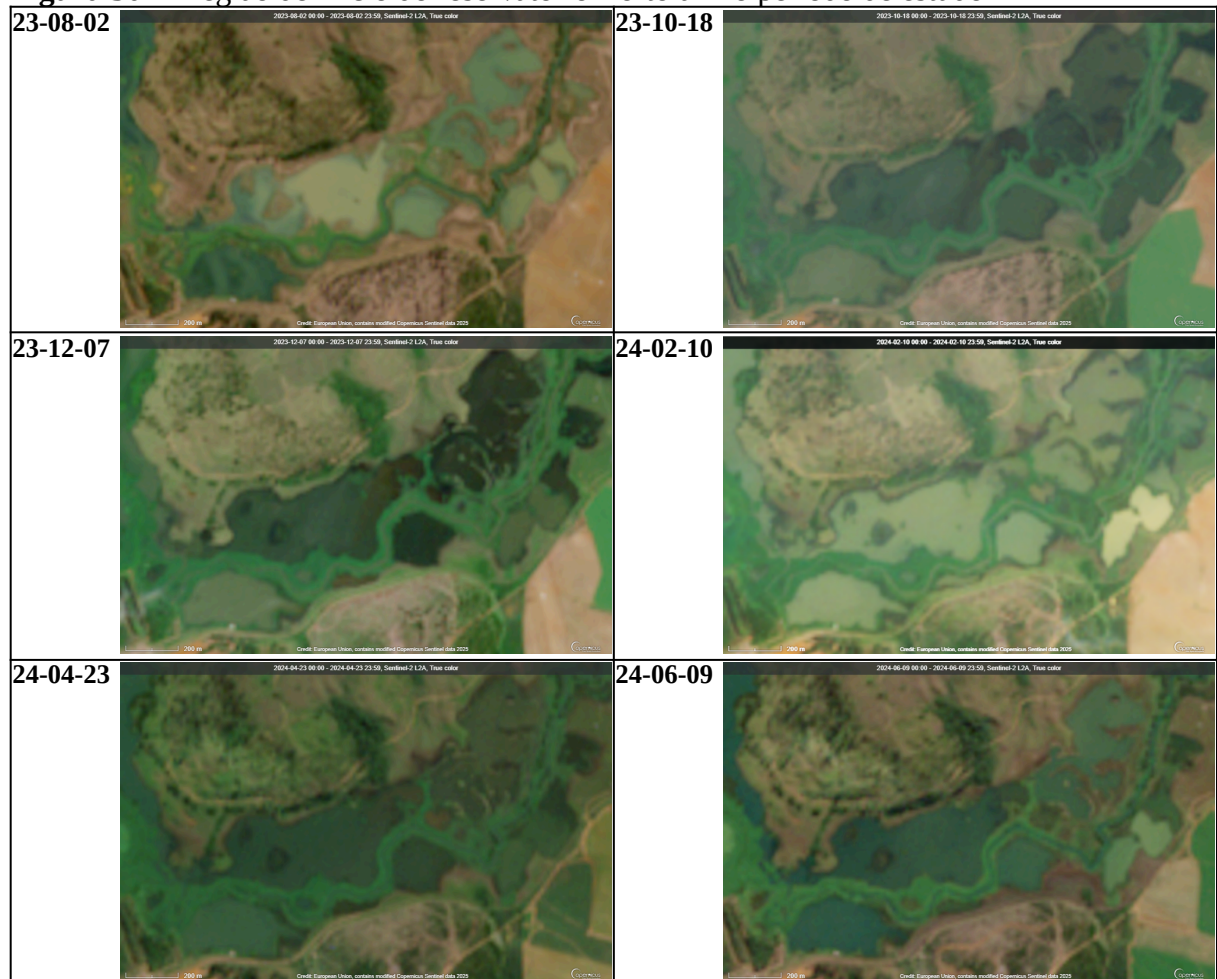
Diante dessas ponderações e da indisponibilidade de batimetria, optou-se por determinar os parâmetros morfométricos da represa de duas formas: numa considerando e noutra não considerando a área descrita como parte do reservatório. Os resultados são apresentados na Figura 31 e na Tabela 9.

Figura 29 – Ribeirão das Antas na região de início do reservatório Bortolan

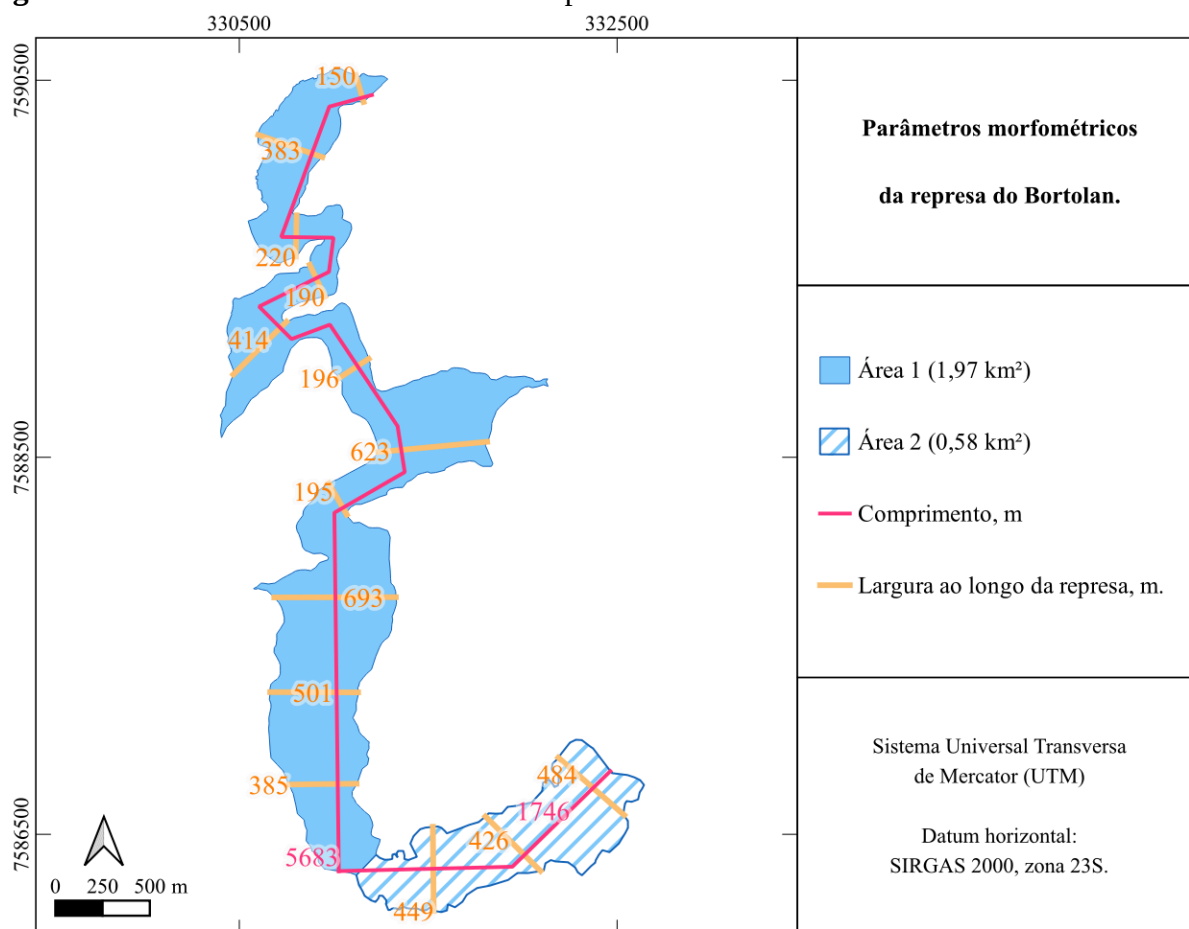


Fonte: A autora com dados de OpenStreetMap Foundation (2025).

Figura 30 – Região de início do reservatório Bortolan no período de estudo



Fonte: A autora com dados de Copernicus (2025).

Figura 31 – Parâmetros morfométricos da represa do Bortolan

Fonte: A autora com dados de IBGE (1972) e Open Street Maps (2025).

Tabela 9 – Morfometria do reservatório Bortolan considerando duas delimitações

Parâmetro/Índice	Área 1	Área 1+2
Área (A_R), m ²	1.965.543	2.541.887
Perímetro (P_R), m	16.187	20.563
Volume (V_R), m ³	6.900.000*	6.900.000*
Comprimento máximo (Y_R), m	5.683	7.428
Largura média ($X_R = A_R / Y_R$), m	346	342
Profundidade máxima ($Z_{m\acute{a}x}$), m	11,50*	11,50*
Profundidade média ($Z_{m\acute{e}d} = V / A_R$), m	3,51	2,71
Profundidade relativa ($Z_{rel\%} = 88,62 Z_{m\acute{a}x} / A_R^{1/2}$), %	0,740	0,650
Desenvolvimento de margem ($D_M = 0,28 P_R / A_R^{1/2}$)	3,233	3,611
Desenvolvimento de volume ($D_V = 3 Z_{m\acute{e}d} / Z_{m\acute{a}x}$)	0,916	0,708
Fator de envolvimento ($F_E = A_B / A_R$)	186	144

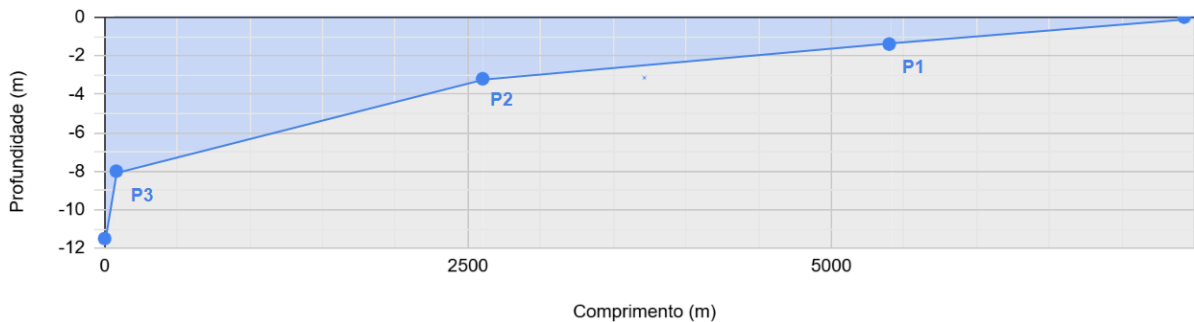
Fonte: A autora com dados de Ferrari (2010) onde indicado pelo asterisco.

Segundo a classificação de Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008), são considerados pequenos os reservatórios com volume entre 10^6 e 10^8 m³, e área entre 1 e 100 km², como é o caso do Bortolan. O reservatório é alongado, com contornos irregulares e desenvolvimento de

margem coerente com estas características, isto é, de 3 a 5, conforme classificação de Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008). O reservatório é raso, com profundidade média em torno de 3 m. A profundidade relativa (que indica a relação da profundidade máxima com a área superficial do lago) foi baixa, também por conta do perfil alongado e profundidade baixa.

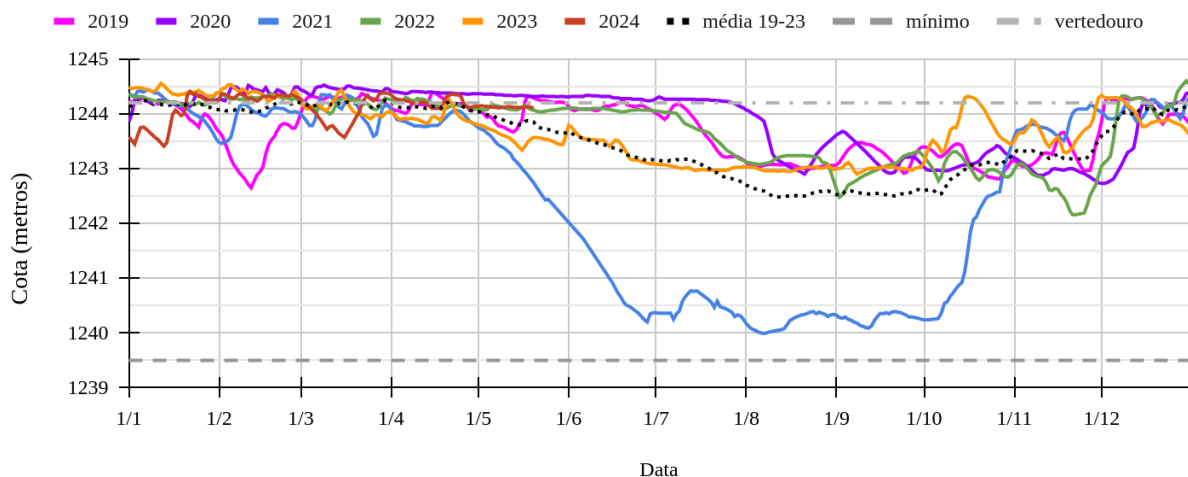
Um perfil aproximado de profundidade do reservatório é apresentado na Figura 32, com dados de profundidade tomados no campo de 20 de outubro de 2023, data em que o reservatório estava com a cota de 100% de volume (DME, 2024). No entanto, ocorrem variações ao longo do ano, com níveis menores de agosto a outubro, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 32 – Perfil longitudinal aproximado da represa Bortolan, com base na profundidade dos pontos de amostragem e na profundidade no barramento, na situação de 100% de volume



Fonte: A autora (2025).

Figura 33 – Cota do reservatório no período de janeiro de 2019 a maio de 2024, com a média de 2019 a 2023, cota mínima de operação da PCH e cota do vertedouro



Fonte: A autora com dados de DME (2024).

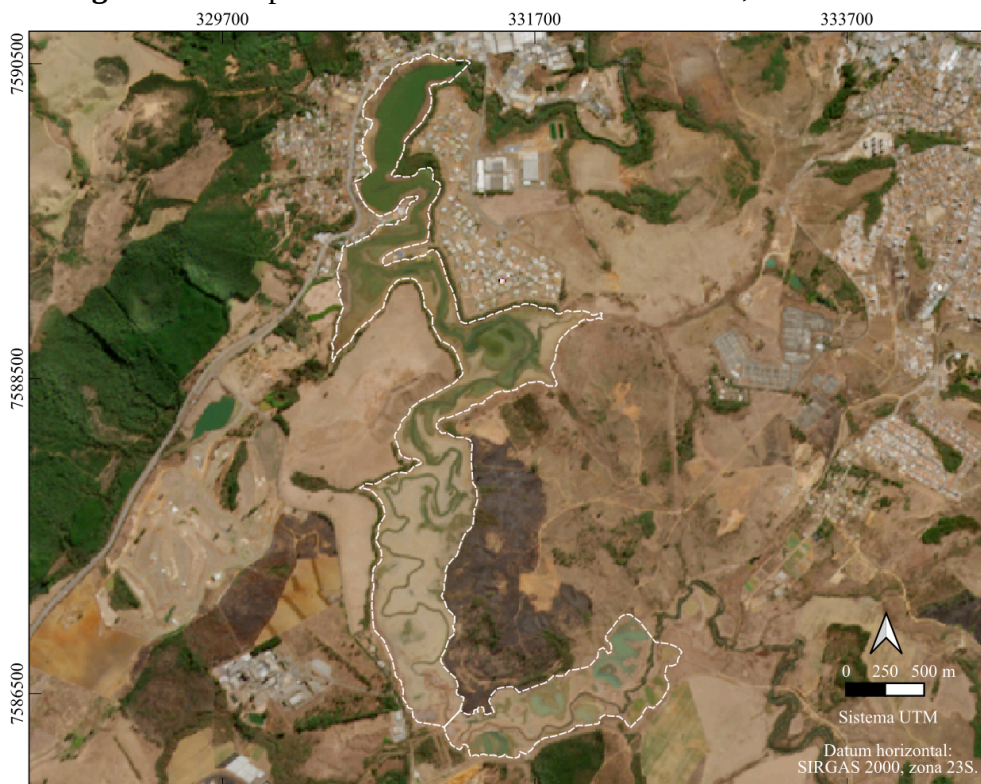
Com os valores das cotas, é possível calcular o tempo de residência a partir dos dados de operação da represa fornecidos pelo DME, na Tabela 10. Conclui-se que a represa é regulada de modo a apresentar tempo de residência de aproximadamente 11 dias.

Tabela 10 – Médias dos dados de operação da represa do Bortolan no período de estudo

Data	Cota média (m)	Coluna d'água (m)	Vazão saída (m³/s)	Volume (m³)	Residência (dias)
mai./2023	1243,57	10,87	5,477	5212260	11,015
jun./2023	1243,41	10,71	5,065	4820340	11,015
jul./2023	1243,01	10,31	4,105	3906090	11,013
ago./2023	1242,99	10,29	4,059	3862620	11,014
set./2023	1243,01	10,31	4,105	3906090	11,013
out./2023	1243,75	11,05	5,96	5671110	11,013
nov./2023	1243,64	10,94	5,663	5388900	11,014
dez./2023	1243,99	11,29	6,633	6312120	11,014
jan./2024	1243,91	11,21	6,405	6094770	11,013
fev./2024	1244,32	11,62	7,615	7247070	11,015
mar./2024	1244,02	11,32	6,72	6394920	11,014
abr./2024	1244,22	11,52	7,311	6957270	11,014
mai./2024	1244,13	11,43	7,042	6701280	11,014
Média	1243,68	10,98	5,87	5581640	11,014

Fonte: A autora com dados de DME (2024).

Apesar de anterior ao período deste estudo, convém destacar na Figura 33 uma seca em 2021 que provocou redução significativa do nível da represa de maio a novembro, chegando a redução de 4,2 m ao nível do vertedouro. Na imagem de satélite (Figura 34), é possível observar onde se encontra a região mais profunda da represa.

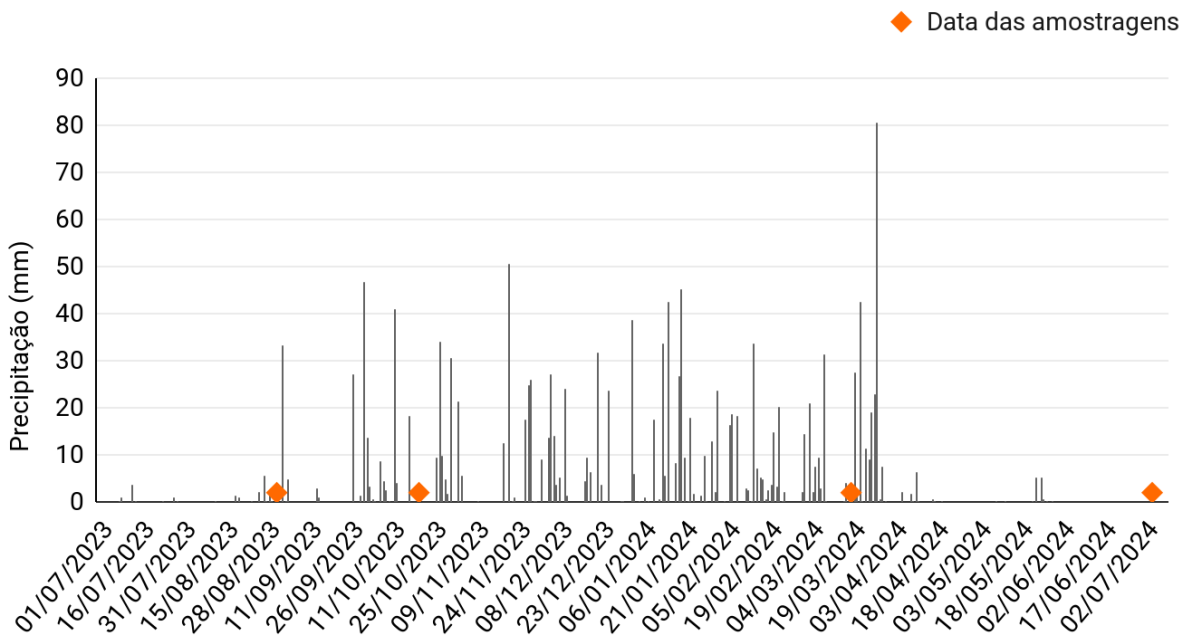
Figura 34 – Represa do Bortolan em 09/08/2021 e 4,34% de volume

Fonte: A autora com dados de Copernicus (2025).

6.2 CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO PERÍODO DE ESTUDO

O pluviograma do período deste estudo é apresentado na Figura 35 e a precipitação acumulada em cinco dias, onze e trinta dias antes de cada amostragem foi calculada na Tabela 11, sendo 11 dias o tempo de residência.

Figura 35 – Pluviograma diário, com indicação das datas de amostragem, obtido pelo Pluviômetro Delta Ohm HD-2013 DB, na Unifal-MG de Poços de Caldas, a 4,5km do reservatório Bortolan



Fonte: Elaborado pela autora com base em Sardinha (2024).

Tabela 11 – Precipitação acumulada nos dias anteriores às amostragens

Data da amostragem	Precipitação acumulada (mm)		
	5 dias	11 dias	30 dias
01/09/2023	3,0	11,0	13,4
20/10/2023	18,4	63,6	172,6
19/03/2024	4,6	36,2	140,8
05/07/2024	0,0	0,0	0,0

Fonte: A autora (2025).

A primeira amostragem foi realizada no final da fase seca, tendo ocorrido chuva fraca nos dias anteriores. A segunda ocorreu no início da estação chuvosa e foi a amostra com maior influência de precipitação. A terceira coleta ocorreu no final da fase chuvosa e esteve sujeita a precipitação fraca nos cinco dias anteriores, mas a um acumulado significativo nos últimos trinta dias. A última amostragem ocorreu no meio da fase seca e não teve influência de precipitação recente. Todas as amostragens foram feitas no período da manhã.

O mapa da Figura 27 mostra os locais onde foram realizadas as amostragens. O ponto

P1 localiza-se no início do reservatório Bortolan, após o encontro do ribeirão das Antas com o córrego das Amoras, com profundidade que variou de 25 cm a 1,60 m (conforme Tabela 12); este ponto apresenta características fluviais, como correnteza. Esta região apresenta-se visualmente como a mais degradada, apresentando forte odor, aspecto turvo, presença de óleos e materiais suspensos, além de muitas macrófitas. Este perfil é observado desde a foz do córrego Amoras (Figura 36).

Tabela 12 – Profundidade dos pontos de amostragem em cada campanha

Ponto	01/09/23	20/10/23	19/03/24	05/07/24
P1	0,25	1,60	1,35	1,20
P2	2,10	3,40	3,05	2,20
P3	6,90	8,00	7,60	7,00

Fonte: A autora (2025).

Figura 36 – Elevada presença de macrófitas na foz do córrego Amoras



Fonte: A autora em a) 31/08/2024 e b) 05/10/2024.

O ponto P2 localiza-se na região central da represa, após receber alguns pequenos afluentes, tendo apresentado profundidade entre 2,10 m e 3,40 m. Este ponto apresenta um aspecto melhor, com pouco óleo e espumas, mas ainda com macrófitas nas margens da represa.

O ponto P3 está localizado próximo ao vertedouro, com profundidade entre 6,90 m e 8,00 m; nesta região, apresenta características lacustres. O ponto P3 também apresentou pouco óleo e espumas e quantidade moderada de macrófitas nas margens. Na terceira campanha, foi observado lançamento de esgoto doméstico por consequência de estação elevatória inoperante (Figura 37), localizado a cerca de 150 m de P3. A constatação de que se tratava de esgoto é em decorrência do odor característico e da presença de óleos e graxas.

Figura 37 – Lançamento de esgoto *in natura* na represa Bortolan

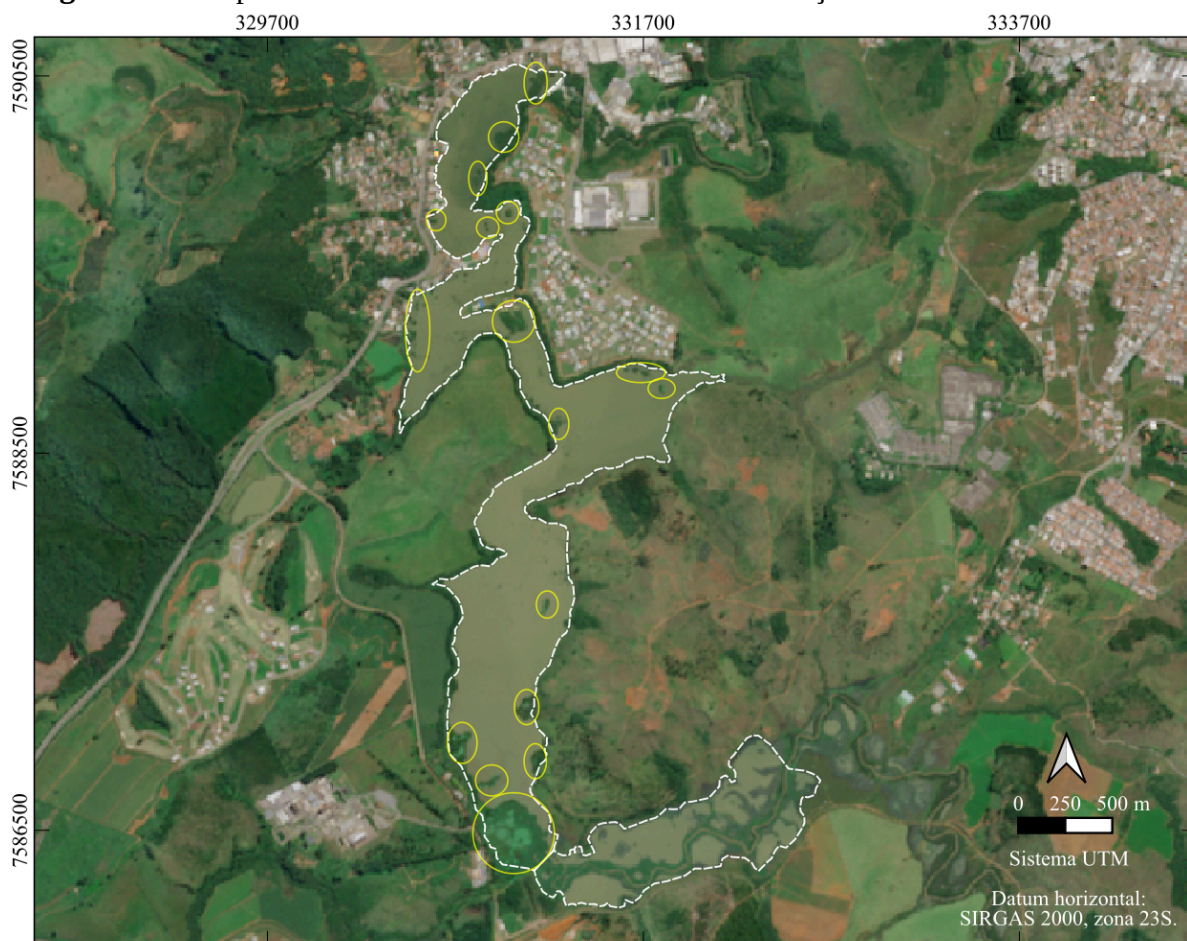


Fonte: A autora em 19/03/2024.

O período estudado coincidiu com o aumento da população de macrófitas (Figura 38), que culminou com a necessidade de retirada mecânica destas plantas pela prefeitura (Poços de Caldas, 2024). Fato parecido ocorreu também em 2021 (G1, 2021).

Além disso, convém destacar que provavelmente ocorreu uma floração de algas na segunda amostragem, pois foi observado material suspenso de coloração verde durante a filtração das amostras de todos os pontos.

Figura 38 – Represa do Bortolan em 31/03/2024 com indicação das áreas com macrófitas



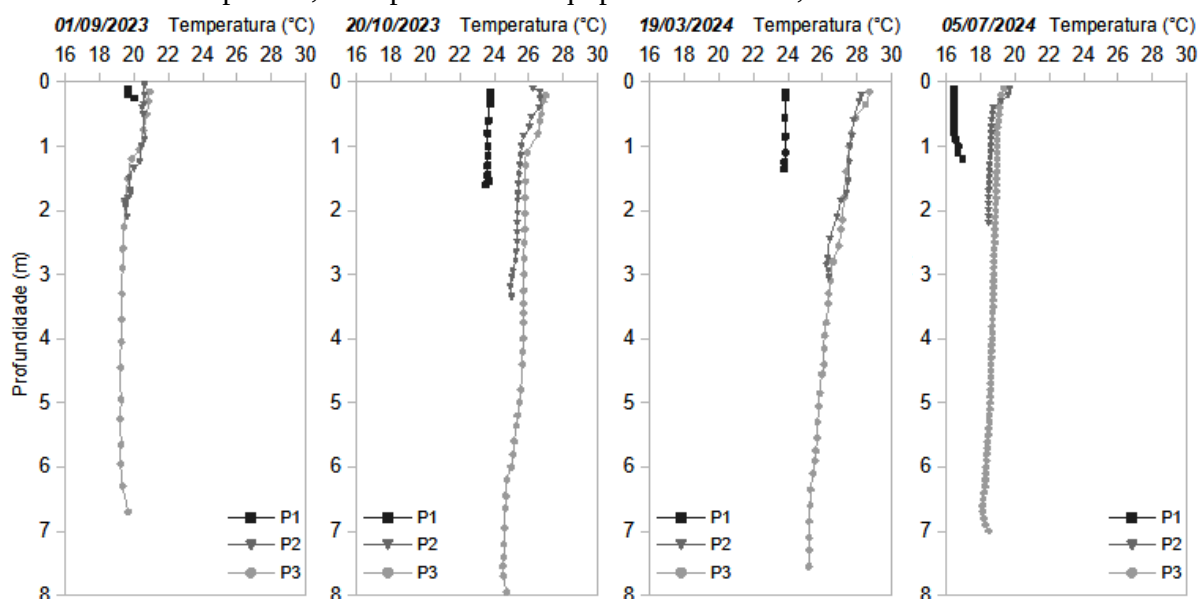
Fonte: A autora com imagem de Copernicus (2025).

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO-QUÍMICOS

As temperaturas na coluna d'água são apresentadas na Figura 39, com as correspondentes temperaturas e horários das medidas na Tabela 13. Por conta da distância entre os pontos amostrais e o tempo para locomoção entre eles, as medidas foram realizadas com diferença de tempo significativa, o que foi suficiente para a temperatura ambiente aumentar até 4°C entre os pontos. Por consequência disso, a temperatura da água foi menor em P1 em todas as amostragens.

O ponto P1, por ser raso e na zona fluvial, apresentou temperatura constante na coluna d'água por conta da correnteza que mantém a coluna d'água uniforme. Os pontos P2 e P3 apresentaram decréscimo da temperatura com o aumento da profundidade. Este decréscimo foi mais rápido no primeiro metro da coluna d'água, coincidindo com a camada que recebe mais radiação solar. A variação de temperatura mais significativa aconteceu na terceira amostragem, que foi o dia mais quente analisado, com diferença de 3°C da superfície para o fundo.

Figura 39 – Temperatura na coluna d’água, em °C, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,3$ °C



Fonte: A autora (2025).

Tabela 13 – Horário e temperatura ambiente no momento de cada amostragem

Ponto	01/09/23		20/10/23		19/03/24		05/07/24	
	Hora	T. amb. (°C)	Hora	T. amb. (°C)	Hora	T. amb. (°C)	Hora	T. amb. (°C)
P1	09:36	21,4	08:44	21,9	08:59	29,2	10:10	24,6
P2	10:10	23,3	10:03	26,0	09:34	32,0	11:05	24,9
P3	11:07	26,0	11:00	28,2	10:19	33,6	11:44	24,8

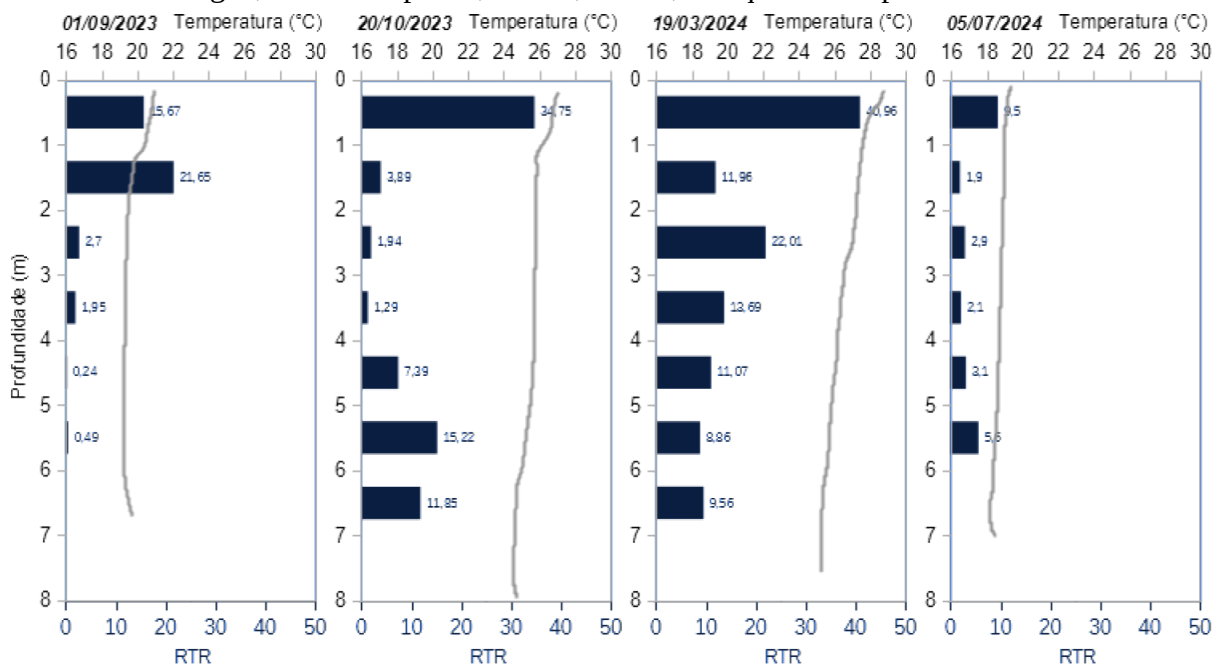
Fonte: A autora (2025).

Legenda: T. amb. - temperatura ambiente.

A estabilidade térmica da coluna d’água foi analisada em P3 por meio do cálculo da resistência térmica relativa (RTR) em camadas de 1 metro, conforme apresentado na Figura 40. As RTRs foram mais acentuadas nas camadas superiores do reservatório. Os maiores valores ocorreram na terceira amostragem. Valores de RTR acima de 20 unidades por metro foram observados nas três primeiras amostragens, o que segundo Kortmann (2003 *apud* López e Cuartas, 2024) pode gerar resistência à mistura. Com base nisso, é possível afirmar que a maior estratificação observada neste estudo ocorreu no final do verão (19/03/2024), foi intermediária na primavera (20/10/2023) e final do inverno (01/09/2023), porém inexistente no começo do inverno (05/07/2024).

A turbidez medida em todas as campanhas ficou bem abaixo do limite de 100 NTU, estabelecido para águas de classe 2 da resolução CONAMA nº 357/2005 (Figura 41). Os valores foram semelhantes aos encontrados em estudo anterior para o reservatório, de 5 a 20 NTU (Poços de Caldas, 2012).

Figura 40 – RTR a cada metro, no eixo inferior, adimensional; e temperatura na coluna d'água, no eixo superior, em °C, em P3, nas quatro campanhas



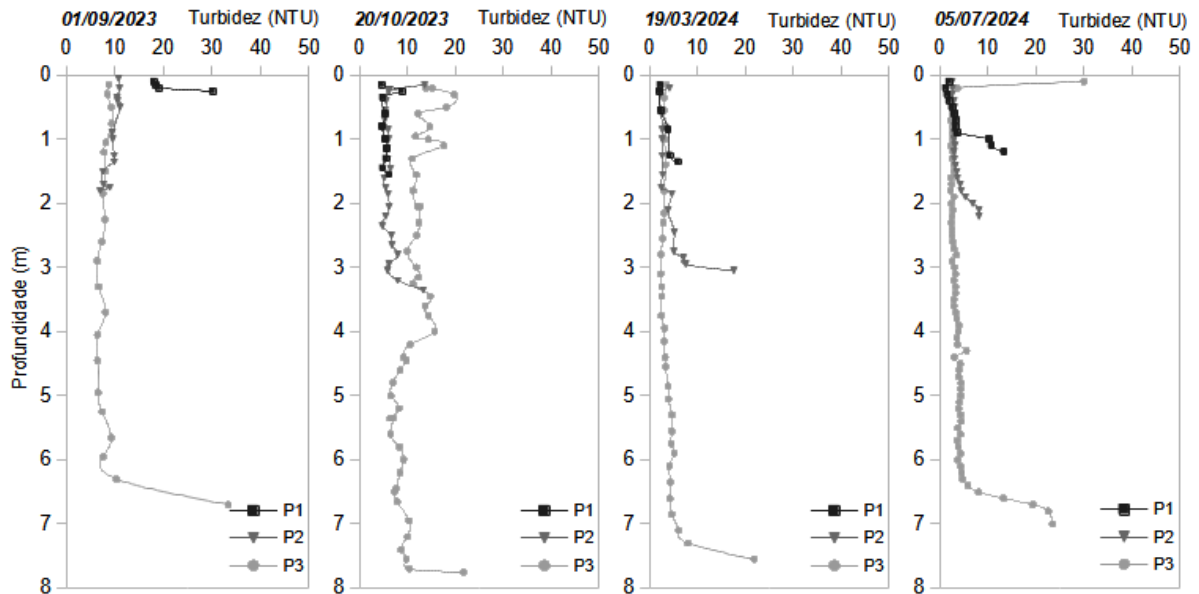
Fonte: A autora (2025).

Os maiores valores de turbidez são encontrados próximos ao fundo, uma vez que a medida perturba o sedimento. O mesmo pode ter acontecido em P1 na primeira amostragem, por conta da baixa profundidade (25 cm). Comparativamente, P3 na segunda amostragem teve valores maiores de turbidez provavelmente por influência da precipitação acumulada nos dias anteriores (18,4 mm em 5 dias).

A condutividade variou da primeira amostragem para as demais (Figura 42). Conforme Esteves (2011), a condutividade é menor na estação seca e maior na estação chuvosa, o que explica o padrão das três primeiras amostragens. No entanto, a última amostragem ocorreu no período seco, mas apresentou valores similares à segunda e à terceira, que ocorreram no período chuvoso. Este resultado discrepante pode indicar a presença de fontes adicionais de poluição.

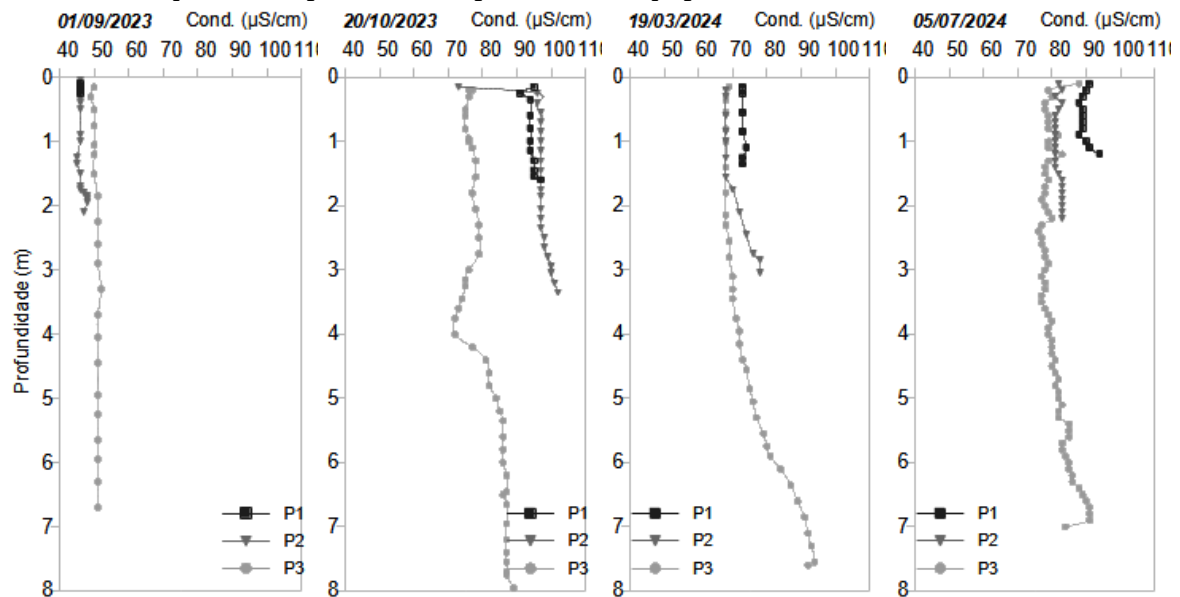
A condutividade elétrica também apresentou variações no perfil vertical, sendo que na primeira amostragem foi relativamente constante enquanto nas demais apresentou aumento com a profundidade. Este comportamento foi inversamente relacionado à temperatura, conforme previsto na literatura (Esteves, 2011)

Figura 41 – Turbidez na coluna d’água, em unidade nefelométrica de turbidez (NTU), nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 1,0$ NTU



Fonte: A autora (2025).

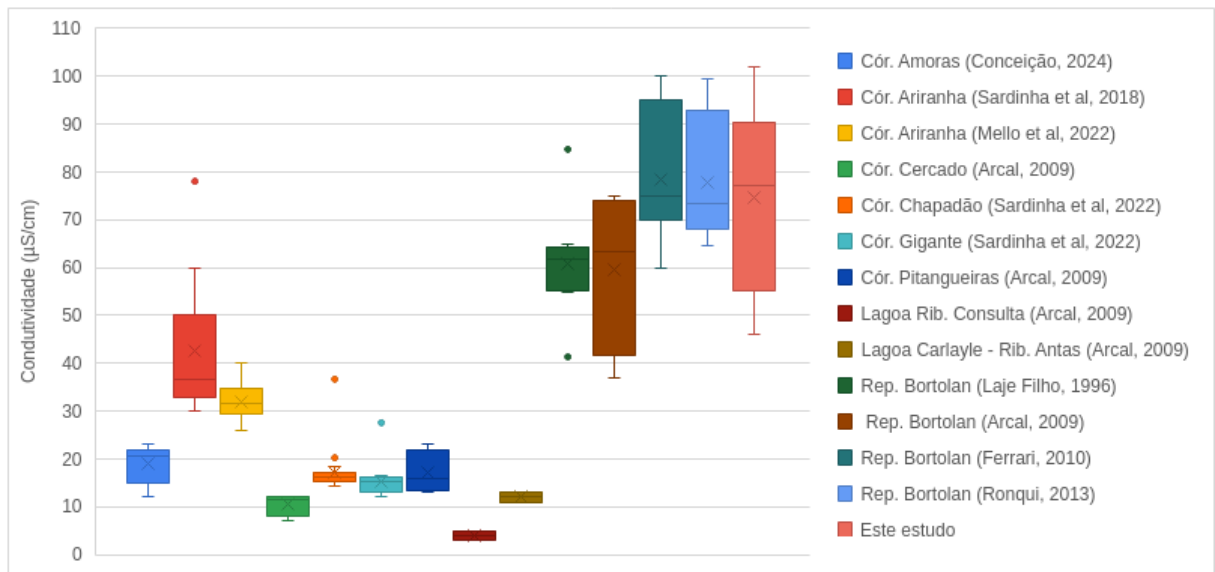
Figura 42 – Condutividade na coluna d’água, em $\mu\text{S}/\text{cm}$, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,1$ %



Fonte: A autora (2025).

Os valores encontrados foram superiores aos apresentados por Costa, Carmo e Delgado (2001) para as águas superficiais de Poços de Caldas, variando de $10,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $60 \mu\text{S}/\text{cm}$, com média de $25,7 \mu\text{S}/\text{cm}$). Também foram superiores aos valores encontrados em estudos anteriores na bacia das Antas, mas próximos aos estudos de Ferrari (2010) e Ronqui (2013) no reservatório Bortolan, conforme Figura 43.

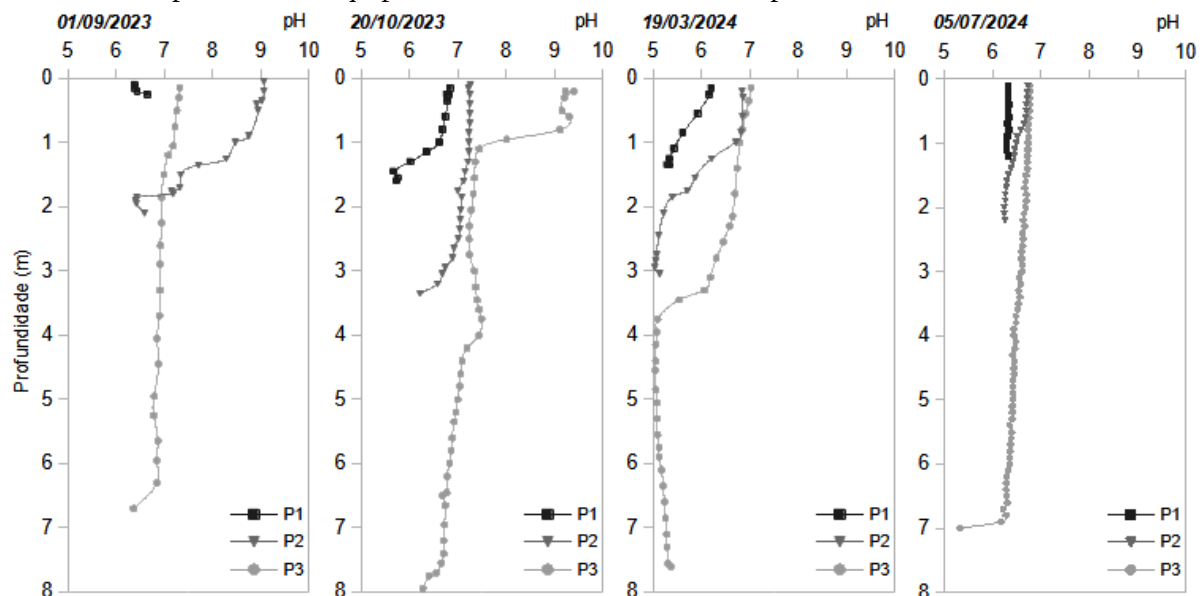
Figura 43 – Valores de condutividade na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

O perfil e os valores de pH variaram entre as amostragens, como pode ser observado na Figura 44. De um modo geral, o pH diminui com a profundidade.

Figura 44 – pH na coluna d'água, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,1$ unidades de pH



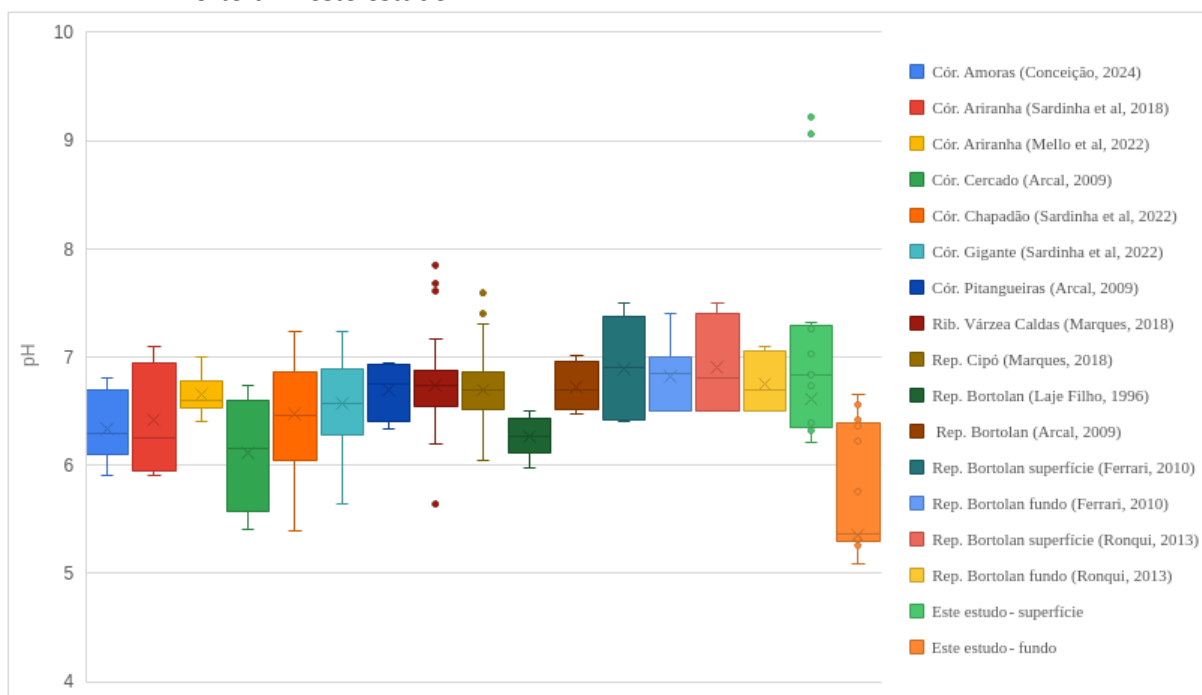
Fonte: A autora (2025).

Analisando a porção superficial, apenas em dois casos não foi atendida a recomendação de pH de seis a nove para água de classe 2: P1 na terceira amostragem foi menor que seis e P3 na segunda amostragem foi acima de nove. Os valores acima de 9 podem ser justificados por um aumento na produtividade primária, pois possivelmente havia clorofila

na água analisada na segunda amostragem, como já mencionado. Na quarta amostragem, houve pouca variação de pH com a profundidade e entre os pontos, o que pode estar relacionado a ausência de estratificação térmica.

Em média, os valores encontrados se assemelham a dados prévios, como observados por Costa, Carmo e Delgado (2001), que apresenta valores entre 6,2 e 7,4 para as águas superficiais de Poços de Caldas, e para demais estudos na bacia das Antas, apresentados na Figura 45. Os estudos anteriores no reservatório Bortolan apresentaram média entre 6,5 e 7, com menor dispersão dos dados nas medidas realizadas no fundo do reservatório; no presente estudo, as medidas de pH no fundo do reservatório foram significativamente menores que na superfície. É importante destacar que a redução no pH favorece a solubilidade de metais.

Figura 45 – Valores de pH na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



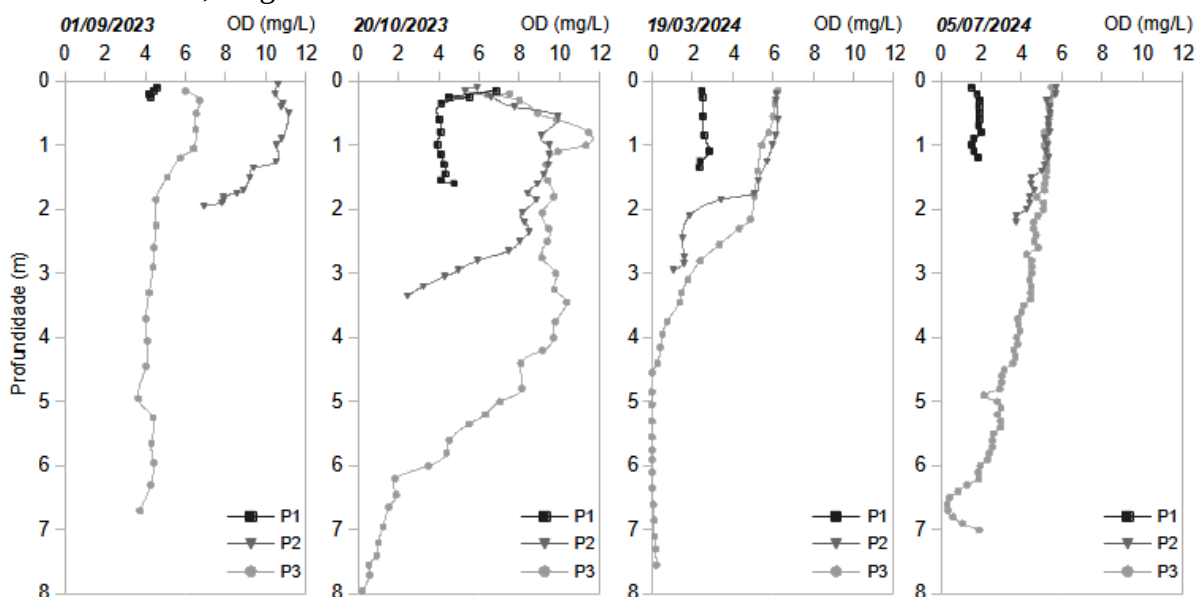
Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

O perfil de oxigênio dissolvido (Figura 46) variou consideravelmente entre as amostragens. Na primeira amostragem, foi observada uma curva aproximadamente ortograda para P3; heterograda positiva para P2 e P3, na segunda amostragem; e clinograda para as demais. P1 tende a ter uma distribuição homogênea de OD na coluna d'água, com exceção da segunda amostragem.

Na superfície, os valores de OD atenderam o mínimo de 5 mg/L estabelecidos pela CONAMA 357/2005 para águas de classe 2 nos pontos P2 e P3, mas em média não atenderam em P1, o que coincide com a degradação observada neste ponto. De um modo

geral, a concentração de oxigênio diminui nas profundidades maiores, aproximando-se da anoxia em P3 na segunda e quarta amostragem, e apresentando anoxia completa abaixo de 4,5 m na terceira amostragem. A anoxia observada em P3 na terceira amostragem a partir de 4 metros de profundidade pode ser devida à estratificação mais significativa observada nesta data, conforme discutido anteriormente, o que provoca dificuldade de transporte do oxigênio da superfície para as camadas mais profundas.

Figura 46 – Concentração de oxigênio dissolvido (OD) na coluna d'água, em mg/L, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de $\pm 0,2$ mg/L

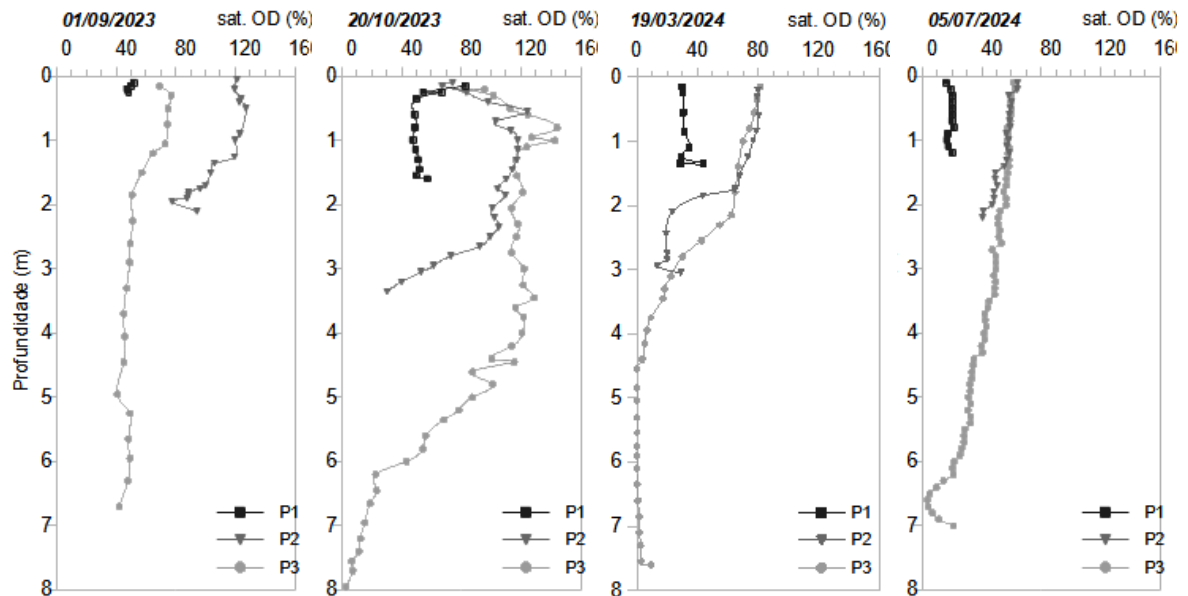


Fonte: A autora (2025).

Na segunda amostragem, houve presença significativa de material verde, provavelmente clorofila, o que pode ser decorrente de uma floração de algas. Esta observação converge com as curvas heterogradas positivas, que acontecem por conta da liberação de oxigênio durante a fotossíntese de uma população elevada de algas, conforme Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008). Além do formato da curva, os valores de oxigênio dissolvido foram altos, o que resulta em mais de 100% de saturação de oxigênio (Figura 47), o que também aconteceu para P2 na primeira amostragem.

Oxigênio dissolvido e pH apresentaram correlação significativa (Pearson: $r=0,787$; $p<0,001$; Spearman: $r=0,815$; $p<0,001$), o que pode estar relacionado à atividade fotossintética de algas, pois há liberação de oxigênio (aumenta OD) e consumo de CO_2 , o que reduz a acidez da água (ou seja, aumenta o pH). Ao passo que nas camadas inferiores ocorre decomposição da matéria orgânica, que consome O_2 , libera CO_2 , acidificando o meio.

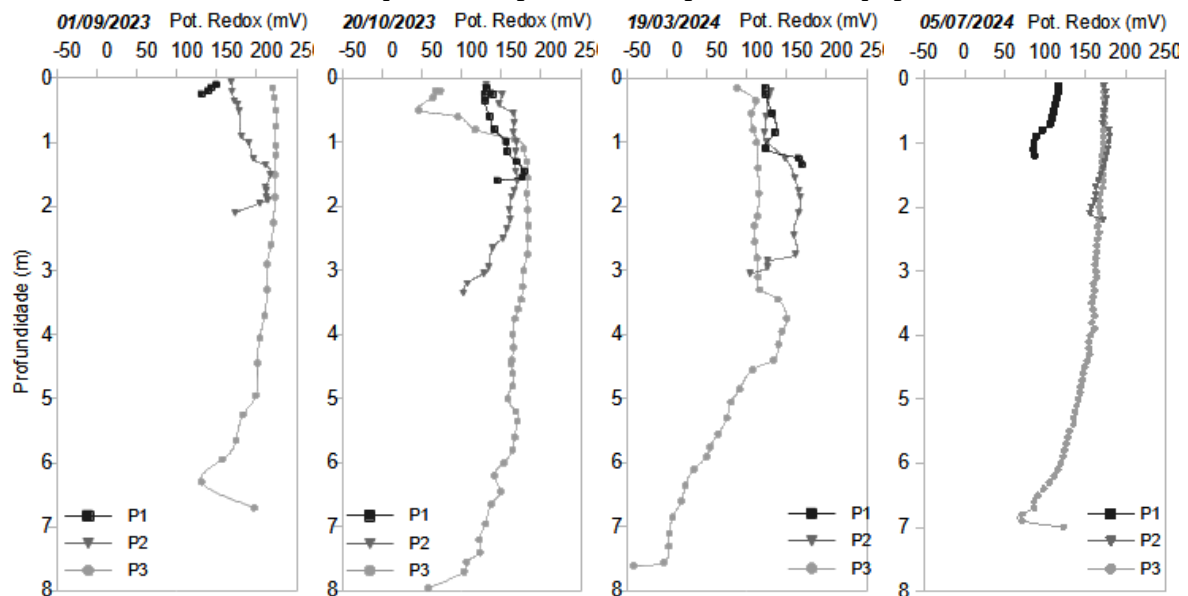
Figura 47 – Saturação de oxigênio dissolvido na coluna d'água, em %, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas



Fonte: A autora (2025).

As curvas de potencial redox (Figura 48) apresentam algumas tendências parecidas com as de oxigênio dissolvido (Figura 46). Na terceira amostragem, na região que apresentou anoxia, foram observados os menores valores de potencial redox, de -42 mV a 150 mV.

Figura 48 – Potencial de óxido-redução na coluna d'água, em mV, nos três pontos amostrados, nas quatro campanhas, com precisão do equipamento de ± 15 mV

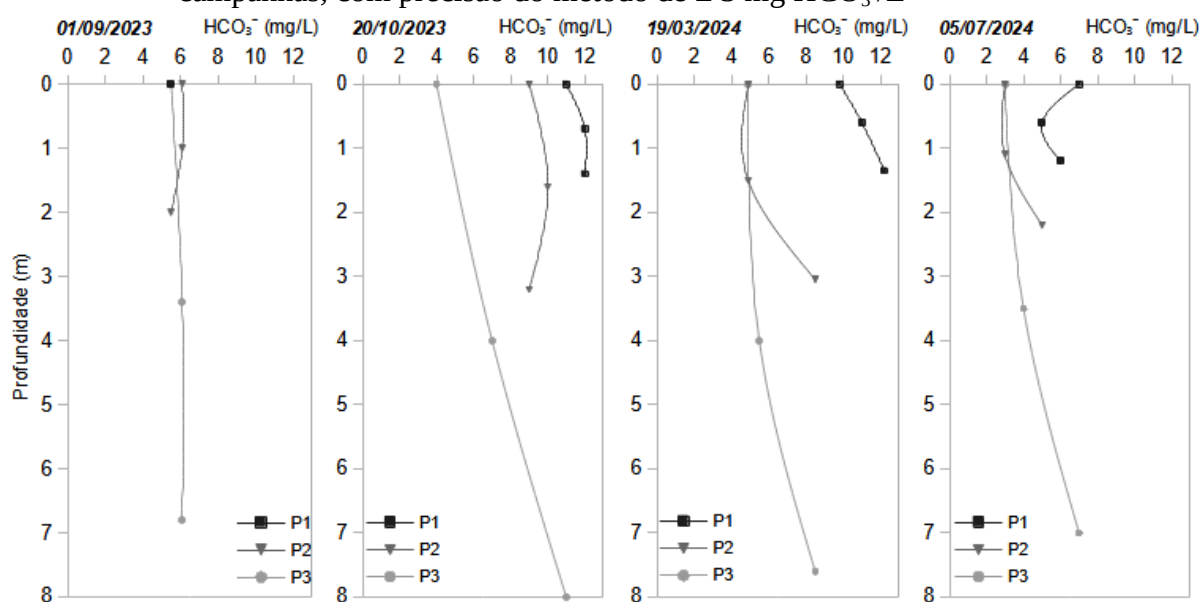


Fonte: A autora (2025).

6.4 DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS ÂNIONS

Na maioria das amostras, a alcalinidade aumentou com a profundidade (Figura 49) e seguiu o comportamento inverso ao observado para o oxigênio dissolvido (Figura 46). Possivelmente, isto ocorre pois a concentração de gás carbônico na coluna d'água é complementar à curva de OD (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2008). Contudo, não foi verificada correlação estatisticamente significativa entre estas variáveis (Pearson: $r=-0,189$; $p=0,283$; Spearman: $r=-0,139$; $p=0,432$).

Figura 49 – Alcalinidade, em $\text{mg HCO}_3^-/\text{L}$, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 3 \text{ mg HCO}_3^-/\text{L}$



Fonte: A autora (2025).

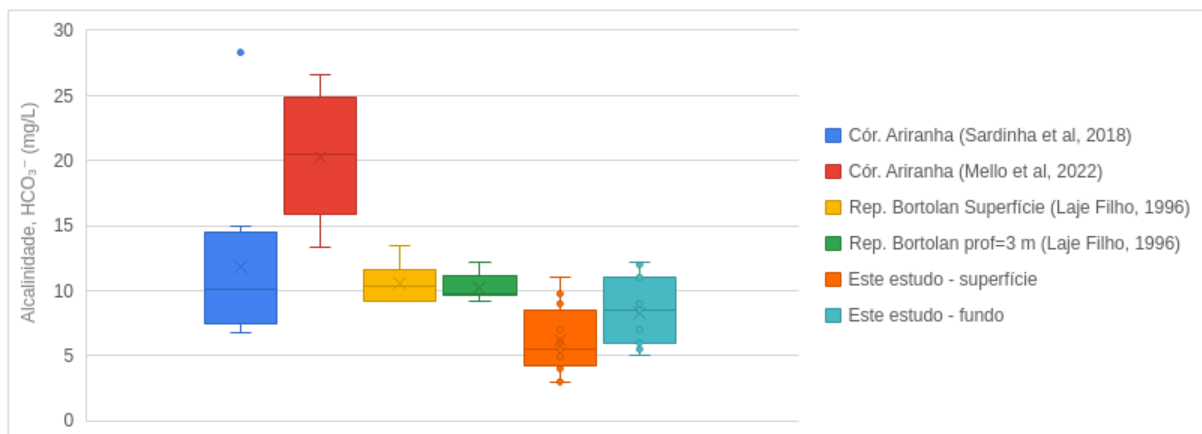
Quando se analisam todos os dados de alcalinidade, o teste de Kruskal-Wallis revelou diferenças entre as coletas ($H=12,08$; $p=0,007$) e entre os pontos ($H=6,8511$; $p=0,033$). Analisando apenas os dados de P3, há diferença entre as profundidades ($H=7,138$; $p=0,028$).

Comparando com a literatura, em geral os valores de alcalinidade para o reservatório Bortolan foram menores que os observados por Laje Filho (1996) e também inferiores ao córrego Ariranha, conforme apresentado na Figura 50. Nas águas superficiais de Poços de Caldas, Costa, Carmo e Delgado (2001) encontraram média de $11,48 \text{ mg HCO}_3^-/\text{L}$.

Laje Filho (1996) classificou os valores de alcalinidade como baixos em seu estudo ao longo do ribeirão das Antas e afluentes, o que pode resultar em uma baixa capacidade tamponante e maior susceptibilidade a flutuações de pH diante da entrada de poluentes ácidos. Em conjunto à análise de sedimentos, com elevada concentração de alumínio e silicato, o autor atribuiu estes valores à lixiviação de minerais aluminossilicatos, que são componentes

de argilas, muito presentes no planalto de Poços de Caldas.

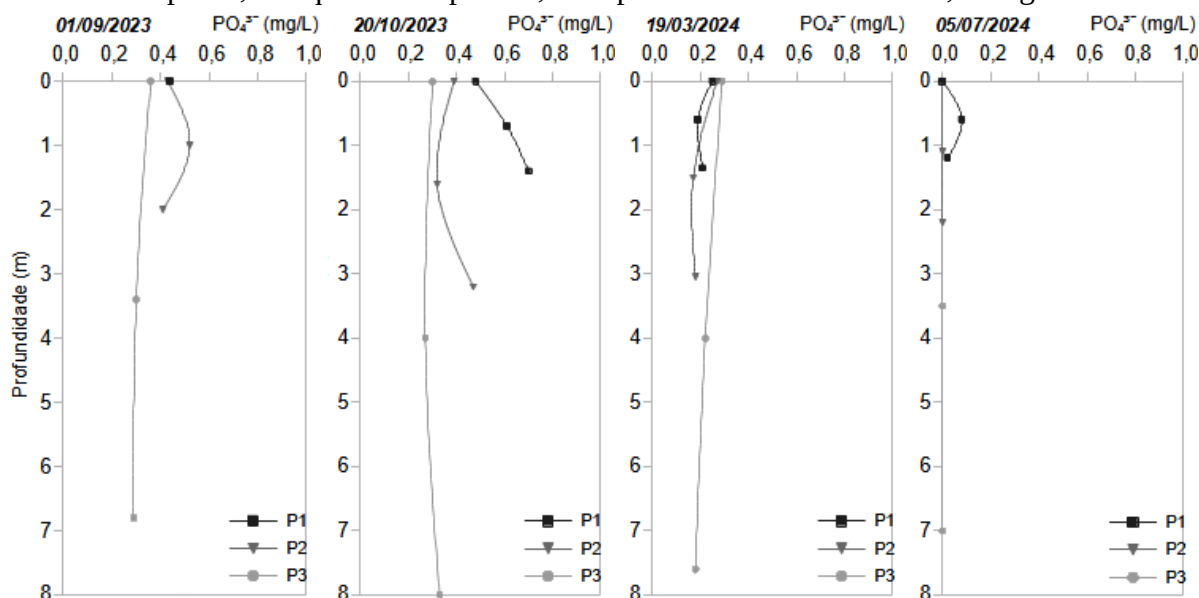
Figura 50 – Valores de alcalinidade ($\text{mg HCO}_3^-/\text{L}$) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Em geral, a concentração de fosfato na coluna d'água foi uniforme com a profundidade (Teste de Kruskal-Wallis, $H=0,33$; $p=0,848$) e diminuiu ao longo do período analisado (Teste de Kruskal-Wallis, $H=28,14$; $p<0,001$), conforme se observa na Figura 51.

Figura 51 – Concentração de fosfato dissolvido, em mg/L , em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,05 \text{ mg/L}$



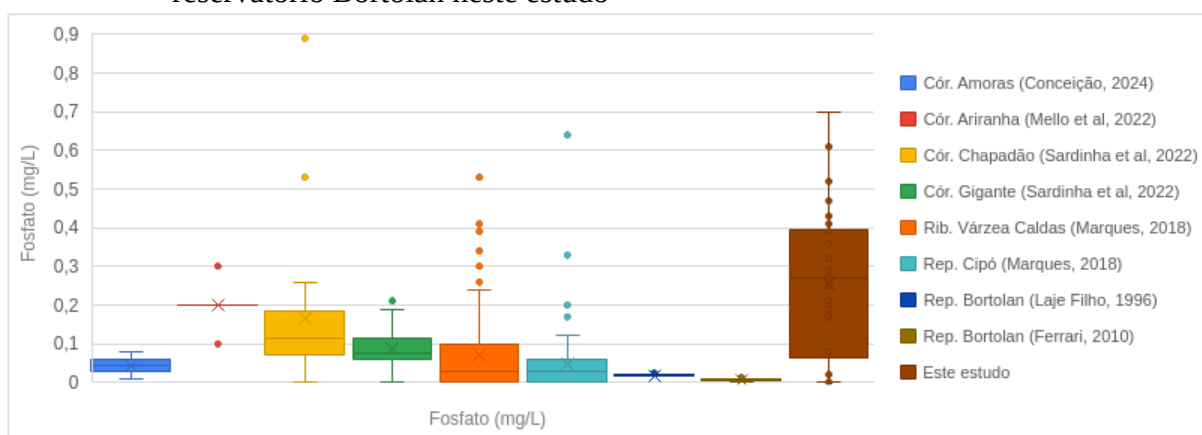
Fonte: A autora (2025).

Possivelmente, grande parte deste fosfato era proveniente do córrego Amoras, que recebeu lançamento de esgoto em virtude de estação elevatória inoperante, resultando em concentração de fosfato de $13,80 \text{ mg/L}$ próximo ao local de despejo (Sardinha *et al.*, 2023). Esta falha na elevatória foi solucionada em outubro de 2023, o que pode ter refletido na

diminuição gradual deste nutriente no reservatório nas campanhas posteriores, comportamento também observado em monitoramento do DME, que em local próximo a P3 encontrou concentração de fósforo total de 0,030 mg/L em maio, 0,037 mg/L em agosto, mas inferior a 0,01 mg/L em novembro.

Os valores de fosfato em alguns dos afluentes do reservatório Bortolan são bastante distintos, conforme apresentado na Figura 52. Marques (2018) apresenta 0,13 mg/L na estação chuvosa e 0,05 mg/L na estação seca no ribeirão das Vargens, já na represa do Cipó apresentou 0,08 mg/L na estação chuvosa e 0,03 mg/L na seca. Conceição *et al.* (2024), estudando o córrego Amoras em 2016 encontraram 0,05 mg/L, enquanto Mello *et al.* (2022) estudando o córrego Ariranha no mesmo período encontraram 0,2 mg/L. Isto mostra que o reservatório recebe contribuições variadas de fosfato de seus tributários.

Figura 52 – Valores de fosfato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

A legislação estabelece limites em termos de fósforo total, que não foi determinado neste projeto. Contudo, a concentração de fosfato foi convertida em fósforo para fins de comparação, conforme apresentado na Tabela 14, onde se observa que apenas a fração de fósforo solúvel já supera o limite de 0,050 mg/L de fósforo total permitida para água de classe 2 em ambiente intermediário (tempo de residência entre 2 e 40 dias), nas três primeiras amostragens.

Observa-se também que os pontos mais eutrofizados foram P1 e P2, com diminuição gradual até P3. Possivelmente, o fosfato sofreu processos químicos que causaram sua precipitação ao longo do percurso do reservatório, o que está de acordo com Kennedy e Walker (1990), que explicam que à medida que a água flui em direção à barragem, as concentrações deste nutriente geralmente diminuem devido a processos de sedimentação, criando gradientes longitudinais. No entanto, no Teste de Kruskal-Wallis, os três pontos não

apresentam diferenças significativas ($H=0,75$; $p=0,687$).

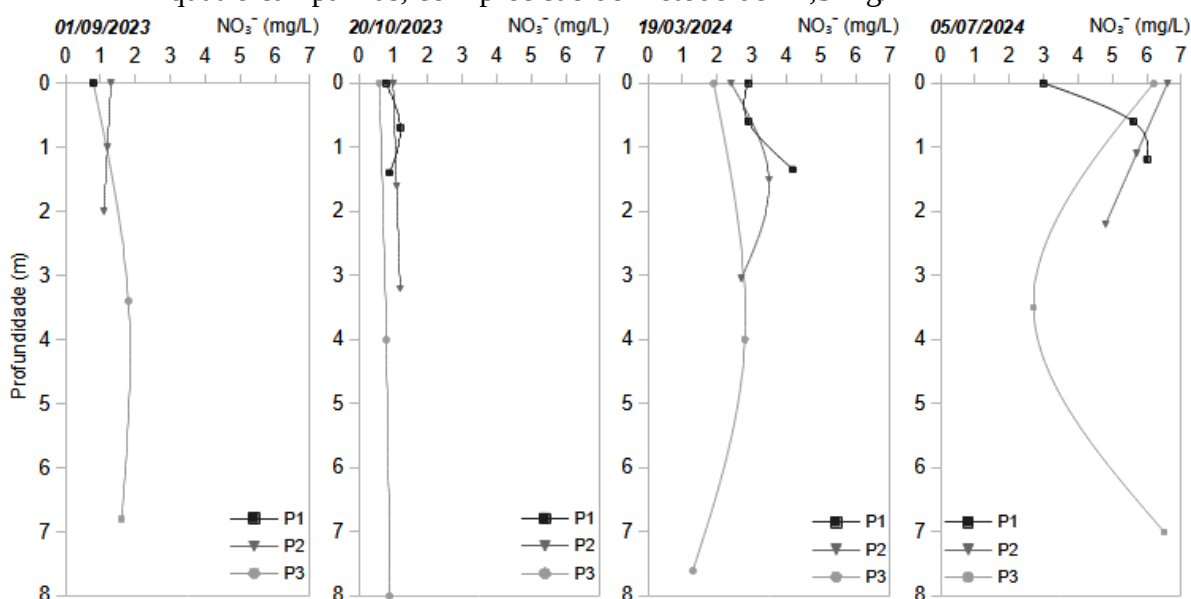
Tabela 14 – Concentração média de fósforo proveniente de fosfato dissolvido ($P-PO_4^{3-}$), em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas

Ponto	09/2023	10/2023	03/2024	07/2024
P1	0,145	0,19±0,04	0,07±0,01	0,01±0,01
P2	0,15±0,02	0,13±0,02	0,07±0,02	0,000
P3	0,10±0,01	0,10±0,01	0,07±0,02	0,000
Média	0,13±0,03	0,14±0,05	0,07±0,01	0,00±0,01

Fonte: A autora (2025).

A concentração de nitrato na coluna d'água apresentou comportamentos variados, conforme Figura 53. Os valores foram menores na primeira e na segunda amostragem e maiores nas últimas, portanto possivelmente não apresentando relação com a pluviosidade. O Teste de Kruskal-Wallis confirma esta diferença temporal ($H=27,15$; $p<0,001$) e não mostra diferença significativa entre profundidade ($p=0,676$) nem entre os pontos ($p=0,719$).

Figura 53 – Concentração de nitrato, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 1,3$ mg/L

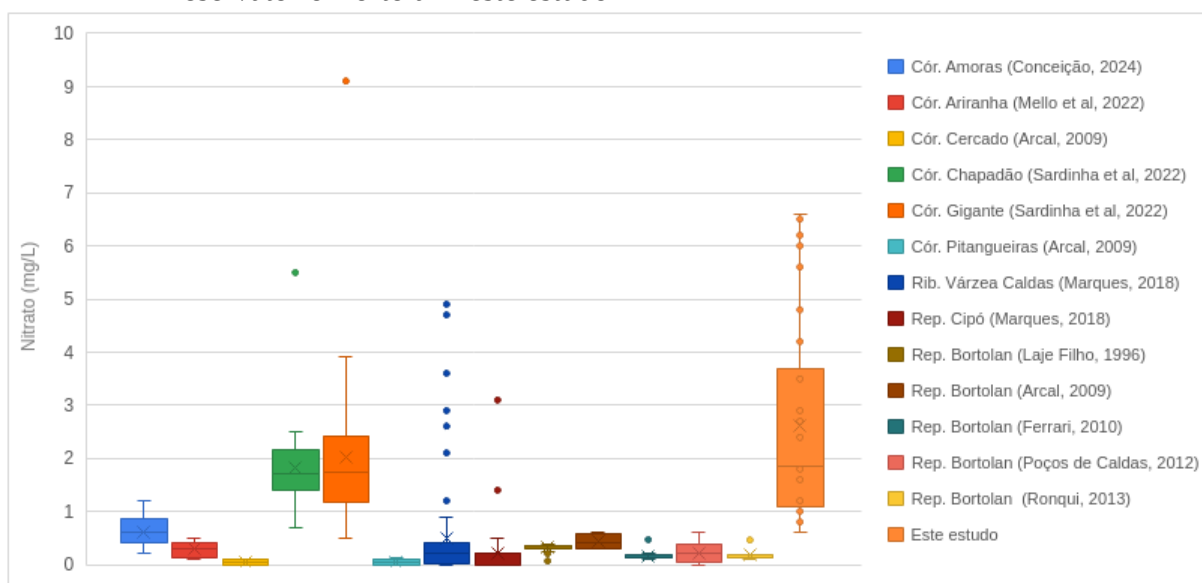


Fonte: A autora (2025).

Os dados de concentração de nitrato apresentaram dispersão maior que estudos anteriores na represa do Bortolan e na bacia das Antas, como ilustrado na Figura 54, onde também é possível observar que a concentração média encontrada neste estudo (2,6 mg/L) foi superior às médias anteriores. Tundisi, J. G. e Tundisi, T. M. (2008) apontam como fontes de nitrato a fertilização do solo e o despejo de esgotos domésticos. Como já mencionado, as duas primeiras amostragens estiveram sob forte influência de contaminação por esgoto,

apresentando média 1,1 mg/L, que também é um valor superior a estudos anteriores, porém não tão distantes quanto nas últimas amostragens (4,0 mg/L), onde a influência de esgotos parece ter sido menor. Diante disso, a contaminação pode ser proveniente de fertilização do solo ou outras fontes indeterminadas.

Figura 54 – Valores de nitrato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Com relação à resolução Conama 357/2005, todas as amostras atendem ao limite de 10 mg N-NO₃⁻/L estabelecido para águas de classe 2, conforme apresentado na Tabela 15.

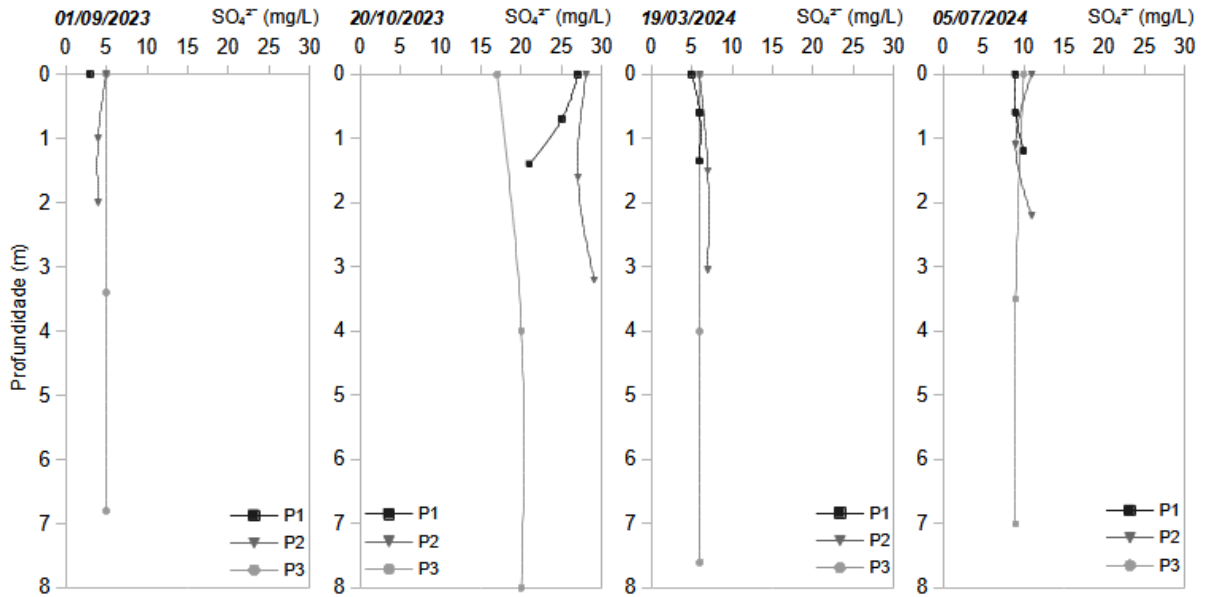
Tabela 15 – Concentração média de nitrogênio do nitrato dissolvido (N-NO₃⁻), em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas

Ponto	09/23	10/23	03/24	07/24
P1	0,181	0,22±0,05	0,8±0,2	1,1±0,4
P2	0,27±0,02	0,25±0,02	0,6±0,1	1,3±0,2
P3	0,3±0,1	0,17±0,03	0,5±0,2	1,2±0,5
média	0,28±0,09	0,21±0,05	0,6±0,2	1,9±0,3

Fonte: A autora (2025).

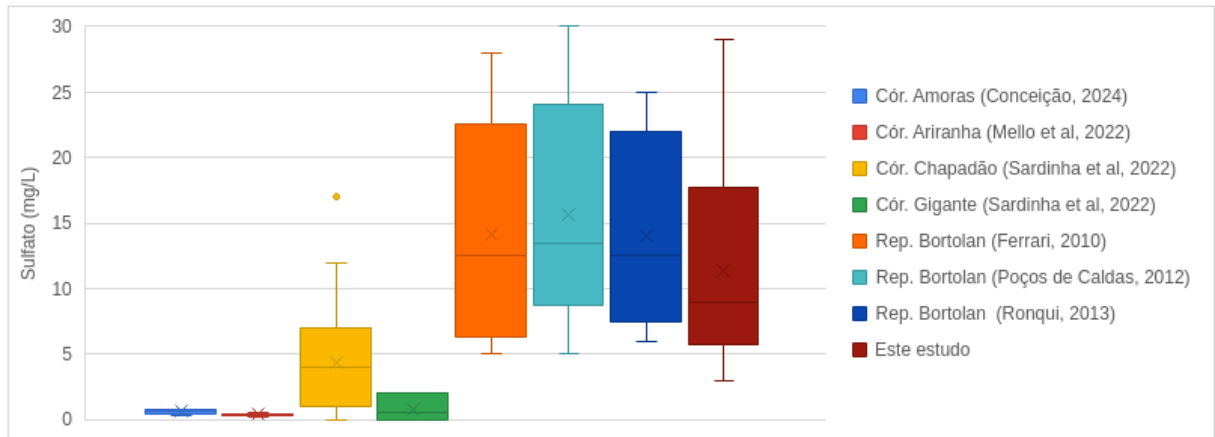
A concentração de sulfato variou significativamente entre as amostragens (teste de Kruskal-Wallis: H=30,97; p<0,001), conforme Figura 55. Com exceção da segunda amostragem, os perfis apresentaram distribuição vertical e horizontal uniformes. Os valores observados estão em conformidade com estudos anteriores no reservatório Bortolan, conforme apresentado na Figura 56, no entanto, são bastante superiores aos observados em seus tributários.

Figura 55 – Concentração de sulfato, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,5$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Figura 56 – Valores de sulfato (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



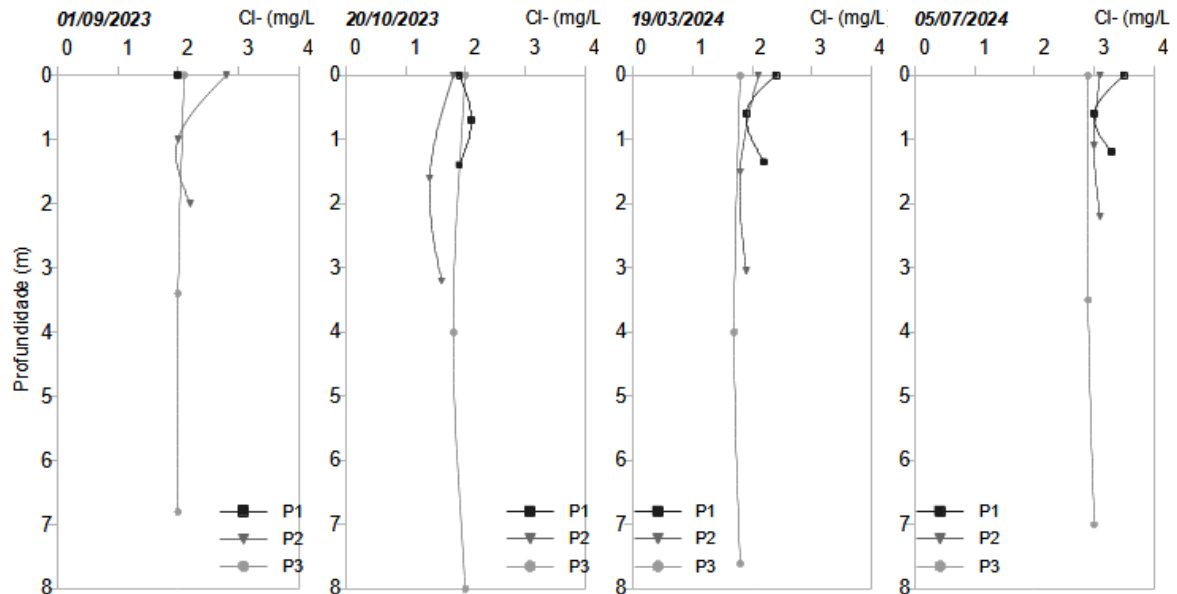
Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Segundo Esteves (2011), a concentração de sulfato nas represas brasileiras é inferior a 1 mg/L em regiões que não apresentam rochas sulfatadas, mas podem superar 20 mg/L se sujeitos à contaminação por esgotos, o que pode explicar os valores elevados que foram observados no reservatório Bortolan, especialmente na segunda amostragem, pois conforme já mencionado, o reservatório esteve sujeito a lançamento de esgoto neste período. No já citado monitoramento do córrego das Amoras realizado por Sardinha *et al.* (2023), próximo ao local de despejo de esgoto, a concentração de sulfato foi de 92 mg/L.

A concentração de cloreto foi uniforme na coluna d'água (teste de Kruskal-Wallis: $H=1,41$, $p=0,495$), como apresentado na Figura 57. Os valores foram similares nas três

primeiras amostragens (2,0 mg/L), mas maior na quarta amostragem (3,1 mg/L), o que parece estar relacionado à seca mais acentuada do período. O teste de Kruskal-Wallis apontou diferenças significativas entre as amostragens ($H=22,77$; $p<0,001$).

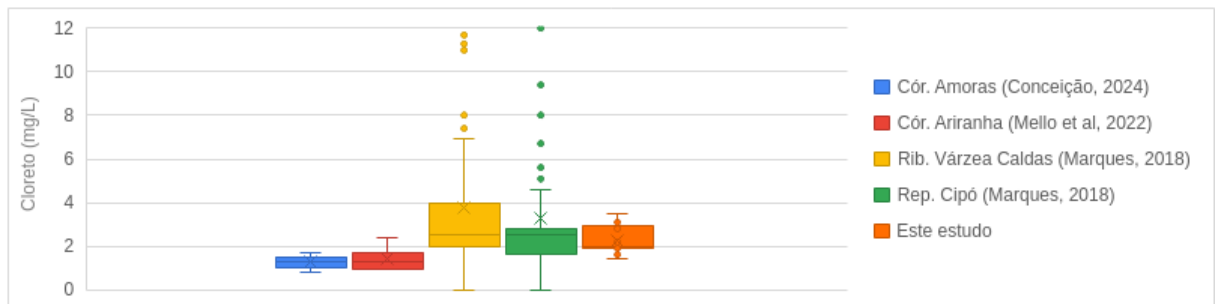
Figura 57 – Concentração de cloreto, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,5$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Marques (2018) também encontrou relação entre cloreto e a precipitação, observando 4,37 mg/L na seca e 2,80 mg/L na estação chuvosa no ribeirão das Vargens, e na represa do Cipó apresentou 3,79 mg/L e 2,63 mg/L, respectivamente.

Figura 58 – Valores de cloreto (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



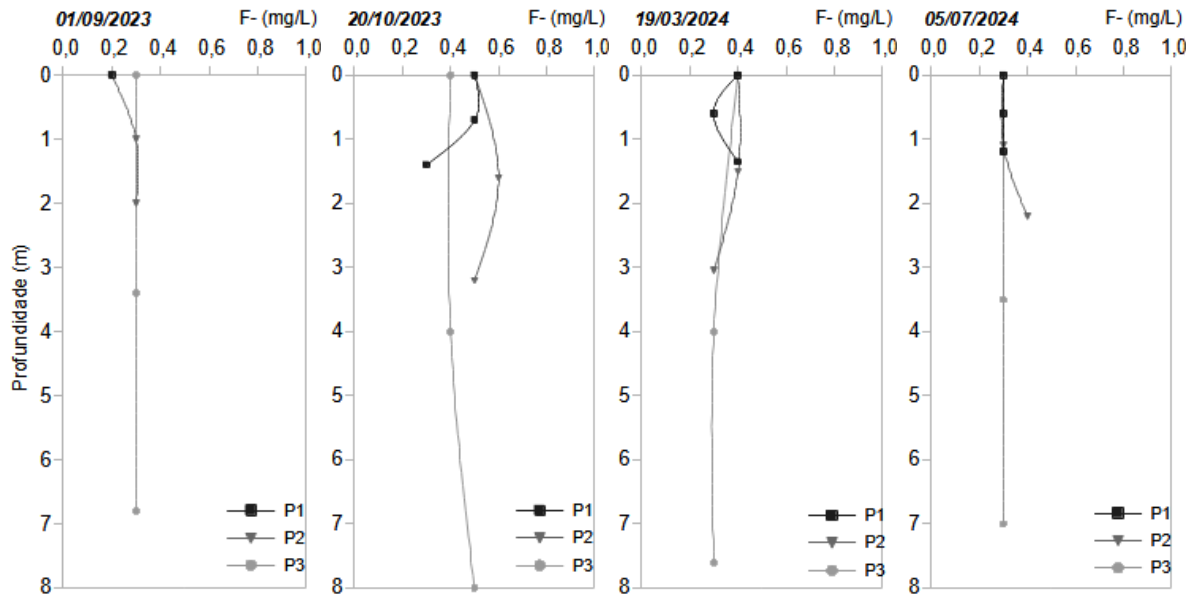
Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

A média de cloreto deste estudo, 2,3 mg/L, foi um pouco superior à literatura, conforme Figura 58. Costa, Carmo e Delgado (2001) encontraram média de concentração de cloreto de 1,65 mg/L para as águas superficiais de Poços de Caldas. Mello *et al.* (2022) apresenta 1,5 mg/L para o córrego Ariranha e Conceição *et al.* (2024) determinou 1,2 mg/L para o córrego Amoras. Em comparação com a resolução CONAMA 357/2005, o valor é

muito inferior ao limite de 250 mg/L para águas de classe 2.

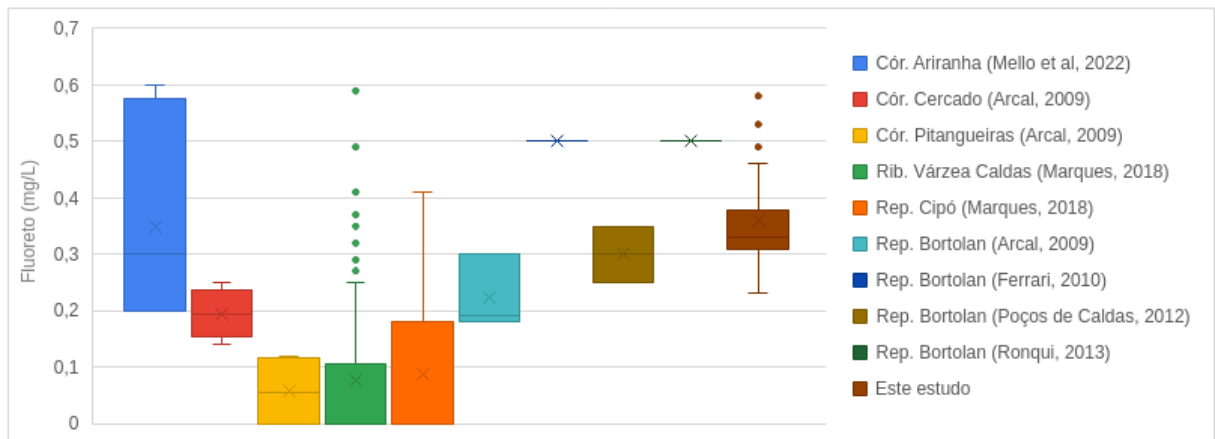
A concentração de fluoreto foi maior na estação chuvosa (0,42 mg/L) e menor na estação seca (0,29 mg/L), o que gera uma diferença estatisticamente significativa no teste de Kruskal-Wallis ($H=20,39$; $p<0,001$). Utilizando o mesmo teste, verifica-se uniformidade vertical ($H=0,01$; $p=0,997$) e horizontal ($H=0,56$; $p=0,757$). Também se observa na Figura 59 que os valores são ainda mais uniformes durante a estação seca.

Figura 59 – Concentração de fluoreto, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,04$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Figura 60 – Valores de fluoreto (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

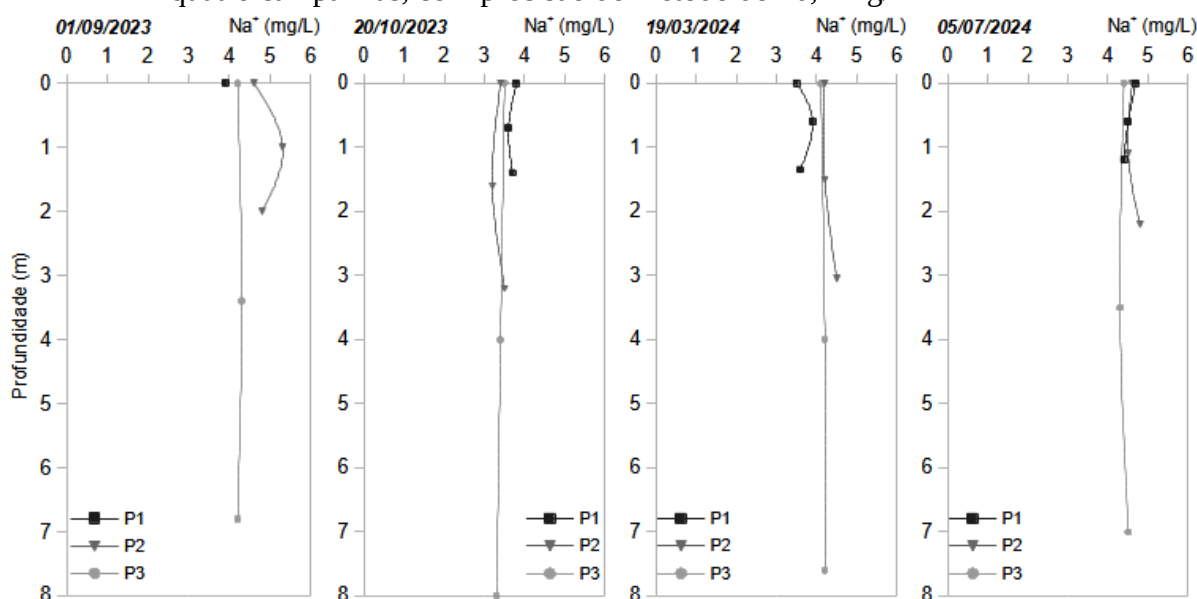
Em estudos anteriores na represa Bortolan, foram encontrados valores variados de fluoreto, conforme Figura 60. O valor médio do presente estudo, 0,36 mg/L, é parecido ao encontrado pela Comissão das Águas, 0,3 mg/L (Poços de Caldas, 2012). No entanto, são

bastante superiores aos do ribeirão das Vargens (0,075 mg/L) e da represa do Cipó (0,08 mg/L na seca e 0,11 mg/L na estação chuvosa), conforme Marques (2018). Os valores encontrados estão abaixo da concentração de 1,40 mg/L estabelecida pela resolução Conama 357/2005 para águas de classe 2.

6.5 DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS CÁTIONS

As concentrações de sódio e potássio apresentaram distribuição uniforme quanto à profundidade (teste de Kruskal-Wallis, sódio: $H=0,17$, $p=0,92$; potássio: $H=0,31$, $p=0,857$) e entre os pontos (teste de Kruskal-Wallis, sódio: $H=2,86$, $p=0,239$; potássio: $H=1,81$, $p=0,405$) como pode ser observado nas Figuras 61 e 62. Entre as coletas, o teste de Kruskal-Wallis aponta diferenças significativas (sódio: $H=23,65$, $p<0,001$; potássio: $H=27,57$, $p<0,001$).

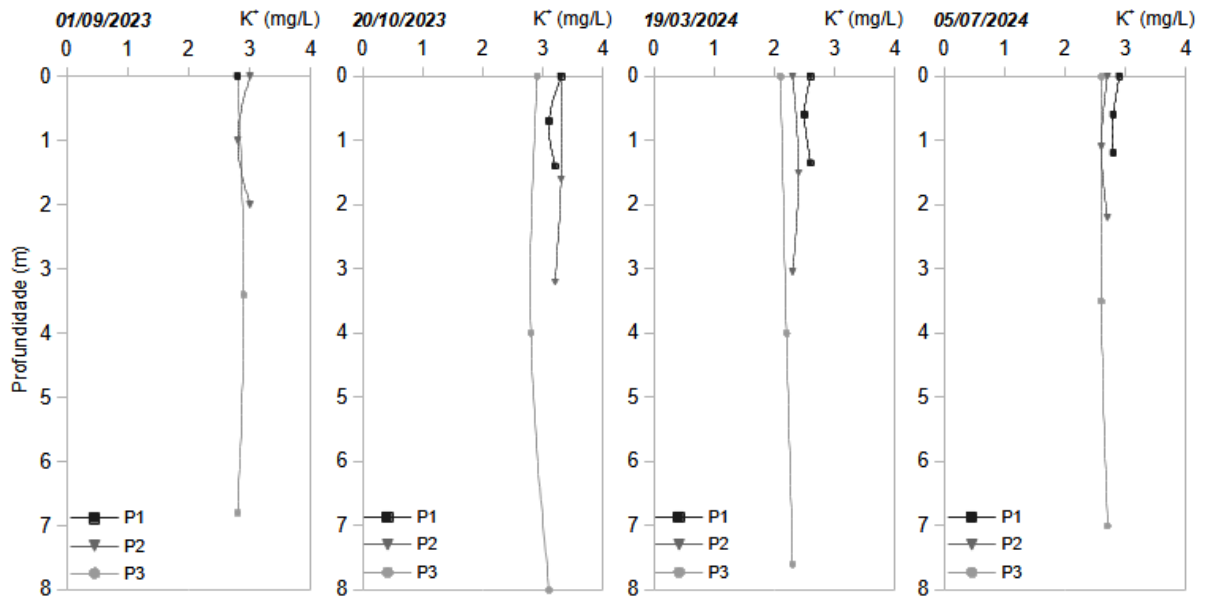
Figura 61 – Concentração de sódio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,1$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

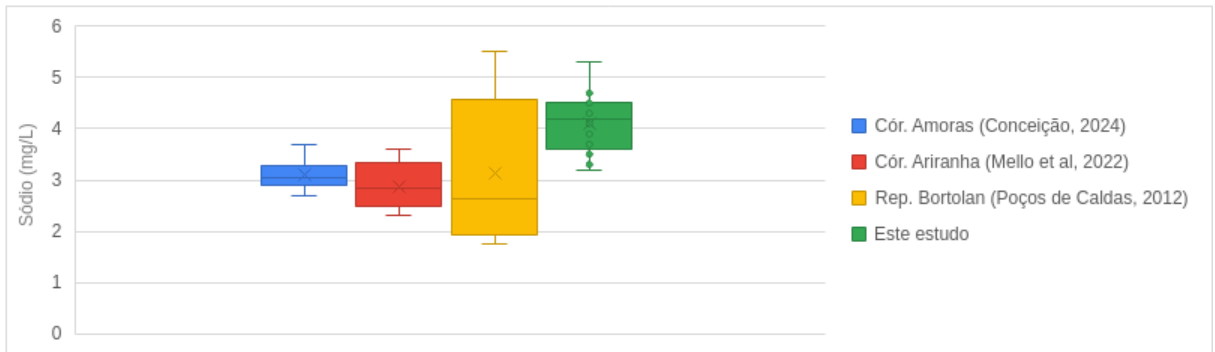
Os valores estão de acordo com a faixa apresentada pela CETESB (2023) de 1 a 10 mg/L para sódio e inferior a 10 mg/L para potássio. Comparando com Costa (2001), os valores são maiores que a média das águas superficiais de Poços de Caldas (0,64 mg/L de sódio e 1,53 mg/L de potássio). Comparando com Mello *et al.* (2022) e Conceição *et al.* (2024) para os córregos Ariranha e Amoras, as concentrações na represa foram maiores, como pode ser observado nas Figuras 63 e 64. Uma hipótese para esta diferença pode estar relacionada à diferença nos solos drenados pelo ribeirão das Antas, que provavelmente contribuiu mais significativamente com estes elementos.

Figura 62 – Concentração de potássio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,1$ mg/L



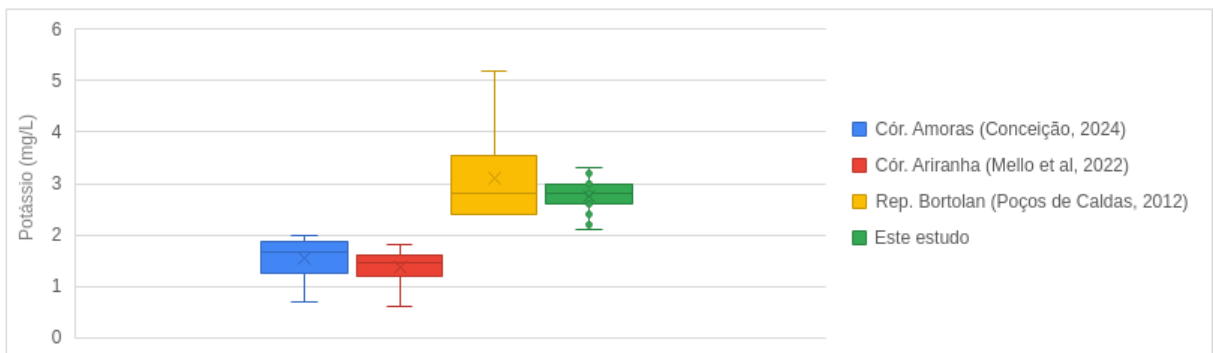
Fonte: A autora (2025).

Figura 63 – Valores de sódio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Figura 64 – Valores de potássio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo

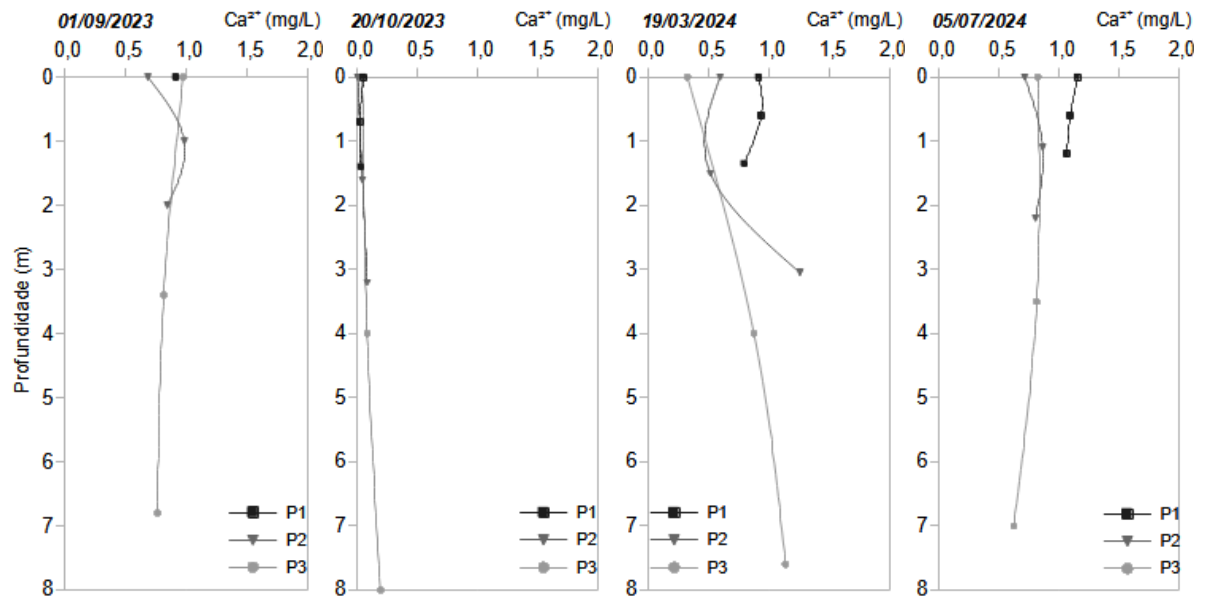


Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

A concentração de cálcio foi significativamente menor na segunda amostragem, como pode ser observado na Figura 65. A segunda amostragem foi sujeita à precipitação mais

elevada nos 5 dias anteriores (18,4 mm), o que pode ter provocado a diluição deste composto. Contudo, a água de chuva coletada a 4,5 km do reservatório Bortolan, por Conceição *et al.* (2024), apresenta em média 0,9 mg/L de cálcio, o que provocaria aumento da concentração deste elemento no reservatório.

Figura 65 – Concentração de cálcio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,03$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Outra hipótese para a baixa concentração de cálcio na segunda amostragem é a precipitação como sulfato de cálcio (solubilidade em água de 0,20 g/100 mL, conforme DEAN, 1999), visto que o sulfato apresentou concentração elevada nesta amostragem (Pearson: $r=-0,83$).

Figura 66 – Valores de cálcio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



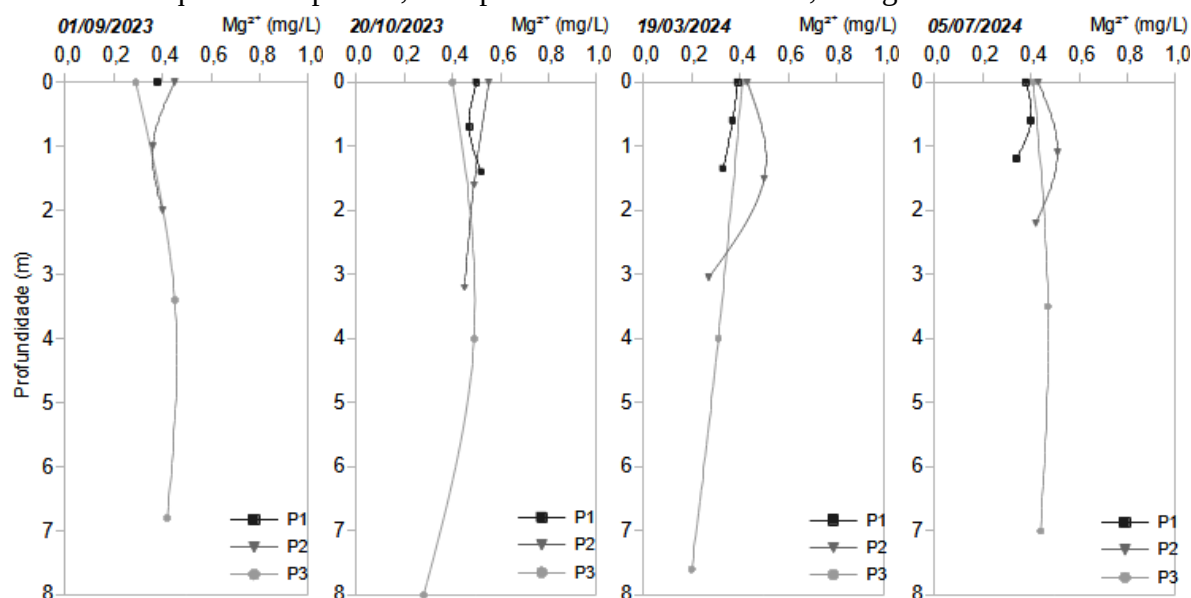
Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Nas águas superficiais de Poços de Caldas, Costa, Carmo e Delgado (2001)

apresentam média de 2,14 mg/L de cálcio. Nos córregos Amoras e Ariranha, a concentração foi superior a este estudo (Figura 66). A diferença com os dados do estudo da Comissão das Águas (Poços de Caldas, 2012) no reservatório provavelmente se deve à diferença de metodologia, pois foi analisada a água bruta enquanto em neste estudo foi analisada a fração dissolvida.

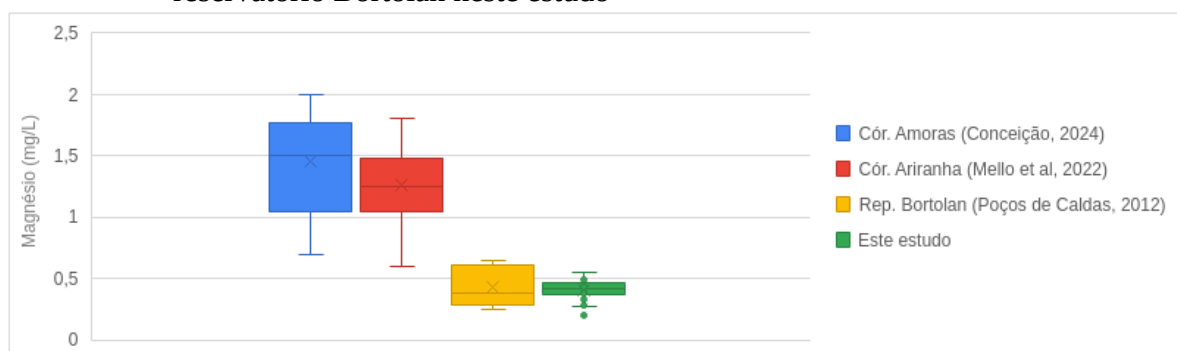
Com relação ao magnésio, o comportamento foi uniforme entre as amostragens e observou-se diminuição com a profundidade em algumas amostras, conforme Figura 67. Ao contrário do cálcio, não foi observada relação com o sulfato, visto que a solubilidade do sulfato de magnésio é elevada em água (27,2 g/100 mL, de acordo com DEAN, 1999).

Figura 67 – Concentração de magnésio, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,02$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Figura 68 – Valores de magnésio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

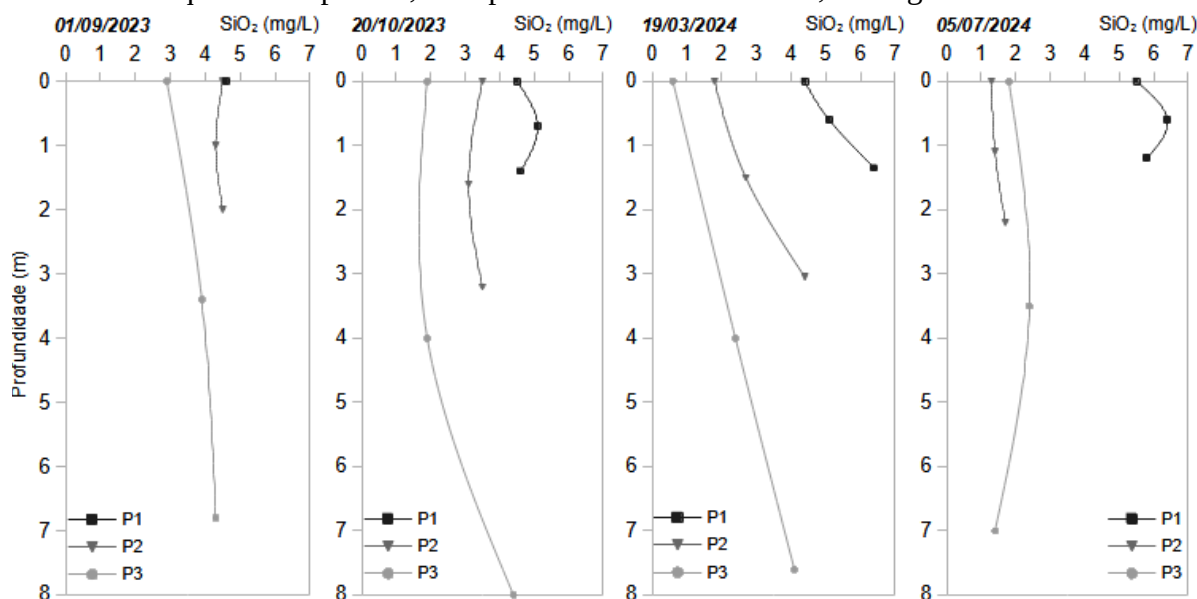
Os dados deste trabalho apresentaram valores semelhantes aos encontrados por Poços

de Caldas (2012), que teve a concentração de cálcio na maioria das amostras em torno de 0,40 mg/L. Comparando com a literatura, os valores foram menores: Costa, Carmo e Delgado (2001) apresenta 0,88 mg/L para águas superficiais de Poços de Caldas; Mello *et al.* (2022), 1,1 mg/L no córrego Ariranha e Conceição *et al.* (2024), 1,4 mg/L no córrego Amoras.

6.6 DISTRIBUIÇÃO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS

A concentração de sílica dissolvida foi menor na superfície, como mostrado na Figura 69, em concordância com o que foi dito por Esteves (2011). Os valores foram bastante diversos, tendo apresentado as maiores concentrações em P1. O teste de Kruskal-Wallis não indica diferença entre as coletas ($H=1,93$; $p=0,587$) nem entre as profundidades ($H=1,49$; $p=0,474$), mas mostra diferença significativa entre os pontos amostrados ($H=19,58$; $p<0,001$). Possivelmente a concentração de sílica diminui ao longo do reservatório por processos de sedimentação devido à diminuição da turbulência, além do consumo por diatomáceas.

Figura 69 – Concentração de sílica, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,025$ mg/L



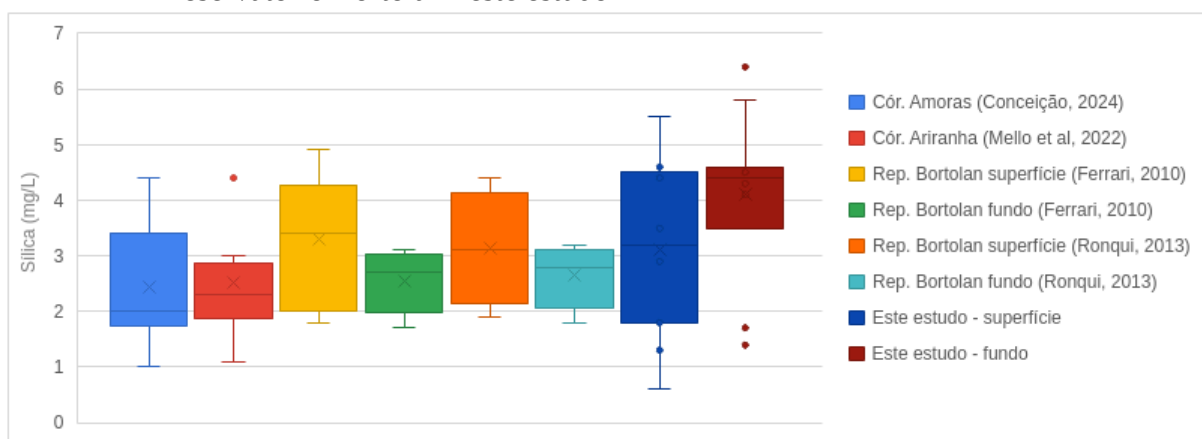
Fonte: A autora (2025).

Aparentemente, não houve correlação entre a concentração de sílica e a pluviosidade. Também não foi observada correlação significativa com os demais parâmetros estudados neste trabalho.

Comparando-se com a literatura para as bacias da região, encontram-se valores similares, como apresentado na Figura 70. Mello *et al.* (2022) determinou média de sílica de 2,6 mg/L para o córrego Ariranha. Conceição *et al.* (2024) obteve resultados parecidos para o

córrego Amoras, com média de 2,4 mg/L. Os estudos de Ferrari (2010) e Ronqui (2013) encontraram médias similares entre superfície e fundo do do reservatório Bortolan na região lacustre, porém a dispersão dos dados superficiais é maior. No caso do presente estudo, a dispersão é maior por conta das diferenças horizontais, já comentadas.

Figura 70 – Valores de sílica (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

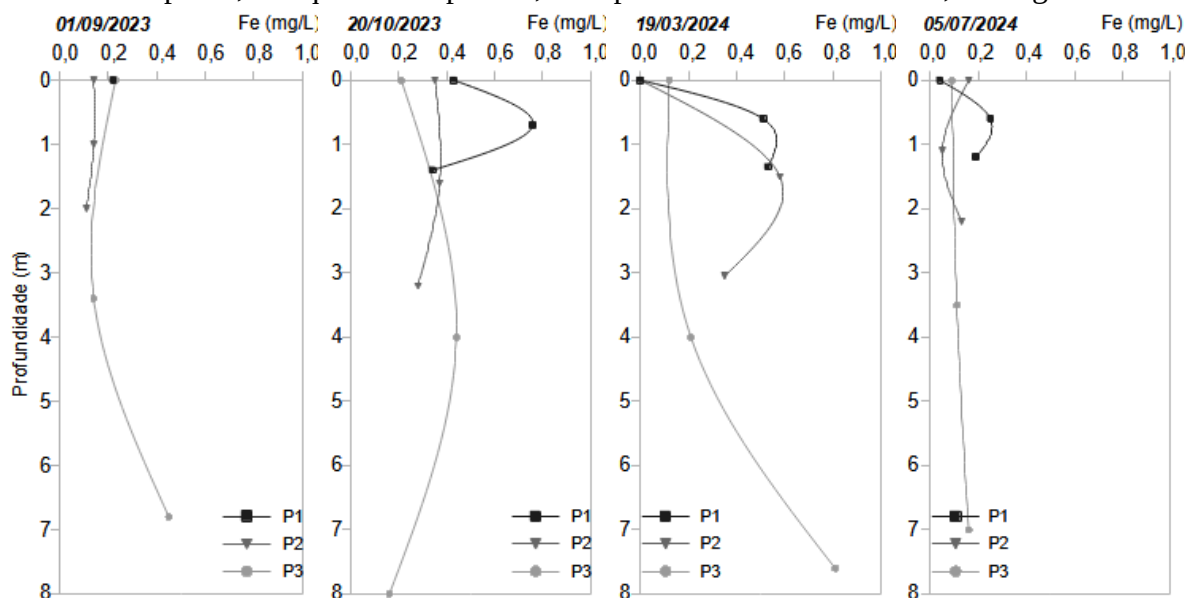
As concentrações de ferro total e manganês foram maiores no período chuvoso, conforme apresentado nas Figuras 71 e 72. A chuva ocasiona drenagem dos solos, que no caso de Poços de Caldas são ricos nestes elementos (Poços de Caldas, 2012). Na segunda amostragem, sujeita a maior precipitação nos cinco dias anteriores (18,4 mm), foi observada a maior concentração superficial para os dois elementos. Estas diferenças sazonais refletiram no teste de Kruskal-Wallis para as amostragens, que apresentou $H=12,18$ e $p=0,007$ para manganês, e $H=9,35$, $p=0,025$ para ferro total.

Apesar da seca na primeira amostragem, ferro e manganês foram encontrados em concentrações mais elevadas no fundo do reservatório em P3, o que pode estar relacionado ao menor pH nesta região, o que favorece a dissolução destes metais. O mesmo não foi observado na última amostragem pois o pH foi relativamente constante na ocasião devido a ausência de estratificação térmica. Hem (1985) destaca ainda que o fundo de lagos e reservatórios pode ser enriquecido com matéria orgânica, o que pode favorecer a solubilização destes metais.

Em estudos anteriores, as concentrações de ferro no reservatório Bortolan foram diversas, conforme apresentado na Figura 73. Nos afluentes, Marques (2018) encontrou concentrações de ferro de 1,52 mg/L no ribeirão das Vargens e 0,95 mg/L no reservatório do Cipó na época chuvosa, já na fase seca os valores foram 1,19 mg/L e 0,51 mg/L, respectivamente. No córrego Ariranha, Mello *et al.* (2022) determinou 0,8 mg/L. Nas águas

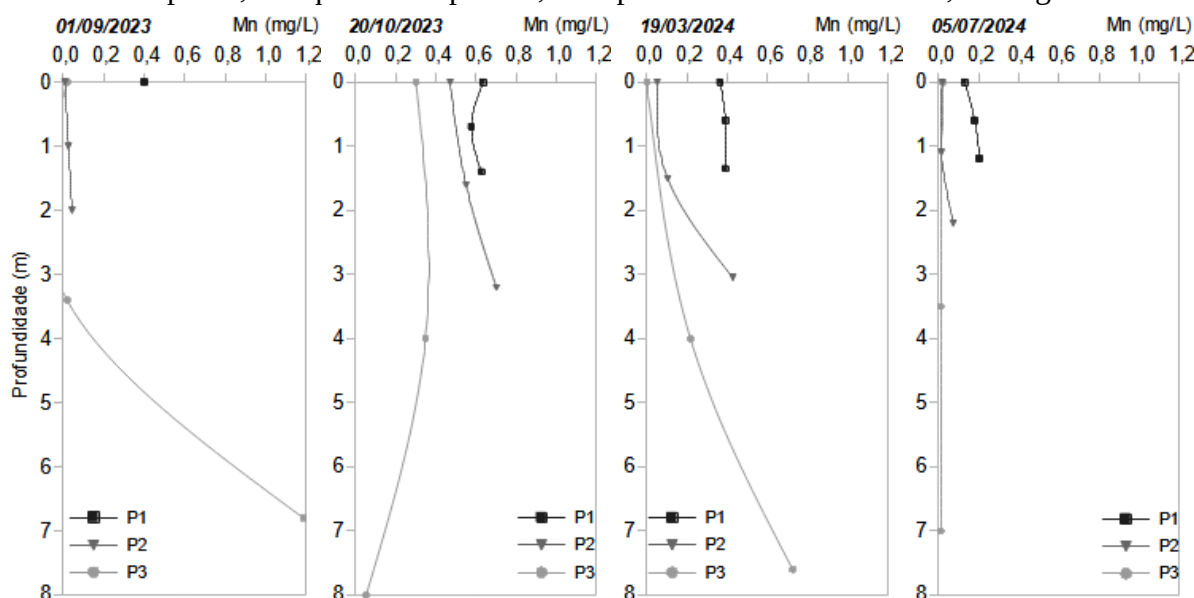
superficiais de Poços de Caldas, Costa, Carmo e Delgado (2001) apresentaram média de 0,81 mg/L, com mínimo de 0,11 mg/L e máximo de 2,0 mg/L.

Figura 71 – Concentração de ferro solúvel total, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,017$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

Figura 72 – Concentração de manganês solúvel, em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,013$ mg/L

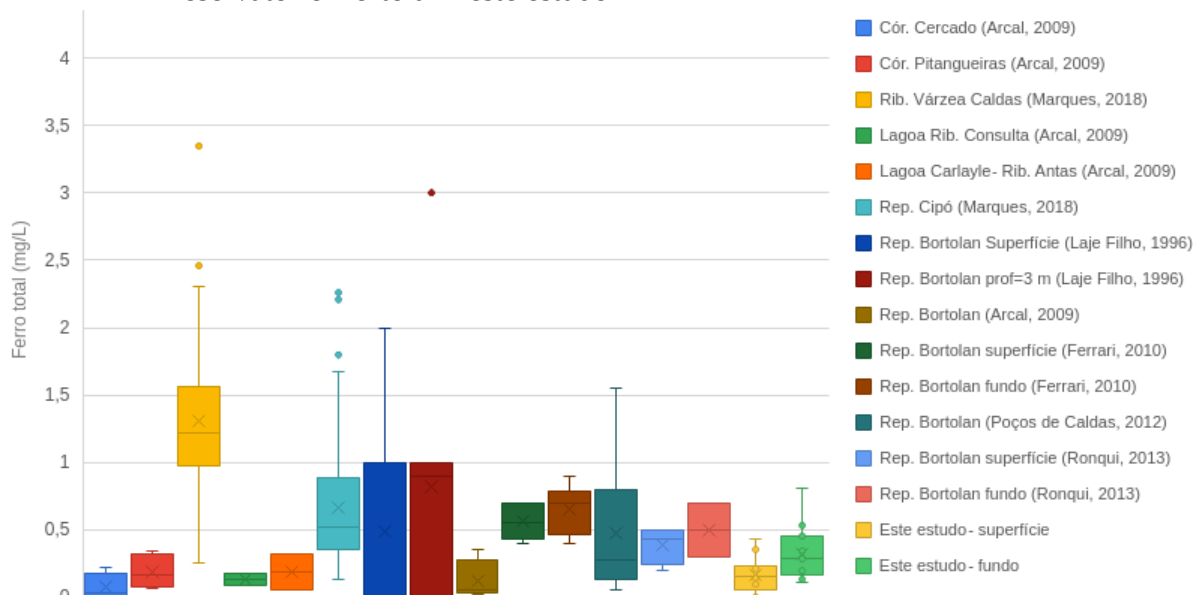


Fonte: A autora (2025).

Os valores de manganês encontrados anteriormente no reservatório Bortolan também foram variados, conforme apresentado na Figura 74. Com relação aos tributários, no estudo de Marques (2018), a concentração de manganês no ribeirão das Vargens foi 0,57 mg/L no período chuvoso e 0,53 mg/L na seca, já no reservatório do Cipó os valores foram,

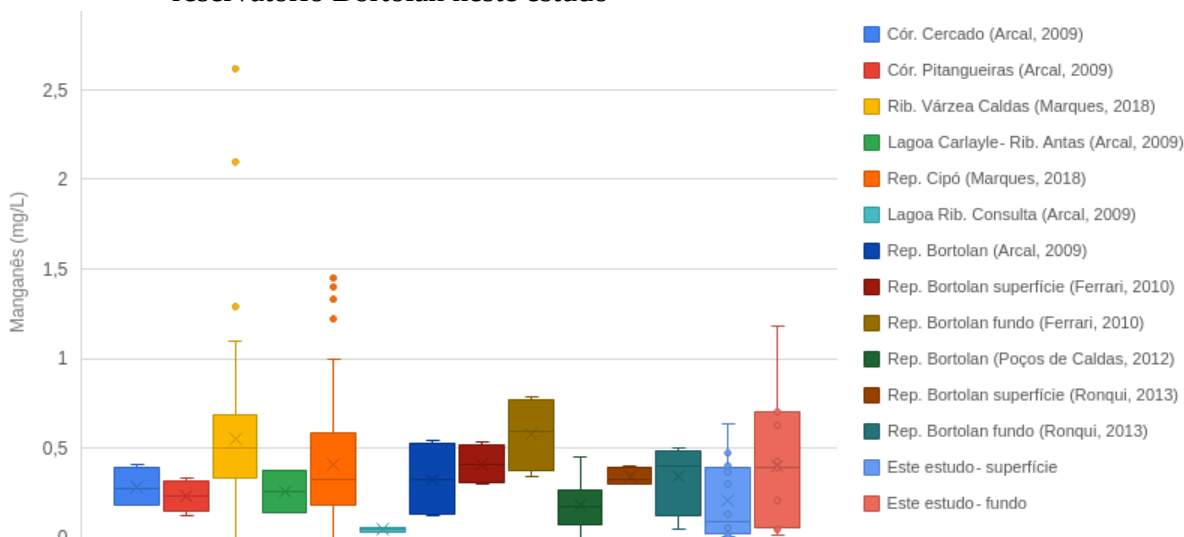
respectivamente, 0,53 mg/L e 0,32 mg/L.

Figura 73 – Valores de ferro total (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Figura 74 – Valores de manganês (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



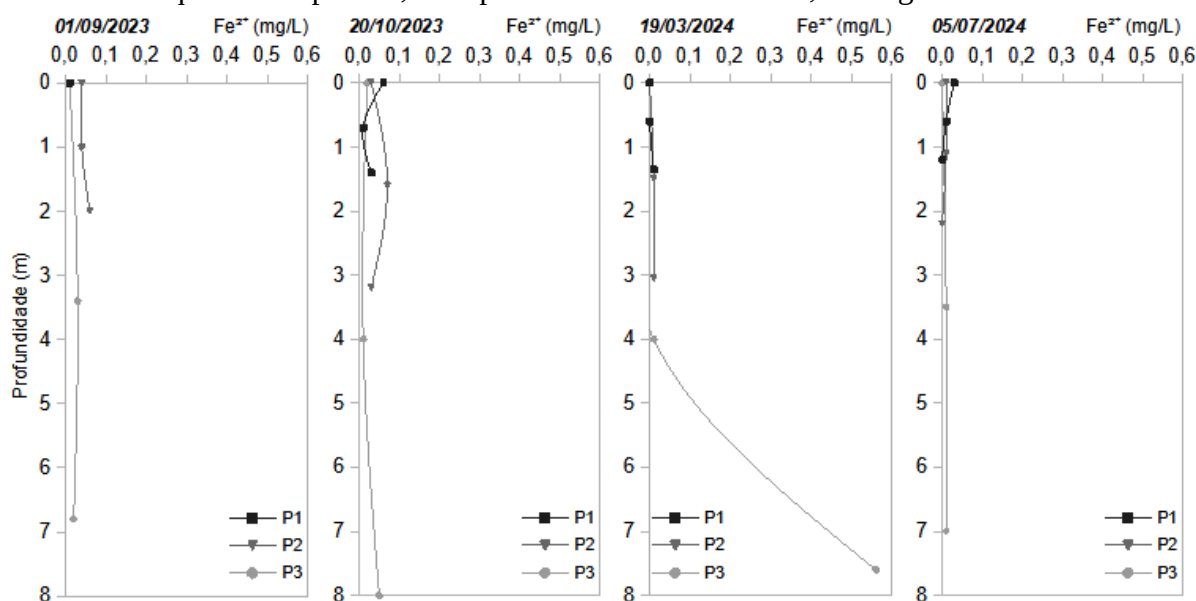
Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Neste estudo, na estação chuvosa, a concentração de ferro solúvel foi superior aos 0,3 mg/L estabelecidos para águas de classe 2. O manganês também excedeu os limites de 0,1 mg/L na maioria das amostras. Hem (1985) comenta que elevadas concentrações de ferro dissolvido podem ser decorrentes de materiais particulados muito pequenos, que passam através da membrana de filtração de 0,45 μm . No entanto, ao comparar com os dados da literatura, observa-se que estes valores são frequentemente excedidos em Poços de Caldas, o

que permite concluir que são decorrentes de influência geogênica. Inclusive a comissão das águas chega a sugerir que estes limites sejam revistos para a cidade (Poços de Caldas, 2012).

A concentração de ferro (II), apresentado na Figura 75, em geral foi baixa. As maiores concentrações ocorreram no fundo de P3 nas amostragens de verão, que em decorrência da estratificação térmica provocou redução no oxigênio dissolvido e consequente redução no potencial redox, favorecendo a forma reduzida do ferro.

Figura 75 – Concentração de ferro (II), em mg/L, em três profundidades em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,017$ mg/L



Fonte: A autora (2025).

A concentração de alumínio foi baixa na maioria das amostras, conforme apresentado na Tabela 16. A maioria dos dados ficaram abaixo do limite de detecção do método, o que mostra a necessidade de ajustar a metodologia para concentrar as amostras e assim detectar as concentrações usuais no reservatório. Neste estudo, quando analisada a média, os valores encontrados atenderam ao limite de 0,1 mg/L de alumínio dissolvido para águas de classe 2.

Foi observada uma tendência de aumento na concentração no fundo do reservatório em P3. Isso pode ocorrer pelo pH ser menor nesta região, o que possivelmente provoca a solubilização deste elemento suspenso ou do sedimento, conforme explicado por Rodriguez *et al.* 2019. Contudo, aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis a todos os dados, não há diferença significativa entre as coletas ($H=3,37$; $p=0,338$), profundidades ($H=0,08$; $p=0,963$) ou pontos ($H=0,16$; $p=0,924$).

A segunda amostragem apresentou as maiores concentrações de alumínio. Nesta data, a precipitação acumulada foi de 18,4 mm nos cinco dias anteriores e 63,6 mm em 11 dias (o

tempo de residência do reservatório). Sterling *et al.* (2020) afirma que tempestades podem elevar temporariamente as concentrações de alumínio dissolvido. Isso ocorre devido à diluição de cátions, aumento da concentração de ânions móveis e acidificação da água, promovendo a liberação do metal do solo e do leito dos rios. Além disso, as chuvas contendo sulfato ou fluoreto podem contribuir com a dissolução do alumínio ao percolarem o solo e assim transportá-lo para os cursos d'água. Convém ressaltar que as maiores concentrações de sulfato foram encontradas justamente nesta amostragem. No entanto, os coeficientes de correlação não apontaram relação entre estes parâmetros (Pearson: $r=0,405$; $p=0,018$; Spearman: $r=0,319$; $p=0,066$).

Tabela 16 – Concentração média de alumínio dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,013$ mg/L

Ponto	Profundidade	09/2023	10/2023	03/2024	07/2024
P1	0%	0,007*	0,100	0,002*	0,000*
	50%	.	0,000*	0,000*	0,100
	100%	.	0,007*	0,000*	0,003*
P2	0%	0,000*	0,290	0,000*	0,011*
	50%	0,000*	0,150	0,013	0,007*
	100%	0,000*	0,000*	0,000*	0,006*
P3	0%	0,008*	0,000*	0,000*	0,000*
	50%	0,000*	0,000*	0,006*	0,000*
	100%	0,000*	0,600	0,100	0,150
Média		0,002 $\pm$ 0,004	0,1 $\pm$ 0,2	0,01 $\pm$ 0,03	0,03 $\pm$ 0,05

Fonte: A autora (2025).

Legenda: *valores abaixo do limite de detecção de 0,013 mg/L.

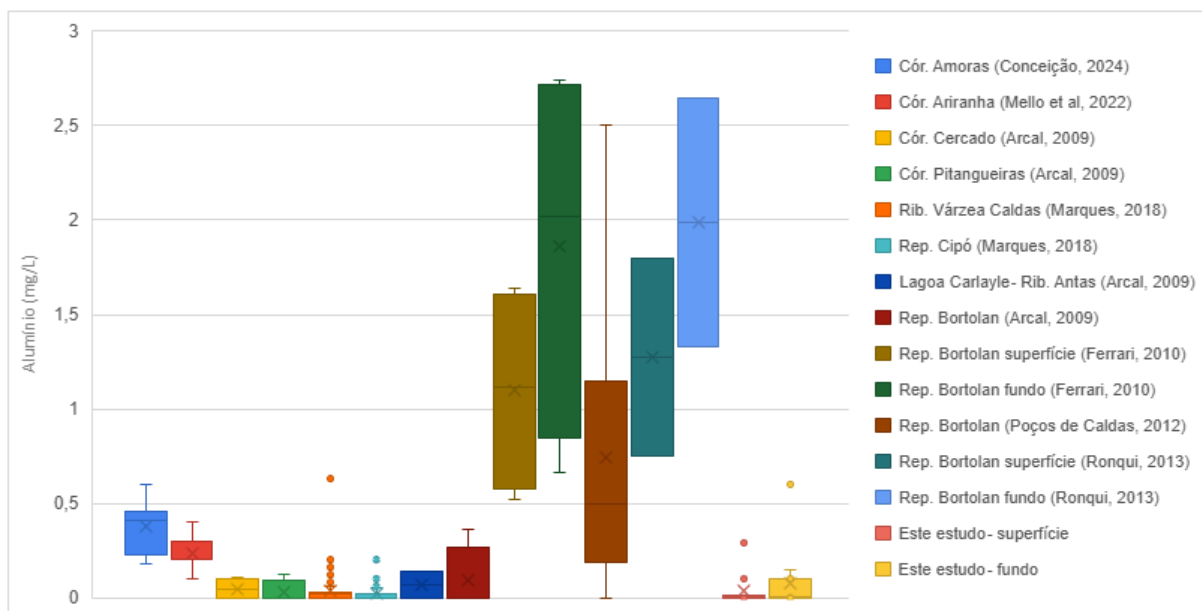
Além disso, nesta data, o reservatório esteve sujeito à presença de esgoto, como já mencionado anteriormente; diante disso, é esperado que a carga de matéria orgânica também estivesse elevada. Ainda segundo Sterling *et al.* (2020), a matéria orgânica dissolvida pode formar complexos solúveis com o alumínio.

Foi observada correlação linear significativa entre a concentração de alumínio dissolvido e a turbidez (Pearson: $r=0,72$; $p<0,001$). É possível que isto ocorra pois as partículas que provocam a turbidez podem conter argilas, que apresentam alumínio em sua composição.

Marques (2018) encontrou 0,03 mg/L de alumínio no ribeirão das Vargens na estação chuvosa e 0,04 mg/L na seca; na represa do Cipó, a concentração foi 0,02 mg/L em ambas as estações. Nos dados de Conceição *et al.* (2024) e Mello *et al.* (2022) não foi observada relação da concentração de alumínio com as estações do ano; em média, os autores

observaram, respectivamente, 0,37 mg/L no córrego Amoras e 0,2 mg/L no córrego Ariranha, conforme apresentado na Figura 76.

Figura 76 – Valores de alumínio (mg/L) na bacia das Antas encontrados na literatura e no reservatório Bortolan neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora com as referências citadas na legenda.

Nos estudos anteriores no reservatório Bortolan, apenas o Projeto Arcal (2009) menciona que as amostras foram filtradas. Diante disso, é possível que os demais estudos tenham realizado a determinação do alumínio total, analisado a partir da digestão ácida da amostra de água bruta, o que pode explicar os valores discrepantes nestes estudos com relação aos demais. Uma discussão sobre métodos de análise das várias formas de alumínio (total, dissolvido, solúvel em ácido e biodisponível) é apresentada por Rodriguez *et al.* 2019.

As maiores concentrações de cobre foram encontradas na primeira amostragem, em período seco, conforme apresentado na Tabela 17. No entanto, na última amostragem, também em período seco, a concentração média deste elemento esteve abaixo do limite de detecção do método. Uma hipótese para sua origem é ser proveniente do esgoto lançado no córrego Amoras na primeira amostragem, e ter sofrido diluição pela chuva nas amostragens seguintes. Mantoura, Dickson e Riley (1978) afirmam que mais de 90% do cobre em águas doces está complexado por materiais húmicos, que possivelmente estavam aumentados por conta da presença de esgotos.

Quando se considera o limite de detecção do método utilizado no presente estudo de 0,02 mg/L e a precisão de $\pm 0,02$ mg/L, não é possível avaliar se os resultados encontrados atendem ao limite de 0,009 mg/L de cobre para águas de classe 2, somente que este limite foi

excedido algumas vezes. No teste de Kruskal-Wallis, não foi observada distinção entre as coletas ($H=3,99$; $p=0,263$), profundidades ($H=0,06$; $p=0,973$) ou pontos ($H=0,27$; $p=0,875$).

Tabela 17 – Concentração média de cobre dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,02$ mg/L

Ponto	Profundidade	09/2023	10/2023	03/2024	07/2024
P1	0%	0,03	0,00*	0,03	0,00*
	50%	.	0,01*	0,00*	0,00*
	100%	.	0,00*	0,00*	0,01*
P2	0%	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
	50%	0,02	0,00*	0,39	0,00*
	100%	0,00*	0,01*	0,00*	0,01*
P3	0%	0,05	0,00*	0,01*	0,00*
	50%	0,13	0,00*	0,00*	0,00*
	100%	0,00*	0,03*	0,01*	0,00*
Média		0,03 $\pm$ 0,05	0,01 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,1	0,002 $\pm$ 0,004

Fonte: A autora (2025).

Legenda: *valores abaixo do limite de detecção de 0,02 mg/L.

Com relação à literatura, no estudo da Comissão das Águas, foram encontradas concentrações de cobre no Bortolan de 0,005 mg/L a 0,010 mg/L (Poços de Caldas, 2012), resultando numa média de 0,007 mg/L, que são valores parecidos com o presente trabalho. Nos trabalhos de Ferrari (2010) e Ronqui (2013), os valores foram abaixo do limite de detecção de 0,040 mg/L.

Tabela 18 – Concentração média de níquel dissolvido, em mg/L, em cada ponto, nas quatro campanhas, com precisão do método de $\pm 0,008$ mg/L

Ponto	Profundidade	09/2023	10/2023	03/2024	07/2024
P1	0%	0,009	0,043	0,030	0,000
	50%	.	0,035	0,004	0,000
	100%	.	0,030	0,007	0,000
P2	0%	0,008	0,029	0,007	0,000
	50%	0,021	0,025	0,014	0,000
	100%	0,025	0,021	0,034	0,000
P3	0%	0,027	0,022	0,011	0,000
	50%	0,044	0,024	0,009	0,000
	100%	0,022	0,039	0,005	0,000
Média		0,02 $\pm$ 0,01	0,030 $\pm$ 0,008	0,01 $\pm$ 0,01	0,000 $\pm$ 0,000

Fonte: A autora (2025).

O outro metal traço analisado foi o níquel, conforme resultados apresentados na Tabela 18. Não foram encontrados dados na literatura da região sobre este elemento. Para fins de comparação, Alves *et al.* 2014, estudando o rio Pardo (da qual o ribeirão das Antas é um

afluente), encontrou média de $0,0053 \pm 0,0003$ mg/L de níquel no alto curso, um valor que corresponde a cerca do dobro encontrado nas primeiras amostragens no presente estudo.

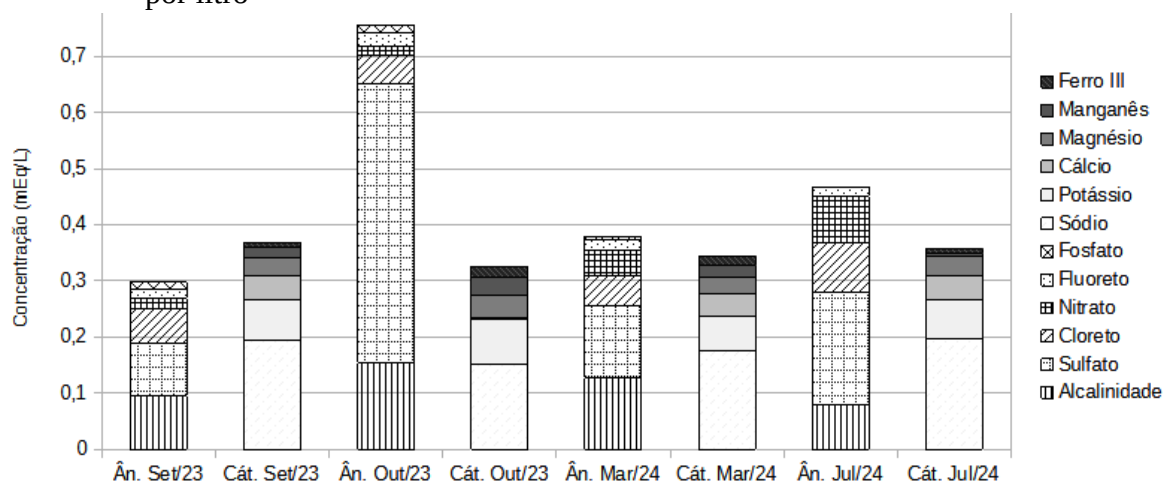
Com relação à resolução CONAMA 357/2005, o limite de níquel para águas de classe 2 é de 0,025 mg/L, valor que em média não foi atendido na segunda amostragem. Quando se analisam os dados individualmente, em vários casos o valor não foi atendido nas três primeiras amostragens.

O Kruskal-Wallis aponta diferenças significativas entre as amostragens ($H=23,79$; $p<0,001$), mas indica que não há distinção entre profundidades ($H=0,01$; $p=0,996$) ou entre os pontos ($H=0,06$; $p=0,969$).

6.7 BALANÇO DE CARGAS

Na Tabela 19, é apresentado o balanço de carga e a variabilidade iônica, que também pode ser visualizado na forma de gráfico na Figura 77. Para Freeze e Cherry (1979), o erro no balanço de carga deve ser menor que $\pm 5\%$, já para Mosello *et al.* (1996 *apud* Mello 2022) é aceitável $\pm 10\%$ de variabilidade iônica. Em média, este resultado foi atingido apenas na terceira amostragem, mas foi bastante próximo na primeira e na última. Contudo, foi bastante discrepante na segunda, por conta da concentração elevada de sulfato. Como não foram identificados interferentes ou outras fontes de erro nesta análise, é possível concluir que havia outras espécies iônicas em concentrações relevantes nas amostras deste dia; uma hipótese é a matéria orgânica dissolvida.

Figura 77 – Representação das médias das análises químicas das águas nos três pontos e três profundidades, com gráficos de barras de cátions e ânions, em miliequivalentes por litro



Fonte: A autora (2025).

Tabela 19 – Balanço de cargas por ponto e profundidade em cada amostragem

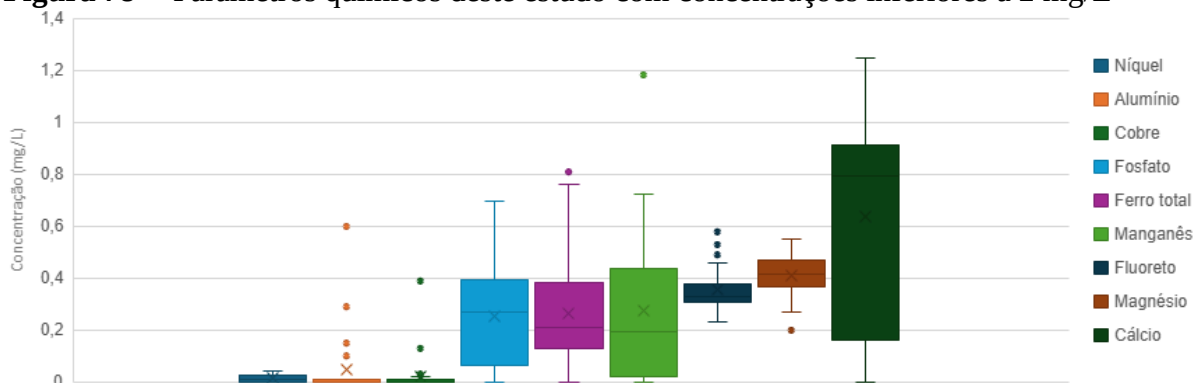
Data	P1 s	P1 m	P1 f	P2 s	P2 m	P2 f	P3 s	P3 m	P3 f	Média
set. 23	18,6	.	.	3,7	14,3	13,5	7,7	5,4	16,8	11,4
out. 23	-39,0	-40,1	-35,6	-39,4	-41,3	-43,1	-27,3	-33,2	-35,3	-37,1
mar. 24	-11,0	-7,8	-16,2	-3,2	0,8	-2,0	-4,1	0,8	7,1	-3,9
jun. 24	-9,8	-9,1	-16,4	-16,6	-10,2	-14,8	-14,8	-6,9	-17,6	-12,9

Fonte: A autora (2025).

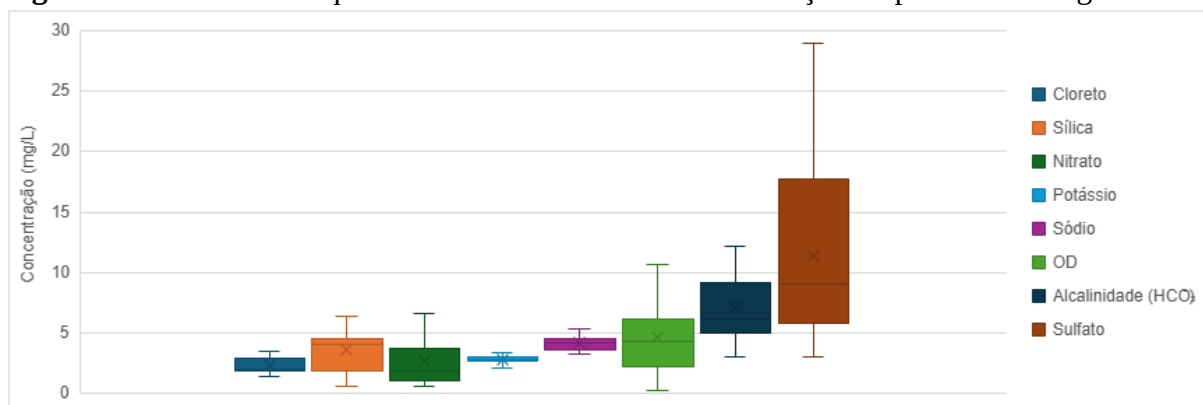
Legenda: s - superfície; m - meio; f - fundo.

6.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para cada parâmetro, tem-se o espaço amostral de N=34, correspondente às quatro campanhas, nos três pontos e três profundidades (com exceção de P1 na primeira campanha, que teve apenas uma profundidade). São apresentados os *box plots* das análises químicas nas Figuras 78 e 79 para ilustrar a distribuição dos dados.

Figura 78 – Parâmetros químicos deste estudo com concentrações inferiores a 2 mg/L

Fonte: A autora (2025).

Figura 79 – Parâmetros químicos deste estudo com concentrações superiores a 2 mg/L

Fonte: A autora (2025).

A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, apresentado

na Tabela 20. Neste teste, considera-se que os dados apresentam distribuição normal quando o p-valor é superior a 0,05, o que ocorreu para as concentrações de magnésio, potássio, sódio, oxigênio dissolvido, sílica, fosfato e o potencial de oxi-redução. Como a maioria dos dados não seguem uma distribuição normal, são necessários testes não paramétricos para analisá-los.

Tabela 20 – Teste de Shapiro-Wilk para normalidade

Parâmetro	W	p valor	Parâmetro	W	p valor
Magnésio (mg/L)	0,97	0,508	Níquel (mg/L)	0,90	0,004
Potássio (mg/L)	0,97	0,355	Cálcio (mg/L)	0,88	0,002
Sódio (mg/L)	0,96	0,266	Cloreto (mg/L)	0,87	0,001
Oxigênio dissolvido (mg/L)	0,96	0,230	Manganês (mg/L)	0,85	<0,001
Sílica (mg/L)	0,95	0,148	Nitrato (mg/L)	0,84	<0,001
Fosfato (mg/L)	0,94	0,077	Fluoreto (mg/L)	0,84	<0,001
Potencial Redox (mV)	0,94	0,058	Sulfato (mg/L)	0,80	<0,001
Temperatura (°C)	0,94	0,049	Turbidez (NTU)	0,65	<0,001
Alcalinidade (HCO_3^- mg/L)	0,92	0,019	Alumínio (mg/L)	0,37	<0,001
pH	0,92	0,012	Cobre (mg/L)	0,34	<0,001
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,91	0,010	Ferro (II) (mg/L)	0,32	<0,001
Ferro total (mg/L)	0,91	0,008	-	-	-

Fonte: A autora (2025).

Legenda: Em itálico, dados com $p < 0,05$.

Para a comparação entre grupos, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, adequado para dados não paramétricos. As tabelas de resultados são apresentadas nos apêndices e já foram discutidas ao longo da seção anterior. Basicamente, este teste mostra que as principais diferenças ocorreram ao longo do tempo para a maioria dos parâmetros.

A correlação entre as variáveis foi analisada pelos coeficientes de Pearson e coeficiente de Spearman. Os valores de p também foram calculados para verificar a significância das correlações. Os resultados mais significativos foram discutidos na seção anterior e são apresentados no Quadro 2, os demais são apresentados nos Apêndices.

Cloreto e temperatura apresentaram correlação negativa significativa (Pearson: $r=-0,787$; Spearman: $r=-0,781$), o que pode estar relacionado à pluviosidade, já que as temperaturas menores estiveram relacionadas ao período seco. Cloreto e nitrato também apresentam uma correlação positiva significativa (Pearson: $r=0,737$), o que pode indicar que ambos são diluídos pela chuva. De certa forma, ferro e manganês (Spearman: $r=0,707$) também estão relacionados à pluviosidade, pois a drenagem de solos provocada pela chuva carrega consigo estes elementos.

A correlação entre fluoreto e sulfato (Pearson: $r=0,778$) pode ter ocorrido em virtude do lançamento de esgoto na segunda amostragem, que pode ter provocado aumento de ambos.

Quadro 2 – Coeficientes de correlação de Pearson, à esquerda, e de Spearman, à direita, acima de 0,65 ou inferior a -0,65, todas com p-valor < 0,001

R ²	Cl ⁻	F ⁻	PO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺	Fe tot	Ni	Temp.	pH	Cond.	OD
Cl ⁻	—										-0,781			
PO ₄ ²⁻			—	-0,828						0,754				
NO ₃ ⁻	0,737		-0,804	—						-0,719				
SO ₄ ²⁻		0,778			—								0,697	
K ⁺					0,703									
Mg ²⁺							-0,697							
Ca ²⁺		-0,731			-0,832	0,703	—							
Mn									0,707					
Ni			0,706							—				
Temp.	-0,787										—			
pH												—		0,815
Turb.							0,740							
OD											0,787			—

Fonte: A autora (2025).

Legenda: Temp. - temperatura; Cond. - condutividade; Turb. - turbidez.

As correlações negativas entre fluoreto e cálcio (Pearson: $r=-0,731$) e sulfato e cálcio (Pearson: $r=-0,832$) podem estar relacionadas à formação de um composto insolúvel, reduzindo a disponibilidade de um quando o outro está presente em excesso, como já comentado em seção anterior.

A correlação entre OD e pH (Spearman: $r=0,815$) está relacionada à fotossíntese, que aumenta tanto o oxigênio quanto o pH da água. O sulfato foi o íon observado em maiores concentrações, diante disso, é esperado que ele se relacione significativamente com a condutividade elétrica (Spearman: $r=0,697$). A correlação entre alumínio e turbidez (Pearson: $r=0,740$) pode ser consequência de minerais com alumínio, como argilas, estarem associados a partículas em suspensão, conforme já discutido anteriormente.

A Análise de Componentes Principais (PCA) é apresentada nas Tabelas 21 e 22. Os três primeiros componentes principais (PCs) explicaram conjuntamente 57,69% da variância total, enquanto a inclusão do quarto componente elevou esse valor para 66,70%.

O primeiro componente principal (PC1) explicou 31,01% da variabilidade, com as maiores contribuições positivas proveniente de fluoreto e sulfato, e negativas de cálcio e sódio. Como já discutido, o cálcio está relacionado ao sulfato. Fluoreto e sódio podem estar relacionados à precipitação.

O segundo componente principal (PC2), que explicou 15,98% da variabilidade, apresentou forte associação com oxigênio dissolvido, magnésio, potencial de oxirredução, pH e ferro (II). O oxigênio dissolvido se relaciona ao pH por conta da fotossíntese e também influencia o ORP, como já mencionado. A concentração de ferro (II), que é a forma reduzida

do ferro, é maior em ambientes com menor ORP e menor oxigenação, além disso, a solubilidade de metais é favorecida em meio ácido.

Tabela 21 – Componentes principais, autovalores e percentuais da variância

PC	Autovalor	% Var	PC	Autovalor	% Var	PC	Autovalor	% Var
1	7,12	31,01	9	0,56	2,45	17	0,11	0,47
2	3,67	15,98	10	0,40	1,75	18	0,09	0,37
3	2,45	10,69	11	0,37	1,61	19	0,06	0,25
4	2,07	9,01	12	0,27	1,18	20	0,06	0,24
5	1,88	8,18	13	0,25	1,07	21	0,03	0,14
6	1,33	5,79	14	0,19	0,84	22	0,02	0,09
7	0,96	4,18	15	0,16	0,69	23	0,01	0,04
8	0,78	3,39	16	0,13	0,58	-	-	-

Fonte: A autora (2025).

Legenda: %Var - porcentagem de variância.

Tabela 22 – Cargas fatoriais das quatro primeiras componentes principais

Parâmetro	PC 1	Parâmetro	PC 2	Parâmetro	PC 3	Parâmetro	PC 4
Ca	-0,305	Fe(II)	-0,308	Temp.	-0,236	Temp.	-0,381
Na	-0,296	Fe(total)	-0,260	PO ₄ ³⁻	-0,224	Cond.	-0,248
Cl ⁻	-0,281	Cond.	-0,236	Fe(II)	-0,182	Cu	-0,206
NO ₃ ⁻	-0,276	HCO ₃ ⁻	-0,230	Cu	-0,178	Mg	-0,160
ORP	-0,092	SiO ₂ ⁻	-0,218	Ca	-0,173	F ⁻	-0,153
Cu	-0,004	Mn	-0,208	pH	-0,166	NO ₃ ⁻	-0,133
Cond.	0,008	Ca	-0,168	OD	-0,162	Fe(total)	-0,114
Fe(II)	0,046	Al	-0,114	Fe(total)	-0,119	SO ₄ ²⁻	-0,090
SiO ₂ ⁻	0,064	Temp.	-0,069	Ni	-0,117	OD	-0,049
OD	0,082	NO ₃ ⁻	-0,054	Na	-0,112	Fe(II)	-0,005
Turb.	0,102	Turb.	-0,001	Mn	-0,027	Mn	0,027
Mg	0,102	Cu	0,039	SiO ₂ ⁻	-0,011	pH	0,076
pH	0,110	Cl ⁻	0,046	ORP	0,024	ORP	0,114
Al	0,152	F ⁻	0,047	Turb.	0,057	Na	0,143
Fe (total)	0,183	SO ₄ ²⁻	0,048	HCO ₃ ⁻	0,081	HCO ₃ ⁻	0,143
Mn	0,220	Ni	0,056	Al	0,207	Cl ⁻	0,144
K	0,225	Na	0,077	F ⁻	0,223	Ni	0,159
Temp.	0,229	PO ₄ ³⁻	0,099	Mg	0,233	PO ₄ ³⁻	0,176
HCO ₃ ⁻	0,260	K	0,167	K	0,275	Ca	0,194
PO ₄ ³⁻	0,283	ORP	0,341	NO ₃ ⁻	0,321	Al	0,197
Ni	0,283	pH	0,345	Cl ⁻	0,327	K	0,339
SO ₄ ²⁻	0,290	Mg	0,347	SO ₄ ²⁻	0,349	Turb.	0,351
F ⁻	0,301	OD	0,423	Cond.	0,373	SiO ₂ ⁻	0,457

Fonte: A autora (2025).

Legenda: ORP - potencial de óxido-redução; cond. - condutividade; turb. - turbidez; OD - oxigênio dissolvido; temp. - temperatura.

O terceiro componente principal (PC3), explicando 10,69% da variância, parece estar relacionado a fontes de poluição, pois está associado a condutividade, sulfato, cloreto e nitrato. Como já mencionado, o aumento da condutividade, da concentração de sulfato e nitrato pode estar relacionado ao lançamento de esgotos.

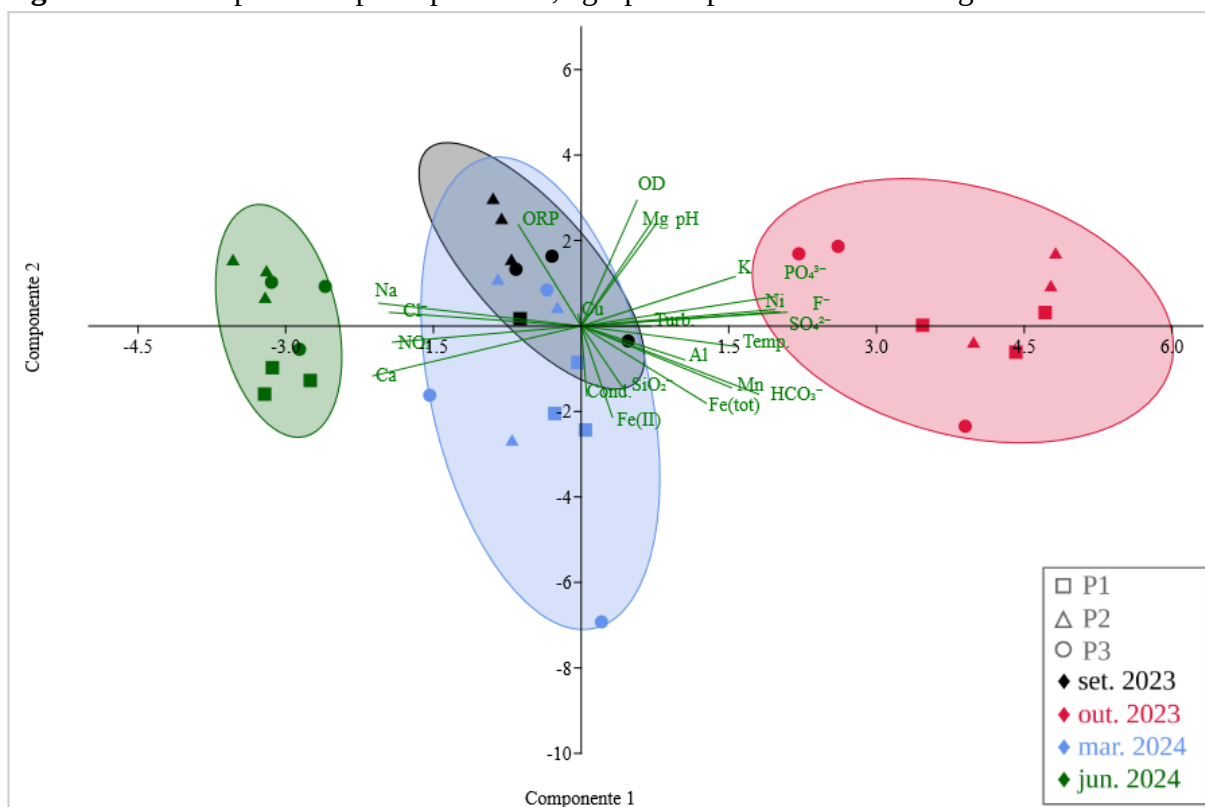
O quarto componente principal (PC4) explica 9,01% da variância e está associado a turbidez, sílica e temperatura, além de influência moderada de potássio e alumínio. Esse componente pode estar relacionado aos sólidos suspensos na água, que normalmente contém óxidos de silício e alumínio.

O gráfico da PCA, apresentado na Figura 80, mostra a distribuição das amostras ao longo dos dois primeiros componentes principais. As amostras da primeira amostragem (pontos pretos) foram agrupadas na região negativa de PC1 e positiva de PC2, na direção de ORP. Os dados da quarta amostragem (verde) também se agruparam na região negativa de PC1, porém com menor influência de PC2, ou seja, com menor influência de ORP e mais contribuição de cálcio, sódio, cloreto e nitrato. Na quarta amostragem, ORP se comportou de maneira mais parecida entre os pontos (com sobreposição das curvas de P2 e P3), o que explica a menor variância neste parâmetro. Ambas as amostragens ocorreram em período seco, porém em julho a seca foi mais acentuada e a estratificação térmica foi menor, fatores que podem explicar a menor dispersão destes dados quando comparados aos dados de setembro.

Já as amostras da segunda amostragem (vermelho) se posicionaram na região positiva de PC1, sugerindo relação com vários parâmetros, sendo os principais: fluoreto, sulfato, níquel e fosfato. Esta data está associada com a maior precipitação do período de estudo, bem como à presença de esgoto proveniente do córrego das Amoras. Ambos os fatores podem influenciar na maior dispersão dos dados.

As amostras da terceira campanha (azul), ainda no período chuvoso, também apresentaram grande dispersão de dados, sendo de P3 os dados responsáveis pela maior dispersão. A maior parte dos dados está nas regiões negativas de PC1 e PC2, na direção de ferro II, o que pode indicar condições mais redutoras.

Como já mencionado sobre a análise de Kruskal-Wallis, o agrupamento mais significativo é realizado entre as datas. A partir desta divisão, a análise de *clusters* foi aplicada para agrupar as observações de acordo com as similaridades entre pontos e profundidades, conforme apresentado na Figura 81, onde se observa que durante o período chuvoso (outubro e março), houve maior variabilidade nos agrupamentos.

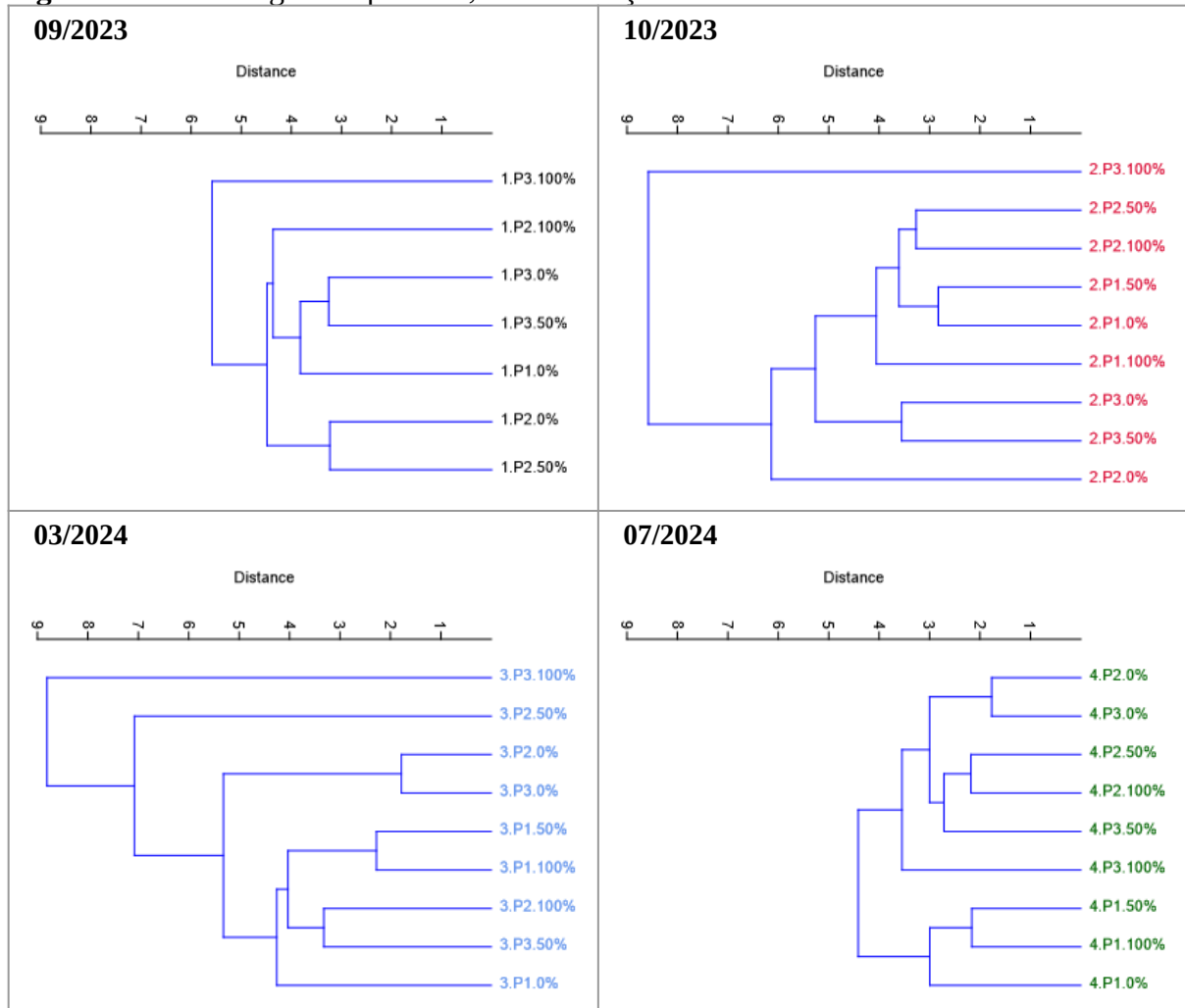
Figura 80 – Componentes principais 1 e 2, agrupados por data da amostragem

Fonte: A autora (2025).

Os dados de setembro mostram uma distinção entre regiões, sendo formados grupos distintos de P2 e P3, entre superfície e meio em cada ponto, que por fim se agrupam com o fundo de P3. Ou seja, os dados se agrupam verticalmente no mesmo ponto, preservando a diferença horizontal. Nos dados de outubro, P3-fundo também se distancia dos demais dados, que se agrupam de maneira similar a setembro. Os dados de março continuam com grande distanciamento de P3-fundo, mas como diferença tem-se o agrupamento entre pontos distintos (por exemplo, P2.0% e P3.0%), revelando mais semelhanças no eixo horizontal, o que pode ser consequência da maior estratificação térmica nesta data. Na amostragem de julho, os dados voltam a se agrupar por ponto, com exceção da superfície em P2 e P3, que mantém o agrupamento horizontal.

Em todas as coletas, P1 tende a formar *clusters* distintos; P2 apresenta padrões mais variáveis entre as coletas, possivelmente por ser uma região de transição; P3 se notabiliza por se distanciar dos demais dados no fundo. Com relação à profundidade, não foram observados grupos entre dados de superfície e fundo, o que revela a distinção entre estas regiões.

Figura 81 – Dendrogramas por data, com indicação da distância euclidiana



Fonte: A autora (2025).

Legenda: 0% - superfície do ponto amostrado; 50% - meio; 100% - fundo.

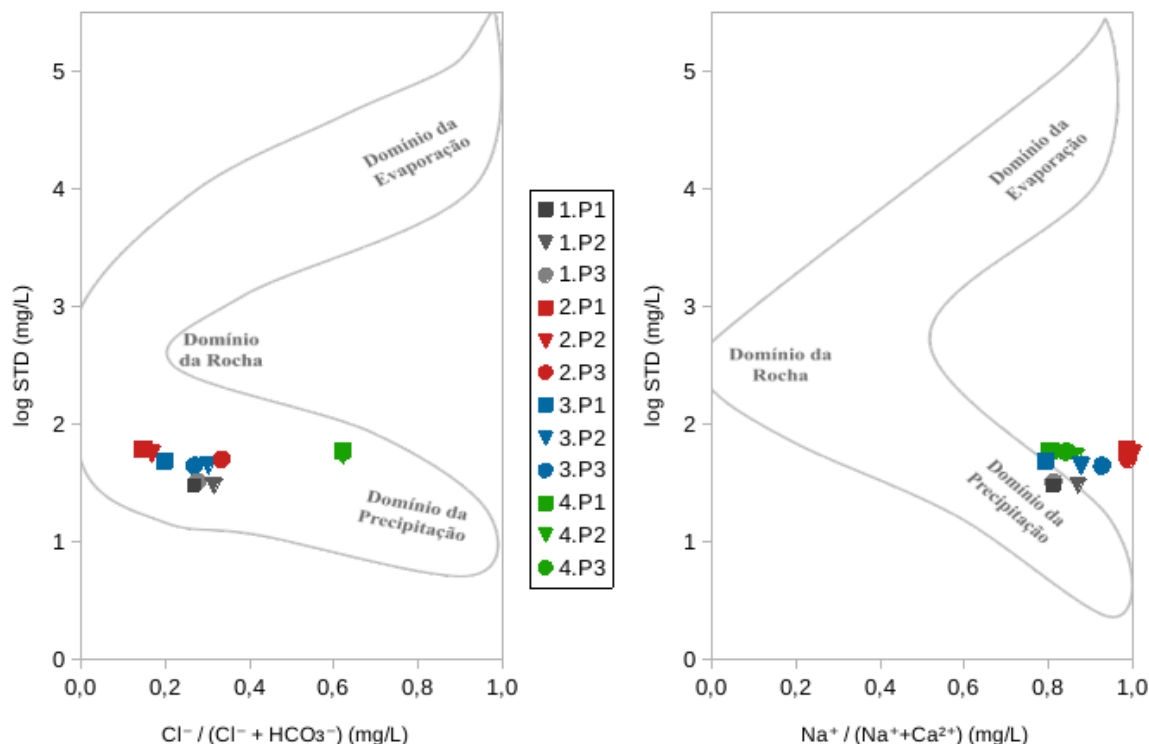
6.9 DIAGRAMAS REPRESENTATIVOS E ÍNDICES

Os diagramas de Gibbs para cátions e ânions no período de estudo é apresentado na Figura 82. Observa-se predomínio do sódio em relação ao cálcio, sendo mais acentuado na segunda amostragem (vermelho), que apresentou redução na concentração de cálcio em virtude da elevada concentração de sulfato. Todos os dados catiônicos estão na região de domínio da precipitação.

No diagrama dos ânions, a maioria dos dados situam-se em uma região intermediária entre domínio da precipitação e domínio da rocha. Os dados da quarta campanha estão deslocados dos demais, mais próximos ao domínio da precipitação; contudo, estes dados são de um período de seca. Nesta data, a concentração de bicarbonato diminuiu, o que levou a um aumento na razão $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$. Como hipótese, tem-se a diminuição da concentração de

bicarbonato em virtude da menor produção primária como consequência da menor temperatura na data (início do inverno).

Figura 82 – Diagramas de Gibbs para cátions (à esquerda) e ânions (à direita) no reservatório Bortolan, nos três pontos e quatro amostragens, para as águas superficiais



Fonte: A autora (2025).

No entanto, esses dados devem ser avaliados com cautela, pois o diagrama de Gibbs foi desenvolvido principalmente para interpretar águas naturais e pode não avaliar adequadamente águas com forte influência antrópica, como parece ser o caso do reservatório Bortolan.

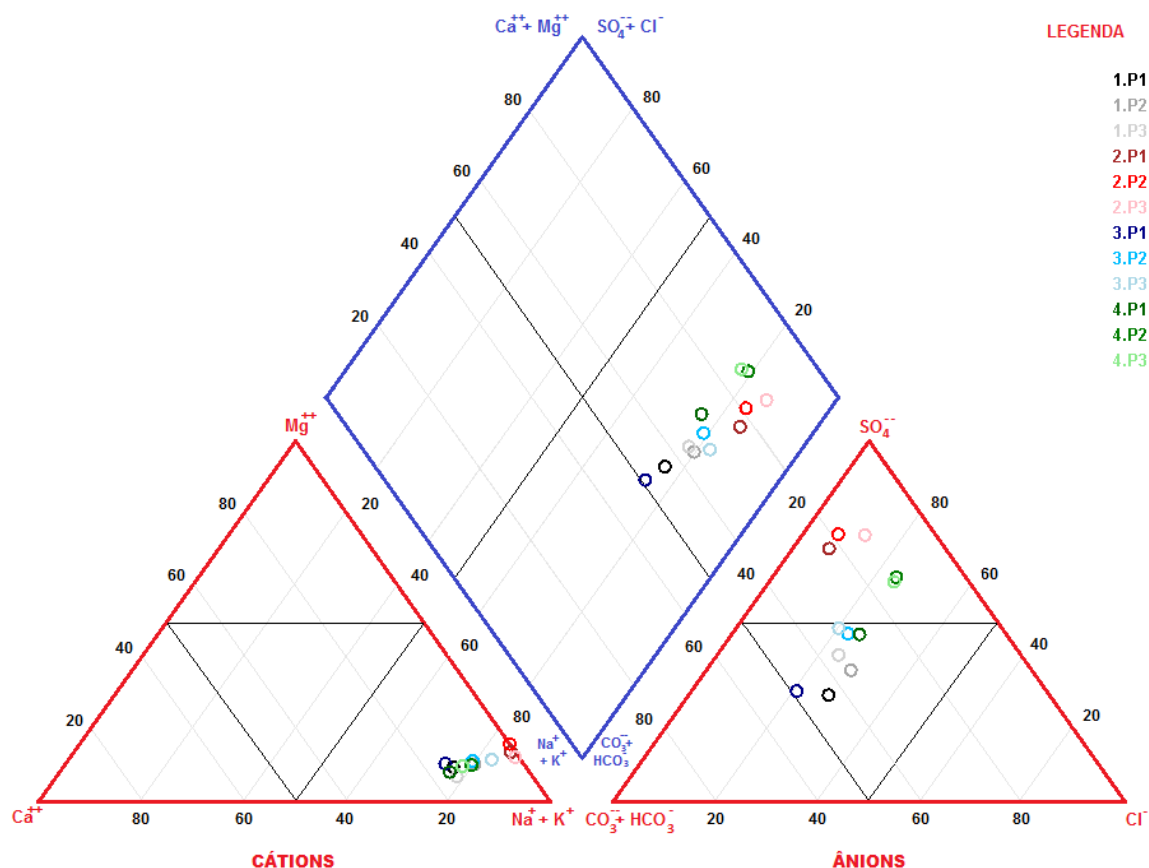
Na literatura da região, foram encontrados diagramas de Gibbs para cátions feitos por Mello *et al.* (2022) para o córrego Ariranha e Conceição *et al.* (2024) para o córrego das Amoras. Em ambos, os autores encontraram dados semelhantes, na região intermediária entre o domínio da rocha e o domínio da precipitação.

O diagrama de Piper, apresentado na Figura 83, mostra que a composição da água é sódica/potássica do ponto de vista catiônico, variando de mista a sulfatada quanto aos ânions. Destaca-se que os dados que mostram predominância de sulfato parecem estar relacionados à contaminação antrópica, conforme já discutido. Não foram encontrados padrões de variação sazonal neste diagrama.

Os resultados de ICE para cada ponto são apresentados na Tabela 23. Todos os valores de ICE se enquadram na faixa classificada como: “os parâmetros às vezes se afastaram dos

níveis naturais ou desejados.” As inconformidades ocorreram nos parâmetros: OD, pH, fósforo, ferro, manganês e cobre.

Figura 83 – Diagramas de Piper para o reservatório Bortolan, nos três pontos e quatro amostragens, para as águas superficiais



Fonte: A autora (2025).

Observa-se que a pior condição foi observada em P1, refletindo principalmente a qualidade das águas do ribeirão das Antas e do córrego das Amoras. Possivelmente a condição melhora por processos de autodepuração e também pela entrada de pequenos tributários com águas de melhor qualidade. A qualidade volta a diminuir em P3, talvez pela maior influência urbana e presença de estações elevatórias de esgotos.

Tabela 23 – ICE e seus parâmetros de cálculo para as águas superficiais do reservatório Bortolan no período estudado

Ponto	Par.	Testes	Par. Inc.	Testes Inc.	$\Sigma\Delta v$	snv	F1	F2	F3	ICE
P1	14	56	4	10	31,75	0,57	28,57	17,86	36,18	71
P2	14	56	4	6	16,34	0,29	28,57	10,71	22,59	78
P3	14	56	4	6	24,13	0,43	28,57	10,71	30,12	75

Fonte: A autora (2025).

Legenda: Par. - parâmetros; Inc. - inconformes; $\Sigma\Delta v$ - somatório das variações nos parâmetros; snv - soma normalizada das variações; F1 - fator de abrangência; F2 - fator de frequência; F3 - fator de amplitude.

7 CONCLUSÕES

A literatura apresenta diversos estudos sobre a litologia do planalto de Poços de Caldas, o que permite inferir influências geogênicas na química das águas da represa do Bortolan. Porém, carece de estudos focados em determinar a condição de referência destas águas em seus diversos cursos d'água.

A bacia hidrográfica estudada é predominantemente agrícola (79% do uso do solo), com 3,4% de área urbanizada e 2,2% de área industrial. Contudo, as maiores influências sobre o reservatório Bortolan parecem ser provenientes de esgotos das áreas urbanas e industriais.

A metodologia para análises químicas foi adequada, mas precisa ser otimizada para detectar quantidades menores de metais traço. Além disso, parece ser conveniente determinar matéria orgânica dissolvida para refinar o balanço iônico.

As análises estatísticas indicam que a sazonalidade está relacionada a alterações significativas na composição da água, como o aumento da concentração de fluoreto, ferro e manganês.

A avaliação em três profundidades permitiu observar a estratificação térmica da coluna d'água na região lacustre durante o verão, o que influenciou o comportamento do oxigênio dissolvido, pH e potencial redox.

Além disso, possivelmente a produtividade primária do reservatório também influenciou o comportamento do OD e pH. E foi influenciada pela disponibilidade de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, acarretando na presença de algas e macrófitas.

Os pontos amostrais analisados foram adequados para avaliar a dinâmica horizontal do reservatório, permitindo observar que a região fluvial se mostra como a mais degradada, apresentando menor ICE e maior eutrofização. Além disso, foi possível observar a influência longitudinal sobre alguns parâmetros, como alcalinidade e concentração de sílica.

O índice de conformidade ao enquadramento foi útil para quantificar o atendimento aos padrões de qualidade estabelecidos para águas de classe 2 da resolução CONAMA 357/2005. Os desvios dos padrões ocorreram em OD, pH, fósforo, ferro, manganês e cobre, o que resultou num ICE médio de 75, sendo interpretado como afastamento ocasional dos níveis naturais ou desejados.

O diagrama de Gibbs indica influência intermediária entre domínio da precipitação e domínio da rocha, mas deve ser avaliado com cautela pois não quantifica as interferências antrópicas. O diagrama de Piper permitiu classificar as águas como sódico-potássica, variando de mista a sulfatada.

Em síntese, os resultados obtidos indicam que o reservatório Bortolan, apesar de apresentar condições aceitáveis em alguns parâmetros, exhibe sinais de degradação ambiental que podem comprometer as atividades de lazer e a geração de energia. Diante desse cenário, torna-se essencial o monitoramento contínuo e a implementação de medidas de manejo e recuperação ambiental, com vistas a minimizar os impactos decorrentes de atividades antrópicas e a promover a sustentabilidade dos recursos hídricos na região.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como já mencionado, a literatura apresenta poucos trabalhos sobre a condição de referência dos cursos d'água do planalto de Poços de Caldas. Seria interessante avaliar nascentes e córregos em diferentes tipos de rocha e solo, em regiões de baixa influência antrópica, para caracterizar as influências geogênicas na composição destas águas. Da mesma forma, um estudo sobre sedimentos poderia ampliar o conhecimento sobre este assunto.

Os pontos analisados no estudo de Laje Filho (1996) sobre o ribeirão das Antas poderiam ser reavaliados para identificar semelhanças e diferenças após três décadas. Além disso, poderiam ser avaliados ao longo de um ano para identificar as influências da sazonalidade.

Os afluentes do reservatório Bortolan poderiam ser monitorados para identificar como cada um contribui para a composição das suas águas. O estudo sobre o reservatório também pode ser enriquecido com informações sobre parâmetros bioquímicos e análise dos sedimentos, incluindo datação.

Obter a batimetria enriqueceria o entendimento sobre o reservatório. Além disso, seria interessante modelar como a morfometria influencia o transporte de substâncias no reservatório.

Outra sugestão envolve identificar e quantificar as áreas de lavra dos diversos minérios explorados na bacia, por meio de imagem de satélite e com dados da ANM. Em geral, por serem pequenas, são confundidas com áreas de agricultura e pastagem pelo algoritmo do projeto MapBiomas.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, H. L. C. **Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.
- ALVES, R.I.S. *et al.* Metal concentrations in surface water and sediments from Pardo River, Brazil: human health risks. **Environmental research**, [s. l.], v. 133, p. 149–155, June 2014.
- ANALYSER COMÉRCIO E INDÚSTRIA LTDA. **Manual de instruções 910-MS**: Fotômetro de Chama Digital Microprocessado. São Paulo: Analyser, 2010.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22nd. ed. Baltimore: Port City Press, 2012.
- BIOÉTICA AMBIENTAL. **Relatório do monitoramento da qualidade da água nos reservatórios da DME energética S/A em 2022**. Poços de Caldas, dez. 2022.
- BIOÉTICA AMBIENTAL. **Relatório do monitoramento da qualidade da água no reservatório Bortolan da DME energética S/A em 2023**. Poços de Caldas, jan. 2024.
- BRANCO, C.W.C. *et al.* Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 175-191, Sept. 2009.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter: aplicação na ANA**. Brasília, 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Atlas Esgotos**: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Estações de Tratamento de Esgoto. Escala 1:100.000. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01/attachments/Estacao_Tratamento_Esgoto_2019.zip>. Acesso em: dez. 2024.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Massas d'Água**. Escala 1:100.000. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/files/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c/geoft_bho_massa_dagua_v2019.zip>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas Versão 6**. Escala 1:50.000. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/32e309da-a8c1-443f-90ac-0cd79ce6a33d>>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE)**. Brasília: ANM, 2025. Disponível em: <<https://geo.anm.gov.br/portal/home/>>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Laboratório de Poços de Caldas. **Avaliação radioquímica das águas geradas pelas estações de tratamento do município de Poços de Caldas – MG**. Poços de Caldas: CNEN, out. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.

BRASIL. Ministério Público Federal. **Termo de Arquivamento** do Inquérito Civil n. 1.22.013.000370/2015-70. Pouso Alegre, 10 jun. 2022.

CAMPOS, S. *et al.* Sistema de informação geográfica aplicado na discriminação morfométrica de bacias hidrográficas. In: AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; BENINI, S. M. (org.). **Bacias hidrográficas: fundamentos e aplicações**. Tupã: ANAP, 2018. p. 41-56.

CASAGRANDE, M. F. S. **Investigação geofísica em pilha de estéril afetada por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas-MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2019.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT (CCME). **Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0**. Winnipeg: CCME, 2001.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2022**. São Paulo: CETESB, 2023.

CONCEIÇÃO, F. T. *et al.* Chemical and Physical Denudation Rates in the Poços de Caldas Alkaline Massif, Minas Gerais State, Brazil. **Minerals**, Basel, Switzerland, v. 14, n. 7, p. 700, July 2024.

COPERNICUS. **Copernicus Data Space Ecosystem**. 2025. Disponível em: <<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>>. Acesso em: 13 fev. 2025.

COSTA, P. C. G.; CARMO, J. C. C.; DELGADO, S. L. **Projeto Hidrogeoambiental das Estâncias Hidrominerais da Companhia Mineradora de Minas Gerais – COMIG – Estância Hidromineral de Poços de Caldas**. Belo Horizonte: Companhia Mineradora de Minas Gerais/Fundação Gorceix, 2001.

CHAPMAN, N. A. *et al.* **The Poços de Caldas project: summary and implications for radioactive waste management**. Uppsala: SKB – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, v. 1, 1991.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, [s.l.], v. 4, n. 8, p. 23-42, out. 1979.

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

DEAN, J. A. **Lange's Handbook of Chemistry**. 15th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO (DMAE). **Plano Diretor de Esgotamento Sanitário do Município de Poços de Caldas/MG**. Poços de Caldas: DMAE, mar. 2013.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ELETRICIDADE DE POÇOS DE CALDAS (DME). **Relatórios internos**. Poços de Caldas: DME, 2024.

DRAGIČEVIĆ, N.; KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. Different approaches to estimation of drainage density and their effect on the erosion potential method. **Water**, Basel, Switzerland, v. 11, n. 3, p. 593, Mar. 2019.

ELLERT, R. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo: Geologia**, São Paulo, n. 18, p. 5-60, 1959.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FERRARI, C. R. **Avaliação de efeitos ambientais de efluentes radioativos de mineração de urânio sobre as características físicas, químicas e diversidade da comunidade zooplancônica na Unidade de Tratamento de Minérios, Represa das Antas e Represa Bortolan, Poços de Caldas (MG)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FERRARI, C.R. *et al.* Effects of the discharge of uranium mining effluents on the water quality of the reservoir: an integrative chemical and ecotoxicological assessment. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 13919, 2017.

FERREIRA, A. M. *et al.* Naturally-Occurring Radioactive Materials at water treatment plant on the Poços de Caldas Plateau Region, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, p. 103-111, Jan./Feb. 2022.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. Disponível em: <<http://fc79.gw-project.org>>. Acesso em: 20 de dez. 2023.

G1. **Aguapés tomam espelho d'água da represa Bortolan, em Poços de Caldas (MG)**. *G1 Sul de Minas*, 9 jan. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2021/01/09/aguapes-tomam-espelho-dagua-da-represa-bortolan-em-pocos-de-caldas-mg.ghtml>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

G1. **Lixo sólido de Poços de Caldas começa a ser transportado para cidade no interior de SP**. *G1 Sul de Minas*, 6 ago. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2022/08/06/lixo-solido-de-pocos-de-caldas-co-meca-a-ser-transportado-para-cidade-no-interior-de-sp.ghtml>>. Acesso em: 29 jun. 2024.

G1. **Represa Bortolan pode se tornar patrimônio cultural e imaterial de Poços de Caldas (MG)**. *G1 Sul de Minas*, 4 nov. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2024/11/04/represa-bortolan-pode-se-tornar-patrimonio-cultural-e-imaterial-de-pocos-de-caldas-mg.ghtml>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

GIBBS, R. J. Mechanisms controlling world water chemistry. **Science**, Washington, v. 170, n. 3962, p. 1088-1090, Dec. 1970.

GOOGLE. Imagens de satélite do Google Earth [recurso eletrônico]. 2024. Mountain View: Google, 2024.

GROHMANN C.H.; RICCOMINI, C.; ALVES, F. M. SRTM-Based Morphotectonic Analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, Southeastern Brazil. **Computer & Geosciences**, [s. l.], v. 33, p. 10–19, 2007.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

HACH Company. **DR-890 Colorimeter Procedures Manual**. Loveland: Hach, 2013.

HAKANSON, L. **A Manual of Lake Morphometry**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1981.

HANNA INSTRUMENTS BRASIL. **Manual de instruções Fotômetro Multiparâmetro HI83300**. Barueri: Hanna, 2020.

HEM, J.D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. 3rd ed. Washington: United States Geological Survey, 1985.

HENRY, R. Heat budgets, thermal structure, and dissolved oxygen in Brazilian reservoir. In: TUNDISI, J.G.; STRASKRABA, M. (ed.). **Theoretical reservoir ecology and its applications**. São Carlos: I.I.E./Backhuys Publishers/Brazilian Academy of Sciences, 1999. p. 125-151.

HORIBA Ltd. **Multi Water Quality Checker U-50 Series Instruction Manual**. Kyoto: Horiba, 2009.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). **INB Caldas**. [20--]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Caldas>>. Acesso em: 11 abr. 2024.

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. 2022. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: 19 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Carta topográfica**: folha SF-23-V-C-VI-4. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: IBGE, 1972.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Áreas urbanizadas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Base Cartográfica Contínua do Brasil (BC250)**. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2023>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais em 2017**: Resumo Executivo Anual. Belo Horizonte: IGAM, 2018.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2020**: resumo executivo anual. Belo Horizonte: IGAM, 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2022**: resumo executivo anual. Belo Horizonte: IGAM, 2023.

JARDIM, W. F. Medição e interpretação de valores do potencial redox (Eh) em matrizes ambientais. **Química nova**, Campinas, v. 37, p. 1233-1235, ago. 2014.

KALFF, J. **Limnology**: inland water ecosystems. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

KENNEDY, R.H.; WALKER, W.W. Reservoir nutrient dynamics. *In*: THORNTON, K. W. (org.). **Reservoir Limnology**: ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons, 1990. p. 109-130.

KORTMANN, R. Relative Thermal Resistance to Mixing. *In*: ANNUAL NORTH AMERICAN LAKE MANAGEMENT SOCIETY CONFERENCE, 12., 2003, [s. l.]. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2003.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. Tese (Doutorado em Ecologia: Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LOLLO, J. A. *et al.* Mudanças de uso e cobertura da terra e degradação ambiental em bacias hidrográficas. *In*: AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; BENINI, S. M. (org.). **Bacias hidrográficas**: fundamentos e aplicações. 1 ed. Tupã: ANAP, 2018. p. 15-40.

LEHMUSLUOTO, P. *et al.* Limnology in Indonesia: From the legacy of the past to the prospects for the future. **Limnology in developing countries**, [s. l.], v. 2, p. 119-234, 1999.

LÓPEZ, W.; CUARTAS, J. Thermal behavior of a tropical island reservoir (Hatillo Reservoir, Dominican Republic). **Actualidades Biológicas**, Medellín, Colombia, v. 46, n. 121, 2024.

MANTOURA, R. F. C.; DICKSON, A; RILEY, J. P. The complexation of metals with humic materials in natural waters. **Estuarine and Coastal Marine Science**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 387-408, 1978.

MARGALEF, R. **Limnología**. Barcelona: Omega, 1983.

MARQUES, J. R. **Influência da precipitação na qualidade da água de mananciais superficiais no município de Poços de Caldas–MG**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2018.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 1, p. 129-156, nov. 2018.

MEDEIROS, G. A. *et al.* Diagnóstico do aterro do município de Poços de Caldas, no Estado de Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 3-15, mai./ago. 2009.

MELLO, R. C. A. *et al.* Monossialitização como principal processo de intemperismo químico no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 1685–1699, jul./set. 2022.

MELO, C. E. S.; SÁNCHEZ, L. E. Evaluation of environmental rehabilitation practices in bauxite mining at the plateau of Poços de Caldas. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 73, n. 2, p. 247–252, Apr./Jun. 2020.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM/MG); Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH/MG). **Deliberação Normativa conjunta nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: 2022.

MOREIRA, F. H. S. **Interações entre escoamento superficial, hidrossedimentos e radionuclídeos (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) no Alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas-MG**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.

MOREIRA, F. H. S. *et al.* A Comparative Study of Methods for Determining the Concentration of Radon-222 in Spring Waters in Poços de Caldas Plateau, Brazil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 114–120, jan. 2018.

MOREIRA, F. R. S.; ALMEIDA-FILHO, R.; CÂMARA, G. Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: evaluation in the Poços de Caldas Plateau. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, supl., p. 183–190, 2003.

MOSELLO, R., *et al.* **AQUACON-MedBas** Subproject No. 6: acid rain analysis. Luxembourg: Environment Institute, 1996.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Washington: 2013. Resolution 30 m. Disponível em: <<https://doi.org/10.5069/G9445JDF>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

OPENSTREETMAP FOUNDATION. **Imagens de satélite do OpenStreetMap** [recurso eletrônico]. Cambridge, UK: OpenStreetMap Foundation, 2024. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org>>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PALMA, J. B.; ZUQUETTE, L. V. Avaliação do comportamento de frente de contaminação em função dos diferentes valores dos coeficientes de dispersividade. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 56, p. 21-47, 1. sem. 2005.

PEDRAZZI, F. J. M. *et al.* Avaliação da qualidade da água no reservatório de Itupararanga, Bacia do Alto Sorocaba (SP). **Geociências**, Rio Claro, v. 33, n. 1, p. 26-38, maio 2014.

PENG, J.F. *et al.* The remediation of heavy metals contaminated sediment. **Journal of hazardous materials**, [s. l.], v. 161, n. 2–3, p. 633–640, 2009.

PEREIRA, J. N. **Levantamento de dados estimados para *background* hidroquímico em área de preservação ambiental da Serra de São Domingos, quando comparados com drenagens urbanas do município de Poços de Caldas, MG**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

POÇOS DE CALDAS. Câmara Municipal. Comissão das Águas. **Avaliação da qualidade das águas e sedimentos das microbacias do Ribeirão das Antas e do Ribeirão de Caldas no Planalto de Poços de Caldas**. Poços de Caldas, 15 mar. 2012.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Turismo. **Pontos Turísticos**. 03 ago. 2017. Disponível em:
<<http://pocosdecaldas.mg.gov.br/turismo/pontos-turisticos>>. Acesso em: 19 maio 2023.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Governo. **Ofício n. 1048/2023**. Poços de Caldas, 05 jun. 2023. Apresenta informações sobre análise das águas da Represa do Cipó, Bortolan e do Ribeirão das Antas.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Esporte. **Brasileiro de moto aquática reúne pilotos e admiradores do esporte no Bortolan**. 05 set. 2023. Disponível em:
<<http://pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/brasileiro-de-moto-aquatica-reune-pilotos-e-admiradores-do-esporte-no-bortolan>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Esporte. **Poços de Caldas realiza a Primeira Etapa do Circuito Mineiro de Stand up Paddle neste fim de semana**. 06 out. 2023. Disponível em:
<<http://pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/pocos-de-caldas-realiza-primeira-etapa-do-circuito-mineiro-de-standup-paddle-neste-fim-de-semana>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Esporte. **Go Tri reúne 250 triatletas no Bortolan**. 20 nov. 2023. Disponível em:
<pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/go-tri-reune-250-triatletas-no-bortolan>. Acesso em: 19 abr. 2024.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. **Prefeitura promove a retirada de aguapés da represa Bortolan**. 19 mar. 2024. Disponível em:
<<http://pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/prefeitura-promove-a-retirada-de-aguapes-da-represa-a-bortolan>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. **Lei nº 9.930, de 24 de outubro de 2024**. Determina a instauração de processo de registro de Patrimônio Cultural Imaterial do Município de Poços de Caldas, da Represa Bortolan. Poços de Caldas, 2024. Disponível em:
<<http://pocosdecaldas.siscam.com.br/arquivo?Id=235287>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985-2023)**. [S. l.: s. n.], v. 1, 2024. Disponível em:
<<https://doi.org/10.58053/MapBiomias/XXUKA8>>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PROJETO ARCAL. **Qualidade das Águas do Ribeirão das Antas**. [S. l.: s. n.]. 2009.

RAMOS, E. **Represa do Bortolan vista de cima**. 2025. Disponível em: <http://youtube.com/playlist?list=PLv_JNOJEidKae4EXPqcYWLys2HFvYJpyG>. Acesso em: 21 mar. 2025.

RODRIGUEZ, P. H. *et al.* Determination of bioavailable aluminum in natural waters in the presence of suspended solids. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 38, n. 8, p. 1668-1681, 2019.

RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M. *et al.* Thermal structure and energy budget in a small high mountain lake: La Caldera, Sierra Nevada, Spain. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 879-894, 2004.

RYMA RECURSOS HÍDRICOS. **Proliferação de Macrófitas Aquáticas no reservatório Bortolan**. Poços de Caldas, fev. 2021. Disponível em <<http://pocosdecaldas.siscam.com.br/arquivo?Id=136873>>. Acesso em: 29 maio 2024.

SALGADO, A. A. R.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.P. Impactos da silvicultura de eucalipto no aumento das taxas de turbidez das águas fluviais: o caso de mananciais de abastecimento público de Caeté/MG. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 47-57, jan.-jun. 2006.

SANTOS, I. *et al.* **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SARDINHA, D. S. *et al.* Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo v. 18, n. 1, p. 259-272, mar. 2018.

SARDINHA, D. S. *et al.* Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicado em afluente da Represa Bortolan em Poços de Caldas (MG). **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, p. 95-108, abr./jun. 2019.

SARDINHA, D. S.; GODOY, L. H. Geodiversidade da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas (MG), Brasil: planejamento para a exploração geoturística. In: HAYASHI, C; SARDINHA, D. S.; PAMPLIN, P. A. Z. (org.). **Ciências ambientais: diagnósticos ambientais** [livro eletrônico]. Ribeirão Preto: Carmino Hayashi, 2020. p. 7-22.

SARDINHA, D. S. *et al.* Deposição atmosférica e transporte específico de sedimentos suspensos em bacias hidrográficas sob influência de mineração no Planalto de Poços de Caldas (MG). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 4, p. 1843-1862, jul. 2022.

SARDINHA, D. S. *et al.* **Monitoramento do córrego das Amoras, afluente do reservatório Bortolan, Poços de Caldas (MG)**. Poços de Caldas, set. 2023. Disponível em <<http://diegosouzasardinha.wixsite.com/professorsardinha/outros>>. Acesso em: 29 maio 2024.

SARDINHA, D. S. **Índice pluviométrico no Campus da Unifal de Poços de Caldas**. Poços de Caldas, 2024. Disponível em <<http://diegosouzasardinha.wixsite.com/professorsardinha/outros>>. Acesso em: 29 maio 2024.

SHANKAR, M. N. R.; MOHAN, G. Assessment of the groundwater potential and quality in Bhatsa and Kalu river basins of Thane district, western Deccan Volcanic Province of India. **Environmental Geology**, [S.l.], v. 49, p. 990-998, 2006.

SHEKAR, P. R.; MATHEW, A. Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. **Watershed Ecology and the Environment**, Beijing, China, v. 6, p. 13-25, 2024.

SCHORSCHER, H. D.; SHEA, M. E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. **Journal of Geochemical Exploration**, [s. l.], v. 45, p. 25-51, 1992.

SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. **Geological Society of America Bulletin**, McLean, USA, v. 74, n. 9, p. 1089-1100, 1963.

SILVA, M.T.L. **Aplicação do Índice de conformidade ao enquadramento (ICE) de cursos d'água**. 2017. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2001. p. 35-52.

SMITH, V. H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 10, p. 126-139, 2003.

SOUZA, A. M.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, R. M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osami Utsumi em drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas. **Geochimica Brasiliensis**, Belo Horizonte, v. 27, n. 1, p. 63, set. 2013.

STERLING, S. M. et al. Ionic aluminium concentrations exceed thresholds for aquatic health in Nova Scotian rivers, even during conditions of high dissolved organic carbon and low flow. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 24, p. 4763-4775, 2020.

STRAHLER, A. N. **Physical Geography**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1960.

SUKRISTIYANTI, S.; MARIA, R.; LESTIANA, H. Watershed-based morphometric analysis: a review. In: GLOBAL COLLOQUIUM ON GEOSCIENCES AND ENGINEERING, 2017, Bandung, Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S. l.]: IOP Publishing, 2017. v. 118. p. 012028.

TEIXEIRA, W. *et al.* **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2000.

TOLBERT, G. E. **The Uraniferous Zirconium Deposits of the Poços de Caldas Plateau, Brazil**. Washington: United States Government Printing Office, 1966. (Geological Survey Bulletin, 1185-C).

TEIXEIRA, G. Z. **Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes: Análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020**. 2022. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia Ambiental. **Linhas de pesquisa**. [20--]. Disponível em: <<http://www.unifal-mg.edu.br/ppgcea/linhas-de-pesquisa>>. Acesso em: 19 maio 2023.

VALETON I. *et al.* Supergene alteration since the upper cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of the Poços de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. **Applied Geochemistry**, Great Britain, v. 12, n. 2, p. 133-154, Mar. 1997.

VIANA, T. H. **Estudo do conteúdo de calor e suas influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água**. 2009. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

VON SPERLING, E. **Morfologia de lagos e represas**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1999.

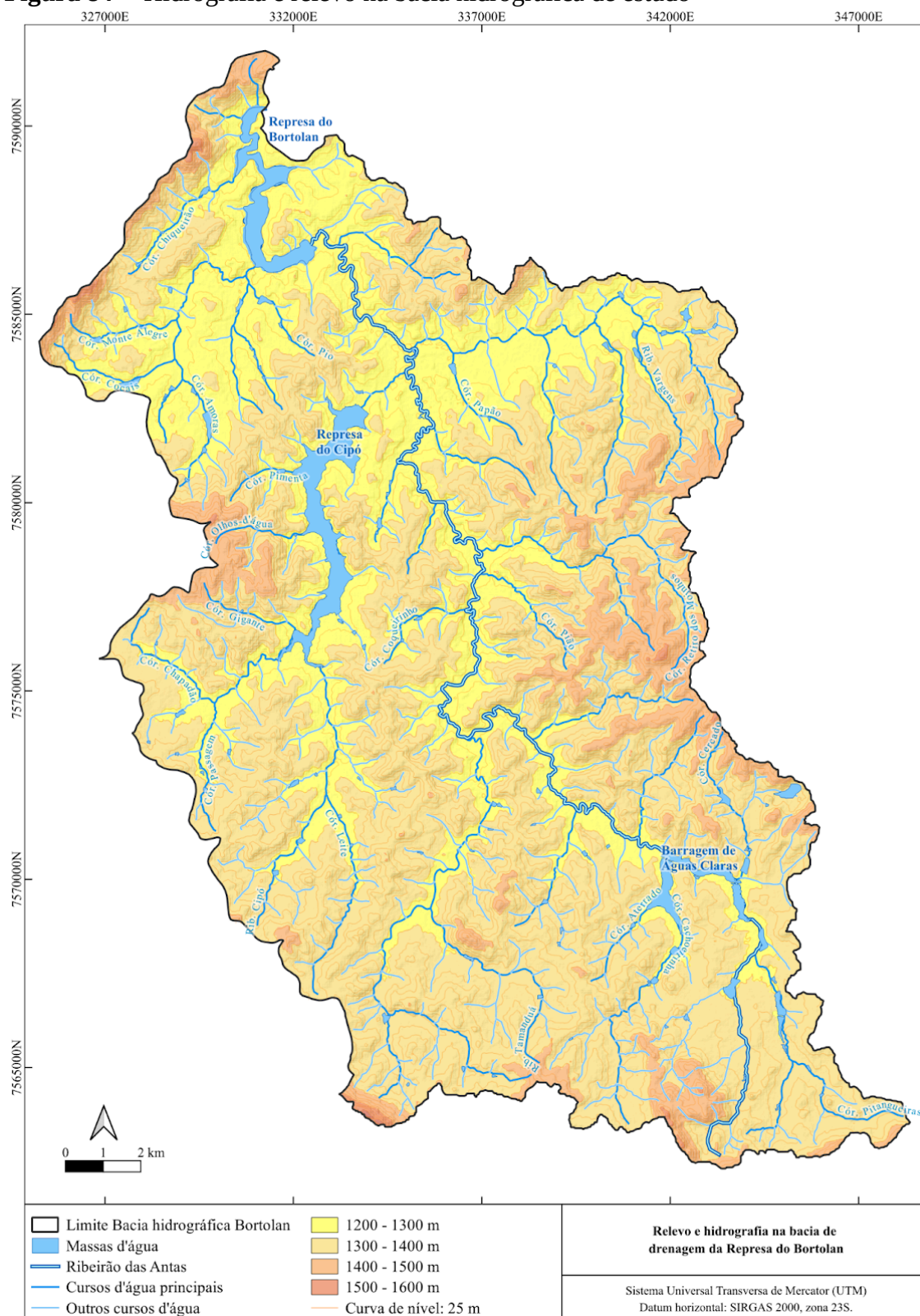
VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 3rd. Ed. San Diego: Academic Press, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - BACIA HIDROGRÁFICA DO BORTOLAN

Figura 84 – Hidrografia e relevo na bacia hidrográfica de estudo



Fonte: A autora com dados de Brasil (2022), IBGE (1972) e NASA (2013).

APÊNDICE B - ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Tabela 24 – Análise de Kruskal-Wallis

Parâmetro	Variável de agrupamento: coletas			Variável de agrupamento: profundidade			Variável de agrupamento: local		
	χ^2	p	ϵ^2	χ^2	p	ϵ^2	χ^2	p	ϵ^2
Cl-	22,77	< .001	0,6901	1,40654	0,495	0,04262	1,8225	0,402	0,05523
F-	20,39	< .001	0,6177	0,00649	0,997	1,97.10 ⁻⁴	0,5574	0,757	0,01689
HCO3	12,08	0,007	0,3659	4,05256	0,132	0,1228	6,8511	0,033	0,20761
PO4	28,14	< .001	0,8527	0,32889	0,848	0,00997	0,7507	0,687	0,02275
NO3	27,15	< .001	0,8228	0,78193	0,676	0,02369	0,6604	0,719	0,02001
SO4	30,97	< .001	0,9386	0,22507	0,894	0,00682	0,3397	0,844	0,01029
Na	23,65	< .001	0,7168	0,16688	0,92	0,00506	2,8602	0,239	0,08667
K+	27,57	< .001	0,8353	0,30959	0,857	0,00938	1,8082	0,405	0,05479
Mg	8,73	0,033	0,2646	3,21912	0,2	0,09755	2,8635	0,239	0,08677
Ca	19,37	< .001	0,5868	0,27884	0,87	0,00845	0,9645	0,617	0,02923
Cu	3,99	0,263	0,1209	0,05555	0,973	0,00168	0,268	0,875	0,00812
Al	3,47	0,324	0,1053	0,15295	0,926	0,00463	0,0839	0,959	0,00254
Mn	12,18	0,007	0,3691	2,94267	0,23	0,08917	5,2659	0,072	0,15957
Fe tot	9,35	0,025	0,2832	4,38099	0,112	0,13276	1,3896	0,499	0,04211
Fe2+	13,33	0,004	0,404	0,98474	0,611	0,02984	1,2894	0,525	0,03907
Ni	23,79	< .001	0,721	0,00748	0,996	2,27.10 ⁻⁴	0,0631	0,969	0,00191
SiO2	1,93	0,587	0,0585	1,49355	0,474	0,04526	19,58	< .001	0,59333
Temp	27,07	< .001	0,8203	0,80111	0,67	0,02428	2,4446	0,295	0,07408
pH	12,42	0,006	0,3765	12,90125	0,002	0,39095	2,2884	0,318	0,06935
ORP	11,04	0,011	0,3347	1,95988	0,375	0,05939	2,4915	0,288	0,0755
Cond	18,71	< .001	0,567	3,32598	0,19	0,10079	3,3202	0,19	0,10061
Turb	7,67	0,053	0,2475	8,30214	0,016	0,26781	5,6931	0,058	0,18365
OD	8,43	0,038	0,2554	8,7063	0,013	0,26383	5,5561	0,062	0,16837

Fonte: A autora (2025).

Tabela 25 – Coeficientes de correlação de Pearson, à esquerda, e de Spearman, à direita, com destaques para aqueles acima de $\pm 0,65$. Valor de p apresentado entre parênteses

	Cl-	F-	HCO3	PO4	NO3	SO4	Na	K+	Mg	Ca	Cu	Al	Mn	Fe tot	Fe2+	Ni	SiO2	Temp	pH	ORP	Cond	Turb	OD
Cl-	—	-0,4 (0,019)	-0,362 (0,035)	-0,518 (0,002)	0,574 (<0,001)	-0,14 (0,430)	0,624 (<0,001)	-0,07 (0,693)	-0,117 (0,509)	0,38 (0,027)	-0,117 (0,512)	-0,081 (0,649)	-0,509 (0,002)	-0,562 (<0,001)	-0,339 (0,050)	-0,566 (<0,001)	0,079 (0,656)	-0,781 (<0,001)	-0,182 (0,303)	0,226 (0,199)	0,073 (0,683)	-0,034 (0,852)	-0,166 (0,349)
F-	-0,445 (0,008)	—	0,362 (0,035)	0,25 (0,153)	-0,274 (0,117)	0,623 (<0,001)	-0,668 (<0,001)	0,288 (0,099)	0,312 (0,073)	-0,667 (<0,001)	0,107 (0,548)	0,174 (0,325)	0,346 (0,045)	0,246 (0,161)	0,079 (0,657)	0,425 (0,012)	-0,141 (0,425)	0,527 (0,001)	0,196 (0,266)	-0,289 (0,097)	0,316 (0,069)	-0,053 (0,772)	0,114 (0,520)
HCO3	-0,441 (0,009)	0,488 (0,003)	—	0,474 (0,005)	-0,339 (0,050)	0,231 (0,188)	-0,516 (0,002)	0,425 (0,012)	-0,036 (0,839)	-0,22 (0,212)	0,03 (0,867)	0,109 (0,538)	0,638 (<0,001)	0,524 (0,001)	0,375 (0,029)	0,533 (0,001)	0,599 (<0,001)	0,194 (0,271)	-0,139 (0,432)	-0,231 (0,188)	0,291 (0,094)	-0,015 (0,934)	-0,274 (0,116)
PO4	-0,672 (<0,001)	0,268 (0,125)	0,524 (0,001)	—	-0,828 (<0,001)	-0,002 (0,992)	-0,442 (0,009)	0,618 (<0,001)	0,155 (0,382)	-0,447 (0,008)	0,228 (0,195)	-0,052 (0,772)	0,374 (0,029)	0,278 (0,111)	0,512 (0,002)	0,754 (<0,001)	0,328 (0,058)	0,341 (0,048)	0,497 (0,003)	0,027 (0,879)	-0,18 (0,308)	0,224 (0,217)	0,423 (0,013)
NO3	0,737 (<0,001)	-0,288 (0,098)	-0,399 (0,019)	-0,804 (<0,001)	—	-0,087 (0,626)	0,541 (<0,001)	-0,564 (<0,001)	-0,098 (0,582)	0,414 (0,015)	-0,148 (0,402)	-0,016 (0,930)	-0,385 (0,025)	-0,298 (0,087)	-0,559 (<0,001)	-0,719 (<0,001)	-0,15 (0,397)	-0,418 (0,014)	-0,549 (<0,001)	0,074 (0,678)	0,172 (0,331)	-0,33 (0,065)	-0,434 (0,010)
SO4	-0,302 (0,083)	0,778 (<0,001)	0,481 (0,004)	0,377 (0,028)	-0,299 (0,086)	—	-0,42 (0,013)	0,454 (0,007)	0,485 (0,004)	-0,608 (<0,001)	-0,263 (0,132)	0,323 (0,062)	0,309 (0,076)	0,251 (0,153)	0,119 (0,501)	0,075 (0,673)	-0,131 (0,462)	0,12 (0,498)	0,047 (0,793)	-0,238 (0,175)	0,697 (<0,001)	0,017 (0,925)	-0,02 (0,913)
Na	0,569 (<0,001)	-0,675 (<0,001)	-0,597 (0,023)	-0,389 (0,009)	0,443 (<0,001)	-0,648 (<0,001)	—	-0,283 (0,105)	-0,182 (0,303)	0,598 (<0,001)	-0,099 (0,579)	-0,181 (0,305)	-0,556 (<0,001)	-0,469 (0,005)	-0,104 (0,559)	-0,535 (0,001)	-0,075 (0,674)	-0,613 (<0,001)	-0,208 (0,238)	0,347 (0,044)	-0,172 (0,332)	-0,048 (0,795)	-0,035 (0,844)
K+	-0,071 (0,689)	0,404 (0,018)	0,405 (0,017)	0,503 (0,002)	-0,367 (0,033)	0,703 (<0,001)	-0,357 (0,038)	—	0,393 (0,021)	-0,485 (0,004)	-0,027 (0,878)	0,195 (0,270)	0,295 (0,090)	0,153 (0,388)	0,643 (<0,001)	0,47 (0,005)	0,356 (0,039)	-0,185 (0,294)	0,437 (0,010)	0,092 (0,604)	0,218 (0,217)	0,284 (0,115)	0,287 (0,100)
Mg	0,017 (0,924)	0,304 (0,081)	-0,042 (0,815)	0,179 (0,312)	-0,01 (0,956)	0,484 (0,004)	-0,197 (0,264)	0,455 (0,007)	—	-0,697 (<0,001)	-0,236 (0,180)	0,122 (0,492)	-0,013 (0,944)	0,037 (0,837)	0,125 (0,482)	0,12 (0,501)	-0,286 (0,101)	0,006 (0,973)	0,323 (0,062)	0,287 (0,100)	0,088 (0,619)	-0,129 (0,483)	0,496 (0,003)
Ca	0,477 (0,004)	-0,731 (<0,001)	-0,371 (0,031)	-0,538 (0,001)	0,447 (0,008)	-0,832 (<0,001)	0,703 (<0,001)	-0,558 (<0,001)	-0,6 (<0,001)	—	0,133 (0,454)	-0,138 (0,437)	-0,169 (0,339)	-0,239 (0,173)	-0,214 (0,224)	-0,403 (0,018)	0,269 (0,124)	-0,419 (0,014)	-0,413 (0,015)	0,026 (0,884)	-0,134 (0,448)	-0,185 (0,310)	-0,438 (0,010)
Cu	-0,187 (0,290)	0,045 (0,799)	-0,135 (0,446)	-0,02 (0,909)	0,007 (0,967)	-0,162 (0,360)	0,032 (0,858)	-0,163 (0,357)	0,148 (0,404)	-0,006 (0,972)	—	0,124 (0,485)	-0,058 (0,744)	0,007 (0,969)	-0,057 (0,748)	0,287 (0,100)	0,038 (0,830)	0,054 (0,761)	0,002 (0,989)	-0,006 (0,972)	-0,137 (0,439)	-0,025 (0,893)	-0,12 (0,499)
Al	-0,121 (0,497)	0,387 (0,024)	0,303 (0,081)	0,074 (0,678)	-0,147 (0,408)	0,339 (0,050)	-0,355 (0,039)	0,302 (0,082)	-0,148 (0,404)	-0,306 (0,079)	0,009 (0,961)	—	0,119 (0,503)	0,217 (0,199)	0,226 (0,053)	0,033 (0,663)	-0,077 (0,924)	-0,017 (0,211)	-0,22 (0,556)	-0,105 (0,147)	0,254 (0,089)	0,089 (0,627)	-0,172 (0,332)
Mn	-0,488 (0,003)	0,292 (0,094)	0,553 (<0,001)	0,41 (0,016)	-0,401 (0,019)	0,402 (0,019)	-0,492 (0,003)	0,288 (0,099)	0,037 (0,834)	-0,287 (0,100)	-0,169 (0,339)	-0,076 (0,669)	—	0,707 (<0,001)	0,276 (0,114)	0,397 (0,020)	0,462 (0,006)	0,314 (0,070)	-0,186 (0,293)	-0,248 (0,158)	0,33 (0,057)	0,05 (0,787)	-0,244 (0,164)
Fe tot	-0,486 (0,004)	0,268 (0,125)	0,538 (0,001)	0,289 (0,097)	-0,272 (0,120)	0,29 (0,096)	-0,375 (0,029)	0,062 (0,729)	-0,079 (0,658)	-0,233 (0,185)	0,207 (0,240)	-0,03 (0,865)	0,647 (<0,001)	—	0,246 (0,160)	0,308 (0,077)	0,329 (0,058)	0,357 (0,038)	-0,098 (0,581)	-0,116 (0,513)	0,162 (0,359)	0,063 (0,732)	-0,115 (0,516)
Fe2+	-0,208 (0,238)	-0,035 (0,845)	0,158 (0,371)	0,03 (0,867)	-0,223 (0,205)	-0,029 (0,871)	0,001 (0,998)	-0,11 (0,534)	-0,422 (0,013)	0,139 (0,434)	-0,043 (0,811)	0,075 (0,675)	0,31 (0,075)	0,475 (0,005)	—	0,433 (0,011)	0,245 (0,163)	0,047 (0,791)	0,274 (0,116)	-0,018 (0,920)	0,089 (0,615)	0,268 (0,138)	0,17 (0,337)
Ni	-0,633 (<0,001)	0,465 (0,006)	0,522 (0,002)	0,706 (<0,001)	-0,688 (<0,001)	0,435 (0,010)	-0,468 (0,005)	0,486 (0,004)	0,111 (0,531)	-0,484 (0,004)	0,127 (0,473)	0,305 (0,080)	0,346 (0,045)	0,22 (0,211)	-0,029 (0,869)	—	0,208 (0,237)	0,469 (0,005)	0,31 (0,074)	-0,018 (0,921)	-0,121 (0,497)	0,17 (0,351)	0,21 (0,233)
SiO2	0,005 (0,979)	-0,085 (0,632)	0,57 (<0,001)	0,289 (0,098)	-0,17 (0,337)	-0,018 (0,922)	-0,068 (0,704)	0,333 (0,055)	-0,272 (0,120)	0,245 (0,163)	-0,066 (0,713)	0,063 (0,722)	0,366 (0,033)	0,322 (0,063)	0,11 (0,535)	0,206 (0,243)	—	-0,231 (0,188)	-0,188 (0,287)	-0,143 (0,419)	0,124 (0,486)	-0,13 (0,478)	-0,321 (0,064)
Temp	-0,787 (<0,001)	0,539 (0,001)	0,344 (0,047)	0,399 (0,020)	-0,493 (0,003)	0,309 (0,075)	-0,589 (<0,001)	-0,199 (0,259)	-0,01 (0,956)	-0,525 (0,001)	0,183 (0,300)	0,147 (0,405)	0,268 (0,125)	0,368 (0,032)	0,153 (0,388)	0,396 (0,020)	-0,243 (0,166)	—	0,207 (0,240)	-0,403 (0,018)	-0,157 (0,375)	0,024 (0,898)	0,208 (0,238)
pH	-0,157 (0,377)	0,096 (0,589)	-0,189 (0,283)	0,403 (0,018)	-0,474 (0,005)	0,167 (0,346)	-0,083 (0,643)	0,369 (0,032)	0,264 (0,131)	-0,372 (0,030)	-0,065 (0,714)	-0,035 (0,843)	-0,139 (0,432)	-0,181 (0,305)	-0,125 (0,480)	0,253 (0,149)	-0,137 (0,439)	0,121 (0,495)	—	0,097 (0,587)	-0,328 (0,059)	0,191 (0,294)	0,815 (<0,001)
ORP	0,196 (0,268)	-0,205 (0,244)	-0,269 (0,123)	0,018 (0,922)	0,164 (0,353)	-0,168 (0,343)	0,323 (0,062)	0,174 (0,325)	0,427 (0,012)	0,099 (0,577)	0,113 (0,526)	-0,339 (0,050)	-0,23 (0,190)	-0,291 (0,095)	-0,568 (<0,001)	0,02 (0,911)	-0,123 (0,487)	-0,427 (0,012)	0,051 (0,776)	—	-0,311 (0,073)	0,048 (0,793)	0,403 (0,018)
Cond	0,199 (0,258)	0,275 (0,115)	0,231 (0,189)	-0,243 (0,508)	0,315 (0,070)	0,349 (0,043)	-0,163 (0,358)	0,013 (0,942)	-0,086 (0,629)	-0,118 (0,506)	-0,139 (0,432)	0,027 (0,880)	0,139 (0,433)	0,152 (0,390)	0,16 (0,367)	-0,163 (0,357)	0,026 (0,883)	-0,027 (0,880)	-0,382 (0,026)	-0,339 (0,050)	—	-0,236 (0,064)	-0,399 (0,020)
Turb	-0,098 (0,593)	0,167 (0,361)	0,063 (0,731)	0,121 (0,508)	-0,19 (0,299)	0,176 (0,334)	-0,157 (0,390)	0,326 (0,069)	-0,091 (0,619)	-0,212 (0,244)	-0,115 (0,530)	0,74 (<0,001)	-0,018 (0,924)	-0,107 (0,560)	0,051 (0,780)	0,273 (0,131)	0,015 (0,934)	0,03 (0,869)	0,08 (0,664)	-0,129 (0,481)	-0,331 (0,064)	—	0,154 (0,399)
OD	-0,186 (0,293)	0,095 (0,593)	-0,239 (0,173)	-0,239 (0,029)	-0,342 (0,047)	0,146 (0,410)	0,047 (0,794)	0,296 (0,090)	0,499 (0,003)	-0,378 (0,028)	0,02 (0,912)	-0,251 (0,153)	-0,161 (0,364)	-0,13 (0,464)	-0,185 (0,295)	0,173 (0,327)	-0,306 (0,078)	0,121 (0,494)	0,787 (<0,001)	0,409 (0,016)	-0,387 (0,024)	-0,044 (0,812)	—

Fonte: A autora (2025).

APÊNDICE C - FICHAS DE CAMPO DO PONTO DE AMOSTRAGEM P1

Quadro 3 – Ficha do Campo 1 para P1

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331017E7586733S	1/9/23	09:36	21,4	1163	881,4	Nublado. Vento (máx 15 mph). Presença de macrófitas.		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,10	19,64	6,39	150	46	18,1	4,61	51,8	30
0,15	19,69	6,39	143	46	18,5	4,44	49,9	30
0,20	19,65	6,44	139	46	19,1	4,21	47,3	30
0,25	20,02	6,65	131	46	30,2	4,27	48,3	30

Fonte: A autora (2025).

Quadro 4 – Ficha do Campo 2 para P1

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331167E7586459S	20/10/23	08:44	21,9	1187	878,7	Vento 2 km/h		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,15	23,79	6,84	132	95	4,7	6,85	82,8	61
0,25	23,76	6,80	129	91	8,9	4,53	54,7	60
0,25	23,81	6,77	139	76	16,3	5,51	66,6	52
0,35	23,73	6,79	130	94	4,9	4,15	50,1	61
0,60	23,65	6,74	135	94	5,5	4,04	48,7	61
0,80	23,60	6,68	141	94	4,8	4,09	49,2	61
1,00	23,62	6,62	156	94	5,5	3,94	47,5	61
1,15	23,62	6,36	157	94	5,7	4,12	49,6	61
1,30	23,60	6,02	169	95	5,6	4,27	51,4	61
1,45	23,60	5,68	179	95	4,9	4,33	52,2	61
1,55	23,69	5,76	176	95	6,2	4,13	49,8	62
1,60	23,48	5,74	145	97	113	4,78	57,5	63

Fonte: A autora (2025).

Quadro 5 – Ficha do Campo 3 para P1

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
-21,8172600° S -46,6334230° W	19/3/24	08:59	29,2	1215	875,7	Aguapés		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,15	23,84	6,21	123	73	2,3	2,48	30,0	48
0,25	23,84	6,17	123	73	2,2	2,50	30,2	48
0,55	23,81	5,92	132	73	2,4	2,53	30,6	48
0,85	23,83	5,62	135	73	3,9	2,58	31,2	47
1,10	23,86	5,43	124	74	29,9	2,85	34,5	48
1,25	23,78	5,35	165	73	4,3	2,41	29,1	48
1,35	24,31	5,29	104	77	106,0	3,61	43,8	50
1,35	23,79	5,35	169	73	6,0	2,35	28,4	47

Fonte: A autora (2025).

Quadro 6 – Ficha do Campo 4 para P1

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
P1	5/7/24	10:10	24,6		881,6			
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
1,20	16,95	6,32	87	94	13,4	1,86	20,0	61
1,10	16,68	6,29	85	91	10,8	1,65	17,5	59
1,00	16,69	6,29	86	90	10,3	1,55	16,5	59
0,90	16,54	6,30	89	88	3,7	1,64	17,4	57
0,80	16,47	6,33	96	89	3,4	2,01	21,2	57
0,70	16,46	6,31	106	89	3,4	1,89	20,0	58
0,60	16,46	6,33	109	89	3,1	1,91	20,3	58
0,50	16,46	6,32	111	89	2,7	1,91	20,3	58
0,40	16,47	6,33	113	88	2,0	1,90	20,1	57
0,30	16,47	6,32	115	89	1,6	1,95	20,3	58
0,20	16,44	6,32	116	90	1,3	1,81	19,0	59
0,10	16,43	6,32	116	91	2,0	1,54	16,2	59

Fonte: A autora (2025).

APÊNDICE D - FICHAS DE CAMPO DO PONTO DE AMOSTRAGEM P2

Quadro 7 – Ficha do Campo 1 para P2

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331090E7559042S	1/9/23	10:10	23,3	1160	881,7	Vento (máx 15 mph). Chuva fraca nos dias anteriores.		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,05	20,60	9,06	168	46	10,8	10,60	121,2	30
0,20	20,60	9,06	169	46	11,0	10,46	119,6	30
0,35	20,58	9,02	172	46	10,5	10,85	124,0	30
0,40	20,49	8,91	176	46	10,6	10,76	122,8	30
0,50	20,54	8,94	178	46	11,1	11,14	127,2	30
0,90	20,61	8,75	181	46	9,5	10,78	123,2	30
1,00	20,45	8,47	190	46	9,6	10,52	119,9	30
1,25	20,30	8,28	196	45	9,9	10,51	119,5	30
1,35	20,00	7,71	211	45	9,9	9,38	106,1	29
1,50	19,73	7,34	217	46	7,6	9,20	103,5	30
1,70	19,78	7,32	211	46	7,7	8,88	100,0	30
1,75	19,81	7,15	212	46	9,0	8,56	96,4	30
1,80	19,64	7,18	182	47	7,0	7,88	88,6	31
1,85	19,48	6,43	212	48	274,0	7,90	88,5	31
1,90	19,52	6,41	214	48	175,0	7,81	87,6	31
1,95	19,53	6,42	204	48	56,8	6,92	77,6	31
2,10	19,62	6,59	173	47	225,0	8,40	94,3	31

Fonte: A autora (2025).

Quadro 8 – Ficha do Campo 2 para P2

(continua)

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331168E7588984S	20/10/23	10:03	26,0	1214	876,4			
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,10	26,22	7,26	131	14	60,1	5,91	74,2	9
0,15	26,63	7,22	130	73	13,6	5,31	67,1	50
0,25	26,63	7,25	151	96	6,2	6,60	83,4	62
0,40	26,60	7,25	147	96	5,6	7,76	98,0	62

Quadro 8 - Ficha do Campo 2 para P2

(conclusão)								
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,55	26,15	7,25	165	97	5,4	9,91	124,3	63
0,70	26,02	7,25	166	97	5,3	8,24	103,1	63
0,85	25,68	7,23	165	97	6,0	9,09	113,2	63
1,00	25,57	7,23	169	97	6,1	9,48	117,8	63
1,15	25,51	7,23	168	97	5,8	9,48	117,8	63
1,30	25,48	7,21	168	97	5,9	9,44	117,2	63
1,45	25,41	7,15	168	97	6,5	9,21	114,2	63
1,60	25,37	7,12	170	97	5,2	8,89	110,1	63
1,75	25,37	7,00	166	97	5,5	8,41	104,3	63
1,85	25,34	7,08	163	97	6,0	8,84	109,6	63
2,05	25,34	7,06	160	97	6,2	8,15	100,9	63
2,20	25,33	7,05	161	97	5,5	8,25	102,2	63
2,35	25,32	7,04	157	97	4,8	8,48	105,1	63
2,50	25,31	7,01	152	98	6,7	8,02	99,3	63
2,65	25,25	6,92	139	98	6,8	7,47	92,4	64
2,80	25,22	6,89	110	99	8,0	5,93	73,0	64
2,95	25,05	6,74	134	100	6,2	4,98	61,4	65
3,05	25,00	6,68	128	100	5,9	4,30	53,0	65
3,20	24,93	6,58	107	101	8,0	3,25	40,0	66
3,35	24,99	6,22	102	102	13,3	2,46	30,3	66

Fonte: A autora (2025).

Quadro 9 – Ficha do Campo 3 para P2

(continua)								
Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
21.781754°S 46.633308°W	19/3/24	09:34	32,0	1213	876	Aguapés		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,20	28,25	6,84	130	68	4,2	6,17	79,9	44
0,30	28,09	6,86	127	68	2,3	6,15	79,4	45
0,60	27,79	6,85	124	68	2,5	6,25	80,4	44
0,85	27,68	6,82	122	68	2,7	6,14	78,9	44

Quadro 9 - Ficha do Campo 3 para P2

								(conclusão)
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
1,00	27,58	6,71	125	68	2,7	5,98	76,7	44
1,25	27,51	6,21	148	68	2,7	5,71	73,1	44
1,55	27,46	5,87	160	68	2,8	5,28	67,6	44
1,75	27,35	5,71	165	70	2,5	5,07	64,8	45
1,85	27,06	5,40	167	72	4,7	3,43	43,6	47
2,10	26,81	5,22	165	72	3,9	1,86	23,6	47
2,45	26,41	5,12	159	74	5,2	1,52	19,2	48
2,75	26,28	5,08	161	76	5,1	1,60	20,1	49
2,85	26,22	5,06	126	78	7,1	1,59	20,0	50
2,95	26,32	5,04	126	76	7,6	1,06	13,3	51
3,05	26,33	5,14	104	78	17,6	2,30	28,9	51

Fonte: A autora (2025).

Quadro 10 – Ficha do Campo 4 para P2

(continua)								
Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
P1	5/7/24	11:05	24,9		880,7			
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
2,20	18,48	6,26	172	83	8,2	3,73	40,5	54
2,10	18,46	6,23	155	83	8,2	3,74	41,0	54
2,00	18,45	6,24	157	83	6,9	4,25	47,0	54
1,90	18,45	6,26	161	83	5,4	4,40	48,2	54
1,80	18,45	6,26	162	83	4,5	4,40	48,2	54
1,70	18,47	6,28	163	83	4,3	4,63	50,4	54
1,60	18,47	6,29	166	83	3,7	4,47	49,0	54
1,50	18,47	6,33	169	82	3,6	4,48	49,2	53
1,40	18,51	6,38	172	81	3,3	5,00	55,0	53
1,30	18,53	6,41	174	81	3,1	5,14	56,7	53
1,20	18,55	6,44	176	81	3,0	5,33	58,6	53
1,10	18,57	6,46	178	81	3,2	5,20	56,9	53
1,00	18,58	6,49	179	81	3,0	5,29	58,1	53
0,90	18,60	6,51	180	81	3,0	5,14	56,6	53

Quadro 10 - Ficha do Campo 4 para P2

								(conclusão)
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,80	18,61	6,58	179	81	3,1	5,39	59,2	53
0,70	18,62	6,65	171	81	3,3	5,33	58,7	53
0,60	18,65	6,68	172	81	3,1	5,32	58,6	53
0,50	18,68	6,69	173	82	3,1	5,39	59,2	53
0,40	18,74	6,70	174	83	3,0	5,40	60,0	53
0,30	19,20	6,71	176	81	2,6	5,23	58,2	53
0,20	19,61	6,71	175	83	2,7	5,69	64,0	54
0,10	19,70	6,73	173	82	2,6	5,70	64,1	53

Fonte: A autora (2025).

APÊNDICE E - FICHAS DE CAMPO DO PONTO DE AMOSTRAGEM P1

Quadro 11 – Ficha do Campo 1 para P3

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331132E7590442S	1/9/23	11:07	26,0	1167	879,5	Vento (máx 15 mph). Chuva fraca nos dias anteriores.		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,15	20,90	7,32	220	50	8,8	6,01	69,1	32
0,30	20,84	7,30	222	49	8,5	6,71	77,0	32
0,50	20,74	7,26	224	50	9,3	6,53	74,9	32
0,75	20,54	7,22	224	50	9,4	6,51	74,4	32
1,05	20,30	7,18	224	50	8,2	6,41	72,9	32
1,20	19,85	7,08	224	50	7,8	5,74	64,7	32
1,50	19,66	6,99	223	50	8,1	5,10	57,3	33
1,85	19,46	6,94	223	51	7,6	4,53	50,7	33
2,25	19,42	6,94	221	51	8,0	4,55	50,9	34
2,60	19,36	6,92	218	51	7,4	4,43	49,5	33
2,90	19,33	6,91	213	51	6,4	4,39	49,0	33
3,30	19,31	6,91	213	52	6,7	4,20	46,9	34
3,70	19,28	6,90	210	51	8,1	4,04	45,0	33
4,05	19,25	6,85	204	51	6,5	4,10	45,7	33
4,45	19,22	6,88	201	51	6,5	4,05	45,1	33
4,95	19,24	6,79	199	51	6,6	3,65	40,7	33
5,25	19,22	6,78	183	51	7,4	4,40	49,1	33
5,65	19,24	6,87	174	51	9,3	4,31	48,1	33
5,95	19,22	6,84	157	51	7,6	4,43	49,3	33
6,30	19,35	6,85	131	51	10,4	4,27	47,7	33
6,70	19,67	6,36	197	51	33,4	3,74	42,1	33

Fonte: A autora (2025).

Quadro 12 – Ficha do Campo 2 para P3

(continua)

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
0331124E7590427S	20/10/23	11:00	28,2	1198	878,4			
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,20	26,94	9,22	73	77	15,2	7,52	95,5	50
0,30	26,84	9,20	64	76	19,7	8,01	101,6	50
0,50	26,74	9,15	46	75	18,1	8,89	112,5	49
0,60	26,64	9,30	95	75	12,2	9,86	124,7	49
0,80	26,53	9,11	117	75	14,7	11,44	144,3	49
0,95	25,23	8,01	166	76	11,7	10,12	127,2	49
1,10	25,89	7,44	178	77	17,6	9,92	124,0	50
1,30	25,81	7,36	182	78	11,0	9,32	116,4	51
1,55	25,79	7,34	183	78	11,9	9,40	117,3	50
1,80	25,77	7,32	182	77	11,2	9,70	121,1	50
2,05	25,77	7,28	183	78	12,1	9,13	113,8	51
2,30	25,76	7,23	184	79	12,4	9,44	117,7	51
2,50	25,73	7,23	184	79	12,0	9,38	116,9	51
2,75	25,72	7,24	183	79	10,0	9,12	113,7	51
3,00	25,71	7,34	178	76	11,9	9,80	122,1	49
3,25	25,70	7,37	177	75	11,2	9,74	121,4	49
3,45	25,70	7,40	175	74	14,8	10,34	128,8	48
3,60	25,69	7,44	171	73	13,7	9,33	116,3	48
3,75	25,68	7,49	167	72	14,4	9,78	121,8	47
4,00	25,67	7,44	164	72	15,7	9,69	120,7	47
4,20	25,64	7,19	165	77	10,6	9,15	113,9	50
4,40	25,61	7,09	163	81	9,2	8,07	100,4	52
4,45	25,79	7,64	162	79	9,8	9,26	115,5	51
4,60	25,32	7,06	164	82	8,5	7,05	87,5	54
4,80	25,52	7,04	164	82	7,0	8,13	101,0	54
5,00	25,44	7,00	158	84	6,6	7,04	87,4	54
5,20	25,34	6,96	168	85	8,3	6,32	78,3	55
5,35	25,26	6,92	170	86	6,4	5,51	68,2	56
5,60	25,15	6,88	167	86	6,5	4,54	56,1	56
5,80	25,07	6,86	164	86	8,4	4,40	54,3	56
6,00	24,96	6,83	153	86	9,2	3,51	43,2	56

Quadro 12 - Ficha do Campo 2 para P3

(conclusão)

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
6,20	24,72	6,78	141	87	8,5	1,85	22,7	57
6,45	24,66	6,77	149	87	7,7	1,90	23,2	56
6,65	24,62	6,74	137	87	7,9	1,54	18,9	56
6,95	24,58	6,72	130	87	10,3	1,25	15,3	56
7,20	24,54	6,71	122	87	10,0	1,01	12,4	56
7,40	24,54	6,71	123	87	8,7	0,94	11,4	56
7,55	29,49	6,66	106	87	9,8	0,54	6,6	57
7,70	24,51	6,56	103	87	10,4	0,59	7,2	57
7,95	24,70	6,28	58	89	82	0,22	2,7	58

Fonte: A autora (2025).

Quadro 13 – Ficha do Campo 3 para P3

(continua)

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
21,7817540°S 46,6333080°W	19/3/24	10:19	33,6	1215	876,3	Lançamento de esgoto de elevatória		
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
0,15	28,70	7,03	88	69	3,6	6,25	81,5	44
0,35	28,46	6,98	111	68	3,1	6,11	79,4	44
0,55	27,92	6,92	106	68	3,1	6,02	77,6	44
0,80	27,67	6,84	108	68	3,4	5,79	74,4	44
1,00	27,53	6,79	112	68	3,2	5,45	70,1	44
1,40	27,36	6,74	114	68	3,4	5,24	67,0	44
1,80	27,22	6,69	115	68	3,1	5,09	64,9	44
2,15	27,14	6,64	113	68	3,0	4,90	62,4	44
2,30	27,05	6,58	109	68	2,9	4,31	54,8	44
2,55	26,93	6,45	110	69	2,8	3,34	42,5	45
2,80	26,59	6,31	113	69	2,4	2,39	30,1	45
3,10	26,46	6,19	114	70	2,4	1,78	22,4	45
3,30	26,35	6,06	116	70	2,6	1,46	18,3	46
3,45	26,33	5,54	139	70	2,6	1,38	17,3	46
3,75	26,20	5,10	150	71	2,5	0,75	9,4	46

Quadro 13 - Ficha do Campo 3 para P3

(conclusão)

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
3,95	26,11	5,08	144	72	3,2	0,52	6,6	47
4,15	26,08	5,06	140	72	3,1	0,42	5,2	47
4,40	26,06	5,06	133	73	3,3	0,28	3,5	47
4,55	25,95	5,05	107	74	3,4	0,00	0,0	48
4,85	25,84	5,06	91	75	3,9	0,00	0,0	49
5,05	25,77	5,08	80	76	4,0	0,00	0,0	50
5,30	25,71	5,09	75	77	4,7	0,00	0,0	50
5,55	25,68	5,10	64	79	4,7	0,00	0,0	51
5,75	25,60	5,13	54	80	4,6	0,00	0,0	52
5,90	25,56	5,13	50	81	5,2	0,00	0,0	53
6,10	25,43	5,18	34	84	4,2	0,00	0,0	55
6,35	25,31	5,21	23	87	4,4	0,01	0,1	57
6,60	25,26	5,24	18	89	4,3	0,06	0,7	58
6,85	25,20	5,26	7	91	4,7	0,10	1,3	59
7,10	25,19	5,28	3	92	6,1	0,13	1,6	60
7,30	25,22	5,29	2	93	8	0,18	2,2	60
7,55	25,20	5,31	-4	94	21,8	0,22	2,7	61
7,60	25,74	5,37	-42	92	3,7	0,75	9,3	60

Fonte: A autora (2025).

Quadro 14 – Ficha do Campo 4 para P3

(continua)

Local	Data	Hora	Temp. ambiente (°C)	Altitude (m)	Pressão atm. (mb)	Observações		
P1	5/7/24	11:44	24,8		881,2			
Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
7,00	18,48	5,32	123	84	23,5	1,91	20,9	55
6,90	18,25	6,17	71	91	226,0	1,07	11,0	60
6,80	18,18	6,28	71	91	22,6	0,60	6,6	59
6,70	18,12	6,22	86	91	19,4	0,36	3,8	59
6,60	18,11	6,30	86	90	13,3	0,31	3,3	59
6,50	18,14	6,29	91	89	8,1	0,43	4,7	58
6,40	18,20	6,28	98	88	5,9	0,85	9,3	57

Quadro 14 - Ficha do Campo 4 para P3

(continua)

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
6,30	18,27	6,28	105	86	4,8	1,30	14,2	56
6,20	18,28	6,29	111	86	4,6	1,88	20,7	56
6,10	18,29	6,32	116	85	4,4	1,85	20,1	55
6,00	18,30	6,35	119	85	3,8	1,95	21,3	55
5,90	18,34	6,35	122	84	4,4	2,30	25,2	54
5,80	18,36	6,36	124	83	3,9	2,41	26,4	54
5,70	18,40	6,37	126	83	3,7	2,55	28,0	54
5,60	18,40	6,38	128	85	4,4	2,55	28,0	54
5,50	18,44	6,39	130	85	3,8	2,60	28,5	54
5,40	18,47	6,35	135	85	4,5	2,95	32,3	54
5,30	18,50	6,40	135	82	4,4	2,95	32,4	53
5,20	18,51	6,41	137	82	4,0	2,81	30,5	53
5,10	18,53	6,41	139	83	4,1	2,98	32,6	53
5,00	18,54	6,42	141	82	4,4	2,81	30,9	53
4,90	18,56	6,42	143	82	4,4	2,14	32,3	53
4,80	18,58	6,42	144	81	4,5	2,92	32,0	53
4,70	18,58	6,42	146	82	4,0	3,01	33,2	53
4,60	18,59	6,44	147	81	4,1	3,02	33,3	53
4,50	18,60	6,43	149	80	4,3	3,14	34,3	53
4,40	18,60	6,45	152	81	3,0	3,59	34,6	52
4,30	18,63	6,41	155	80	5,6	3,69	40,6	52
4,20	18,64	6,46	154	80	3,7	3,62	39,7	52
4,10	18,64	6,48	154	80	3,6	3,82	42,0	51
4,00	18,67	6,44	156	79	3,9	3,76	41,4	51
3,90	18,68	6,43	161	79	4	3,92	43,0	51
3,80	18,67	6,48	158	80	3,6	3,85	42,3	52
3,70	18,70	6,48	161	79	3,4	3,81	41,9	53
3,60	18,70	6,51	159	78	3	4,00	44,0	51
3,50	18,71	6,54	158	77	3,0	4,11	44,8	50
3,40	18,73	6,56	159	77	3,3	4,45	48,6	50
3,30	18,74	6,54	161	78	3,3	4,45	48,6	50
3,20	18,75	6,58	160	78	3,0	4,48	49,3	50
3,10	18,75	6,55	164	77	3,3	4,40	48,0	50
3,00	18,76	6,60	163	78	3,1	4,51	49,5	51
2,90	18,76	6,61	162	79	2,6	4,50	49,4	51

Quadro 14 - Ficha do Campo 4 para P3

(conclusão)

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)	Condutividade (µS/cm)	Turbidez (NTU)	OD (mg/L)	OD (%)	STD (mg/L)
2,80	18,76	6,60	163	78	3,5	4,50	49,4	50
2,70	18,77	6,60	164	78	3,0	4,25	47,1	51
2,60	18,78	6,62	164	77	2,7	4,83	53,2	50
2,50	18,83	6,63	165	77	2,6	4,63	51,4	50
2,40	18,82	6,61	167	76	2,6	4,72	52,3	51
2,30	18,83	6,66	165	77	2,5	4,60	50,8	50
2,20	18,83	6,63	167	80	2,6	4,60	50,8	52
2,10	18,84	6,65	168	79	2,8	4,80	52,4	51
2,00	18,88	6,68	167	78	2,5	5,09	56,5	50
1,90	18,88	6,70	167	77	3,0	5,09	56,5	50
1,80	18,89	6,70	168	78	2,3	4,75	54,6	51
1,70	18,90	6,67	171	78	2,5	5,13	56,5	50
1,60	18,90	6,68	172	79	2,4	5,15	56,6	50
1,50	18,92	6,69	172	78	3,0	5,20	57,4	51
1,40	18,93	6,72	171	78	3,0	5,25	58,2	51
1,30	18,95	6,72	170	79	2,6	5,26	58,3	52
1,20	18,95	6,72	171	83	2,8	5,22	57,8	53
1,10	18,96	6,73	172	79	2,4	5,25	58,2	52
1,00	18,96	6,73	172	79	2,8	5,12	56,9	50
0,90	18,96	6,74	172	82	2,7	5,20	57,6	54
0,80	18,96	6,73	173	79	2,7	5,15	57,2	52
0,70	18,98	6,73	173	79	2,3	5,34	59,2	52
0,60	19,05	6,75	173	79	2,6	5,35	59,3	51
0,50	19,07	6,76	173	78	2,5	5,42	60,0	51
0,40	19,11	6,77	174	78	2,5	5,35	59,4	50
0,30	19,14	6,78	173	80	2,3	5,38	59,8	52
0,20	19,19	6,77	173	79	3,7	5,60	62,4	51
0,10	19,35	6,76	172	88	30,0	5,48	61,2	58

Fonte: A autora (2025).

APÊNDICE F - RESULTADOS DOS CÁTIIONS, ÂNIIONS E METAIS ANALISADOS

Quadro 15 – Ficha de análise para as amostras do campo 1 (setembro de 2023)

Amostra	1.P1.1	1.P2.1	1.P2.2	1.P2.3	1.P3.1	1.P3.2	1.P3.3
Profundidade (m)	0	0	1,0	2,0	0	3,4	6,8
Cloreto (mg/L)	2,0	2,8	2,0	2,2	2,1	2,0	2,0
Fluoreto (mg/L)	0,23	0,24	0,33	0,30	0,33	0,34	0,31
Alcalinidade (mg/L HCO₃⁻)	5,5	6,1	6,1	5,5	5,5	6,1	6,1
Fosfato (mg/L)	0,44	0,43	0,52	0,41	0,36	0,30	0,29
Fósforo (mg/L)	0,14	0,14	0,17	0,13	0,12	0,10	0,09
Nitrato (mg/L)	0,8	1,3	1,2	1,1	0,8	1,8	1,6
Sulfato (mg/L)	3	5	4	4	5	5	5
Sódio (mg/L)	3,9	4,6	5,3	4,8	4,2	4,3	4,2
Potássio (mg/L)	2,8	3,0	2,8	3,0	2,8	2,9	2,8
Magnésio (mg/L)	0,38	0,45	0,36	0,40	0,29	0,45	0,42
Cálcio (mg/L)	0,91	0,68	0,98	0,84	0,97	0,81	0,76
Cobre (mg/L)	0,03	0,00	0,02	0,00	0,05	0,13	0,00
Alumínio (mg/L)	0,007	0	0	0	0,008	0	0
Manganês (mg/L)	0,402	0,009	0,026	0,044	0,021	0,019	1,184
Ferro II (mg/L)	0,01	0,04	0,04	0,06	0,01	0,03	0,02
Ferro total (mg/L)	0,22	0,14	0,14	0,11	0,23	0,14	0,45
Níquel (mg/L)	0,009	0,008	0,021	0,025	0,027	0,044	0,022
Sílica (mg/L)	4,6	4,5	4,3	4,5	2,9	3,9	4,3

Fonte: A autora (2025).

Quadro 16 – Ficha de análise para as amostras do campo 2 (outubro de 2023)

Amostra	2.P1.1	2.P1.2	2.P1.3	2.P2.1	2.P2.2	2.P2.3	2.P3.1	2.P3.2	2.P3.3
Profundidade (m)	0	0,7	1,4	0	1,6	3,2	0	4	8
Cloreto (mg/L)	1,9	2,1	1,9	1,8	1,4	1,6	2,0	1,8	2,0
Fluoreto (mg/L)	0,53	0,49	0,34	0,50	0,58	0,53	0,40	0,40	0,46
Alcalinidade (mg/L HCO₃⁻)	11	12	12	9	10	9	4	7	11
Fosfato (mg/L)	0,48	0,61	0,70	0,39	0,32	0,47	0,30	0,27	0,33
Fósforo (mg/L)	0,16	0,20	0,23	0,13	0,10	0,15	0,10	0,09	0,11
Nitrato (mg/L)	0,8	1,2	0,9	1,0	1,1	1,2	0,6	0,8	0,9
Sulfato (mg/L)	27	25	21	28	27	29	17	20	20
Sódio (mg/L)	3,8	3,6	3,7	3,4	3,2	3,5	3,5	3,4	3,3
Potássio (mg/L)	3,3	3,1	3,2	3,3	3,3	3,2	2,9	2,8	3,1
Magnésio (mg/L)	0,50	0,47	0,52	0,55	0,49	0,45	0,40	0,49	0,28
Cálcio (mg/L)	0,05	0,02	0,03	0,00	0,04	0,08	0,04	0,08	0,19
Cobre (mg/L)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03
Alumínio (mg/L)	0,100	0	0,007	0,290	0,150	0	0	0	0,600
Manganês (mg/L)	0,634	0,577	0,627	0,471	0,550	0,701	0,301	0,348	0,053
Ferro II (mg/L)	0,06	0,01	0,03	0,03	0,07	0,03	0,02	0,01	0,05
Ferro total (mg/L)	0,43	0,76	0,34	0,35	0,37	0,28	0,21	0,44	0,16
Níquel (mg/L)	0,043	0,035	0,030	0,029	0,025	0,021	0,022	0,024	0,039
Sílica (mg/L)	4,5	5,1	4,6	3,5	3,1	3,5	1,9	1,9	4,4

Fonte: A autora (2025).

Quadro 17 – Ficha de análise para as amostras do campo 3 (março de 2024)

Amostra	2.P1.1	2.P1.2	2.P1.3	2.P2.1	2.P2.2	2.P2.3	2.P3.1	2.P3.2	2.P3.3
Profundidade (m)	0,00	0,60	1,35	0,00	1,50	3,05	0,00	4,00	7,60
STD (mg/L)	100	83	87	106	89	121	93	61	77
STDF (mg/L)	56	63	67	55	59	90	63	44	57
STDV (mg/L)	44	20	20	51	30	31	30	17	20
STS (mg/L)	4	8	8	6	10	26	1	1	34
STSF (mg/L)	0	0	0	0	0	8	0	0	9
STSV (mg/L)	4	8	8	6	10	18	1	1	25
ST (mg/L)	104	91	95	112	99	147	94	62	111
Cloreto (mg/L)	2,4	1,9	2,2	2,1	1,8	1,9	1,8	1,7	1,8
Fluoreto (mg/L)	0,36	0,32	0,37	0,37	0,37	0,33	0,35	0,30	0,29
Alcalinidade (mg/L HCO₃⁻)	10	11	12	5	5	9	5	5	9
Fosfato (mg/L)	0,25	0,19	0,21	0,27	0,17	0,18	0,29	0,22	0,18
Fósforo (mg/L)	0,08	0,06	0,07	0,09	0,06	0,06	0,09	0,07	0,06
Nitrato (mg/L)	2,9	2,9	4,2	2,4	3,5	2,7	1,9	2,8	1,3
Sulfato (mg/L)	5	6	6	6	7	7	6	6	6
Sódio (mg/L)	3,5	3,9	3,6	4,2	4,2	4,5	4,1	4,2	4,2
Potássio (mg/L)	2,6	2,5	2,6	2,3	2,4	2,3	2,1	2,2	2,3
Magnésio (mg/L)	0,39	0,37	0,33	0,43	0,50	0,27	0,41	0,31	0,20
Cálcio (mg/L)	0,91	0,93	0,79	0,59	0,51	1,25	0,32	0,87	1,13
Cobre (mg/L)	0,03	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,01	0,00	0,01
Alumínio (mg/L)	0,002	0	0	0	0,013	0	0	0,006	0,100
Manganês (mg/L)	0,364	0,390	0,390	0,052	0,104	0,427	0,002	0,217	0,724
Ferro II (mg/L)	0	0	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0,56
Ferro total (mg/L)	0	0,51	0,53	0	0,58	0,35	0,12	0,21	0,81
Níquel (mg/L)	0,030	0,004	0,007	0,007	0,014	0,034	0,011	0,009	0,005
Sílica (mg/L)	4,4	5,1	6,4	1,8	2,7	4,4	0,6	2,4	4,1

Fonte: A autora (2025).

Quadro 18 – Ficha de análise para as amostras do campo 4 (julho de 2024)

Amostra	4.P1.1	4.P1.2	4.P1.3	4.P2.1	4.P2.2	4.P2.3	4.P3.1	4.P3.2	4.P3.3
Profundidade (m)	0,00	0,6	1,20	0,00	1,10	2,20	0,00	3,5	7,00
STD (mg/L)	74	92	96	59	61	43	40	98	96
STDF (mg/L)	48	82	65	53	47	37	22	93	90
STDV (mg/L)	26	10	31	6	14	6	18	5	6
STS (mg/L)	54	70	23	17	25	40	31	7	37
STSF (mg/L)	15	34	0	0	3	18	7	0	18
STSV (mg/L)	39	36	23	17	22	23	24	7	19
ST (mg/L)	128	162	120	76	87	84	71	104	133
Cloreto (mg/L)	3,5	3,0	3,3	3,1	3,0	3,1	2,9	2,9	3,0
Fluoreto (mg/L)	0,30	0,31	0,30	0,33	0,33	0,35	0,31	0,32	0,27
Alcalinidade (mg/L HCO₃⁻)	7	5	6	3	3	5	3	4	7
Fosfato (mg/L)	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fósforo (mg/L)	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrato (mg/L)	3,0	5,6	6,0	6,6	5,7	4,8	6,2	2,7	6,5
Sulfato (mg/L)	9	9	10	11	9	11	10	9	9
Sódio (mg/L)	4,7	4,5	4,4	4,6	4,5	4,8	4,4	4,3	4,5
Potássio (mg/L)	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,7	2,6	2,6	2,7
Magnésio (mg/L)	0,38	0,40	0,34	0,43	0,51	0,42	0,41	0,47	0,44
Cálcio (mg/L)	1,15	1,09	1,06	0,71	0,86	0,80	0,82	0,81	0,62
Cobre (mg/L)	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Alumínio (mg/L)	0,000	0,100	0,003	0,011	0,007	0,006	0,000	0,000	0,150
Manganês (mg/L)	0,130	0,180	0,204	0,019	0,014	0,073	0,020	0,011	0,012
Ferro II (mg/L)	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Ferro total (mg/L)	0,04	0,25	0,19	0,16	0,05	0,13	0,09	0,11	0,16
Níquel (mg/L)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sílica (mg/L)	5,5	6,4	5,8	1,3	1,4	1,7	1,8	2,4	1,4

Fonte: A autora (2025).