

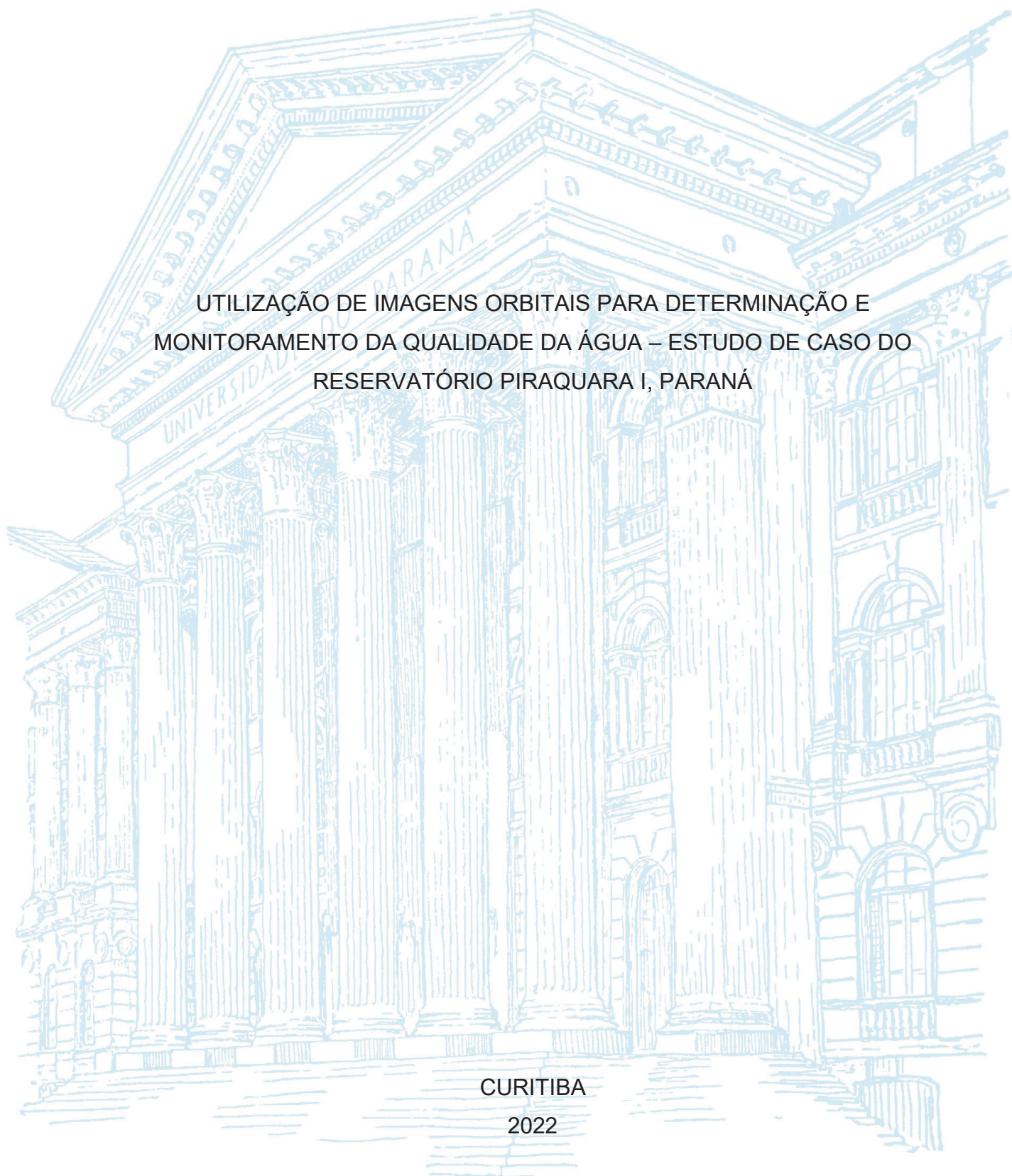
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS ANDRÉ BOESE

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS PARA DETERMINAÇÃO E
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA – ESTUDO DE CASO DO
RESERVATÓRIO PIRAQUARA I, PARANÁ

CURITIBA

2022



VINÍCIUS ANDRÉ BOESE

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS PARA DETERMINAÇÃO E
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA – ESTUDO DE CASO DO
RESERVATÓRIO PIRAQUARA I, PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Ambiental, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Ambiental.

Orientador: Eng. Ms.C. Nathan Damas Antonio

CURITIBA

2022

RESUMO

O propósito deste trabalho é determinar parâmetros de análise de aspectos qualitativos de reservatórios de água utilizando imagens oriundas de sensores multiespectrais orbitais disponibilizadas gratuitamente. O reservatório selecionado para esse caso de estudo é o da Barragem do Rio Cayuguava ou Piraquara I. Esse reservatório foi inaugurado em 08 de março de 1979, sendo o primeiro reservatório de acumulação de água para abastecimento público do estado paranaense, com uma área inundada de 3,3 km², possui uma vazão de 600 litros por segundo (l/s) e oferta água para Curitiba e região. Para realizar a correlação entre as imagens obtidas por sensoriamento remoto, de maneira gratuita, e a qualidade da água utilizou-se os dados de coletas da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para análise da qualidade da água do reservatório Piraquara I, coletados semestralmente. O registro da série histórica, da coleta de amostras d'água, foi iniciado no dia 27 de janeiro de 1998 até o dia 03 de agosto de 2013. A partir das datas das coletas de água para análise, informadas no relatório, buscou-se datas próximas para imagens das principais plataformas de sensores embarcados em satélites e disponibilizadas de forma gratuita. Foram utilizadas as bandas dentro do espectro da luz visível (RGB) para a classificação das imagens e correlação entre os valores de transparência da água, presença de clorofila *a* e turbidez da água. A partir dos dados coletados foi possível estabelecer um modelo matemático para cada correlação entre a banda da imagem do satélite e o parâmetro de qualidade da água. Após aplicação dos modelos para os valores de uma imagem mais recente constatou-se que a tendência de melhoria dos parâmetros foi mantida.

Palavras-chave: 1. Qualidade da água 2. Sensoriamento Remoto 3. Reservatório 4. Piraquara I

ABSTRACT

The purpose of this work is to determine parameters for the analysis of qualitative aspects of water in reservoirs using images from orbital multispectral sensors made available free of charge. The reservoir selected for this case study is the Cayuguava River Dam or Piraquara I. This reservoir was inaugurated on March 8, 1979, being the first water accumulation reservoir for public supply in the state of Paraná, with a flood area of 3,3 km², it has a flow rate of 600 liters per second (l/s) and offers water to Curitiba and region. To perform the correlation between the images obtained by remote sensing, free of charge, and the water quality, data collected from Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) were used to analyze the water quality of the Piraquara I reservoir, collected every six months. The record of the historical series, of the collection of water samples, started on January 27, 1998 until August 3, 2013. From the dates of the water collection for analysis, informed in the report, we sought to close dates for images of the main sensor platforms embedded in satellites. The bands within the spectrum of visible light (RGB) were used for the classification of images and correlation between the values of water transparency, presence of chlorophyll *a* and water turbidity. From the collected data, it was possible to establish a mathematical model for each correlation between the satellite image band and the water quality parameter. After applying the models to the values of more recent image, it was found that the trend of improvement of the parameters was maintained.

Keywords: 1. Water quality 2. Remote Sensing 3. Reservoir 4. Piraquara I

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
1.2.1 Legislação sobre classificação de reservatórios e corpos hídricos	17
1.2.2 Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET)	19
1.2.3 Sensoriamento Remoto	20
1.2.4 Resposta espectral da água	22
1.3 JUSTIFICATIVA	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo geral	24
1.4.2 Objetivos específicos	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS	25
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	25
2.2 AMOSTRAS DE ÁGUA	26
2.3 MONITORAMENTO	27
2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	27
3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	30
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS	39
ANEXO 1 – TABELAS DE PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA O RESERVATÓRIO PIRAQUARA I (XAVIER; DIAS; BRUNKOW, 2017)	41
ANEXO 2 – CLASSIFICAÇÃO DO RESERVATÓRIO PIRAQUARA I, SEGUNDO ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO (IET) (XAVIER; DIAS; BRUNKOW, 2017)	43
ANEXO 3 – MAPAS DE CLASSIFICAÇÃO PARA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A E TURBIDEZ, IMAGENS DE 19/08/2000 E 02/07/2022	44
ANEXO 4 – GRÁFICOS GERADOS PELAS REGRESSÕES LINEARES	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A qualidade da água para consumo humano sempre foi uma questão muito importante, portanto o saneamento básico sempre esteve intimamente ligado a qualidade de vida das populações urbanas. Nesse sentido, doenças ligadas à ingestão de água sem condições mínimas de consumo ou por conta da destinação incorreta dos efluentes afeta a humanidade a séculos; sendo que problemas relacionados a esses temas são descritos desde o Império Romano, que no auge de sua capital, Roma, chegou a ter mais de um milhão de habitantes, o que gerou a necessidade de buscar uma forma de abastecimento de água mais eficiente. (KARABATOS; TSAGKARIS; KALACHANIS, 2021).

Em outro momento da história, no ano de 1854, Londres vivia novamente um surto de cólera, relativamente comuns na época, tendo havido surtos também em 1840 e 1850. A teoria existente da época era de que a cólera seria transmitida pelo ar, porém um médico residente na cidade, após analisar os surtos de 1840 e 1850 propôs a hipótese de que a doença estava relacionada a água. (TULCHINSKY, 2018).

No intuito de descobrir a causa da proliferação de tal enfermidade, o médico inglês John Snow começou a mapear os poços de água e qual população dos arredores utilizava aquela água. Com isso, o médico conseguiu relacionar a população contaminada com alguns poços, sendo esses últimos fechados, e por consequência contendo o surto de cólera. Assim esse feito, torna John Snow o pai da epidemiologia moderna, foi também o primeiro mapa temático da cartografia ligado a outra área, demonstrando que o uso das geociências, como a cartografia, são uma ferramenta poderosa para a visualização de dados de forma espacial, análise de suas ocorrências e auxílio estratégico na tomada de decisões.

Com o grande crescimento populacional após a revolução industrial, as cidades expandiram-se cada vez mais e os problemas relacionados ao saneamento básico continuam no século XXI, como a qualidade e quantidade disponível de água potável para consumo da população. Tal problemática ocorre principalmente em grandes centros urbanos como Curitiba e a região metropolitana, que contam com

mais de 3.500.000 (três milhões e quinhentos mil) habitantes. Para suprir toda a região foram instaladas diversas barragens para armazenamento de água, entre as principais encontram-se o reservatório do Passaúna, reservatório do Iraí, reservatório de Piraquara I e Piraquara II.

Devido a grande quantidade de reservatórios em todo o território do estado do Paraná, o na época denominado Instituto Ambiental do Paraná (IAP), atual Instituto de Água e Terra (IAT), desenvolveu uma metodologia própria para monitoramento e classificação da qualidade da água dos reservatórios. Entre os parâmetros analisados encontram-se a turbidez da água, a transparência e a presença de clorofila *a*. A determinação destes fatores é feita a partir de coleta de água e posterior análise laboratorial das amostras. Estudos anteriores mostram a relação entre estes três parâmetros de qualidade e a resposta radiométrica dentro do espectro da luz visível em sensores orbitais de imageamento da superfície terrestre. Atualmente existem diversos satélites com sensores capazes de captar o espectro da luz visível, assim como níveis de infravermelho, ultravioleta, além de sensores que operam com radar. Esta gama de opção de plataformas orbitais nos permitem acesso a diversas imagens em diversas resoluções, normalmente variando de 5,0 m (cinco metros) a 30,0 m (trinta metros). Esta relação entre os fatores de qualidade da água e as suas respectivas respostas espectrais nos sensores dos satélites nos permitem fazer uma análise, mesmo que prévia, da qualidade da água com uma periodicidade maior e com custos reduzidos, uma vez de não haver a necessidade de deslocamento da equipe para os locais de coleta.

1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.2.1 Legislação sobre classificação de reservatórios e corpos hídricos

Reservatórios são lagos artificiais formados a partir do barramento de rios, para diversos usos, como geração de energia elétrica e abastecimento doméstico da população. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), “As **barragens** são as estruturas físicas que represam um curso de água. Já os **reservatórios** são o acúmulo de água resultante da construção dessas barragens pelo ser humano.”

A avaliação e classificação dos corpos de água tem seus critérios estabelecidos pela legislação ambiental vigente. Os parâmetros mínimos para a

qualidade da água utilizada para o consumo humano são definidos pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde. Nessa conjunção, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece em sua Resolução nº 357/2005 quanto à classe e classificação da água e situa na Resolução nº 274/2000 as suas condições de balneabilidade. De acordo com a Resolução nº 357/2005, no seu artigo 2º, incisos IX e X:

“IX – classe de qualidade: conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros;

“X – classificação: qualificação das águas doces, salobras e salinas em função dos usos preponderantes (sistema de classes de qualidade) atuais e futuros;”

No seu inciso XIV define “controle de qualidade da água: conjunto de medidas operacionais que visa avaliar a melhoria e a conservação da qualidade da água estabelecida para o corpo de água.”

Quanto ao inciso XXV define monitoramento como: “medição ou verificação de parâmetros de qualidade e quantidade de água, que pode ser contínua ou periódica, utilizada para acompanhamento da condição e controle da qualidade do corpo de água.”

Por fim, ainda no artigo 2º, no seu inciso XXVII define parâmetro de qualidade da água como “substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água.”

No artigo 4º da Resolução CONAMA nº 375/2005, define-se a classificação dos corpos de água que podem ser utilizados para abastecimento destinado ao consumo humano. Dessa forma, a Classe Especial pode ser utilizada para consumo humano desde que passe por processo de desinfecção e a Classe I pode ser utilizada para consumo após tratamento simplificado. Corpos hídricos enquadrados na Classe II podem ter suas águas utilizadas para consumo humano após tratamento convencional. A Classe III pode ser utilizada para consumo humano após tratamento convencional ou avançado.

1.2.2 Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET)

Devido ao grande número de barragens e reservatórios existentes no estado do Paraná, utilizados para vários fins (produção de energia hidrelétrica, recreação, piscicultura, irrigação e abastecimento), foi desenvolvida uma metodologia própria para monitoramento da qualidade da água no estado, descrito no relatório “Qualidade das águas dos reservatórios do estado do Paraná” (FONSECA XAVIER; DIAS; BRUNKOW, 2017). Na metodologia desenvolvida são analisados 13 (treze) parâmetros de qualidade da água, de acordo com o relatório publicado pelo estado do Paraná, os parâmetros foram escolhidos visando o objetivo do monitoramento, seu custo e eficácia na avaliação da qualidade da água.

De acordo com tal relatório, foram definidas 6 (seis) classes para o enquadramento dos reservatórios do Paraná, de acordo com índices de concentração dos fatores analisados, demonstrados na tabela a seguir (TABELA 1).

TABELA 1: CLASSES DOS RESERVATÓRIOS DE ACORDO COM PARÂMETROS ANALISADOS.

Variáveis "i"	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V	Classe VI
Déficit de oxigênio (%)	≤5	6-20	21-35	36-50	51-70	>70
Fósforo Total (P-mg/L)	≤0,010	0,011-0,025	0,026-0,040	0,041-0,085	0,086-0,210	>0,210
Nitrog. Inorg. Total (N – mg/L)	≤0,15	0,16-0,25	0,26-0,60	0,61-2,00	2,00-5,00	>5,00
Clorofila <i>a</i> (µg/L)	≤1,5	1,5-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	11,0-32,0	>32
Disco de Secchi (m)	≥3	3-2,3	2,2-1,2	1,1-0,6	0,5-0,3	<0,3
DQO (mg/L)	≤3	3-5	6-8	9-14	15-30	>30
Tempo de residência (dias)	≤10	11-40	41-120	121-365	366-550	>550
Profundidade média (m)	≥35	34-15	14-7	6-3,1	3-1,1	<1
Cianobactérias (nº de células/ml)*	≤1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	>100.000

*modificada em 2008

FONTE: Fonseca Xavier; Dias; Brunkow, (2017)

As seis classes definidas pelo relatório são (Fonseca Xavier; Dias; Brunkow, 2017):

- Classe I: Não impactado a muito pouco degradado, qualidade da água excelente a ótima;
- Classe II: Pouco degradado, qualidade da água muito boa a boa;
- Classe III: Moderadamente degradado, qualidade da água regular a aceitável;

- Classe IV: Criticamente degradado e poluído, qualidade da água crítica a ruim;

- Classe V: Muito poluído, qualidade da água muito ruim e

- Classe VI: Extremamente poluído, qualidade da água péssima.

A relação entre as classes definidas e o índice de Qualidade da Água de Reservatórios (IQAR) é demonstrado na TABELA 2:

TABELA 2: CLASSES COM BASE NOS VALORES DE IQAR.

DEFINIÇÃO	CLASSES	IQAR
Não Impactado a Muito Pouco Degradado	I	$IQAR \leq 1,5$
Pouco Degradado	II	$1,5 < IQAR \leq 2,5$
Moderadamente Degradado	III	$2,5 < IQAR \leq 3,5$
Criticamente Degradado a Poluído	IV	$3,5 < IQAR \leq 4,5$
Muito Poluído	V	$4,5 < IQAR \leq 5,5$
Extremamente Poluído	VI	$> 5,5$

FONTE: Fonseca Xavier; Dias; Brunkow, (2017).

Durante os estudos realizados nos reservatórios do Paraná também foi definido o Índice de Estado Trófico (IET) das barragens. Esse índice leva em consideração três variáveis a transparência, a concentração de clorofila *a* e o fósforo total, tendo como objetivo definir o grau de trofia na água, ou seja, avalia a presença de nutrientes e sua relação com o crescimento excessivo de algas e cianobactérias. Os reservatórios podem ser classificados em seis estados tróficos:

I – Ultraoligotrófico;

II – Oligotrófico;

III – Mesotrófico;

IV – Eutrófico;

V – Supereutrófico e

VI – Hipereutrófico.

1.2.3 Sensoriamento Remoto

Plataformas orbitais de imageamento terrestre possuem em sua maioria sensores capazes de determinar variação radiométrica no espectro da luz visível, além de possuírem outros sensores, como por exemplo sensores de infravermelho, podendo gerar dados nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, médio e

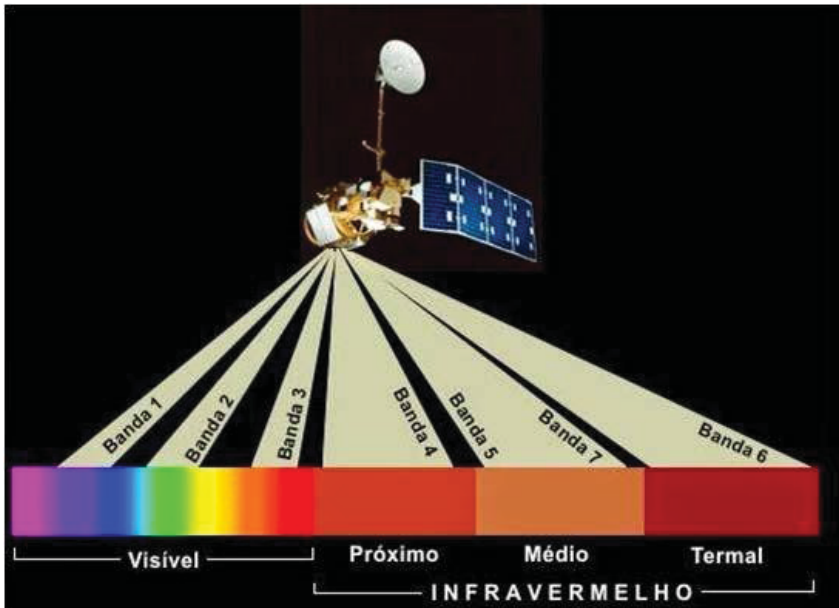
distante. Como demonstrado na metodologia apresentada por Vilela (2010), existe uma correlação entre os comprimentos de onda do vermelho, do verde e do azul com os parâmetros de qualidade da água turbidez, transparência e presença de clorofila *a*, sendo, portanto, definir alguns dos parâmetros utilizados para determinar a qualidade da água através de imagens obtidas por sensoriamento remoto.

Uma definição mais ampla caracteriza o sensoriamento remoto como a *“ciência e a arte de obter informações a respeito de um objeto, área ou fenômeno pela análise de dados adquiridos por um sistema que não se encontra em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação”* (LILLESAND; KIEFER, 1984). Porém esta definição pode gerar algumas dúvidas por não haver uma explicação mais detalhada sobre a forma de obtenção das informações, portanto de uma maneira mais específica, aceita-se a definição de que o sensoriamento remoto é o conjunto de *“procedimentos destinados à obtenção de imagens mediante o registro das variações gravimétricas, ondas sísmicas, ondas acústicas e energia eletromagnética constante.”* (SWAIN; DAVIS, 1978).

No sensoriamento remoto a informação é, normalmente, apresentada sob forma de imagem, podendo ser imagem fotográfica, imagem radar, imagens laser. Para sensores passivos, a aquisição se dá da seguinte forma, o Sol emite radiação eletromagnética, esta energia interage com a superfície terrestre, a radiação eletromagnética interage com a superfície e parte desta energia sofre reflexão, parte sofre absorção e parte sofre transmissão. A energia refletida retorna e o sensor da plataforma recebe o sinal e armazena o valor radiométrico daquele ponto da superfície. Um sensor ativo não tem a necessidade da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, pois o próprio sensor possui uma fonte emissora de radiação eletromagnética que emite a radiação em direção à superfície terrestre.

Nesse contexto, a resolução espectral representa o *“número de faixas e à largura das faixas espectrais nas quais a radiação eletromagnética é medida.”* (CENTENO, 2009), ou seja, as informações recebidas são armazenadas em formato de imagem, separadas por bandas específicas referentes a cada comprimento de onda, geralmente possuindo ao menos a banda do vermelho, do verde e do azul, ou em inglês Red, Green, Blue, formando o RGB.

FIGURA 1: SATÉLITE LANDSAT E DEMONSTRAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA IMAGEADOS.



FONTE: GEOPARÁ, Disponível em: <http://geopara.blogspot.com/201407/sensores-remotos-por-sistema-opticos.html>. Acesso em: 15 set. 2022.

Cada pixel da imagem vai possuir um valor de cinza que varia de 0 (zero) a 255 (duzentos e cinquenta e cinco) referente a quantidade de radiação recebida pelo sensor e é armazenado em uma matriz de pixels, formando a imagem. Fazendo-se uma composição entre as matrizes das três bandas forma-se uma imagem colorida. A resolução espacial do sensor representa o tamanho do pixel no solo ou Ground Sample Distance (GSD), que significa a área coberta por cada pixel, geralmente a resolução espacial, para imagens disponibilizadas gratuitamente, variam de 5,0 m (cinco metros) a 80,0 m (oitenta metros), ou seja, pode representar uma área de 5,0 m x 5,0 m, significando que objetos maiores que 5,0 metros de comprimento ou com uma área maior que 25,0 m² já pode ser identificado com clareza na imagem. Imagens de satélites pagos já possuem resolução espacial na casa 0,50 m (cinquenta centímetros).

1.2.4 Resposta espectral da água

Estudos na área de sensoriamento remoto ajudaram a definir a resposta espectral de vários alvos em diferentes situações, por exemplo a vegetação, mesmo sendo da mesma espécie podem apresentar resposta espectrais diferentes,

dependendo da sua posição, da umidade das folhas, entre outros aspectos. Porém mesmo com essas variações é possível distinguir a resposta espectral da vegetação do solo e da água.

A água apresenta um alta absorvância, ou seja, absorve grande parte da radiação eletromagnética que incide sobre o corpo hídrico. “A curva de reflectância típica da água é baixa, entre 0,38 μm e 0,7 μm , quando comparada com as curvas do solo e da vegetação.” (CENTENO, 2009). Estudos em laboratório com água destilada demonstraram que o pico de reflectância ocorre com o comprimento de onda em 0,48 μm , ou seja, a luz neste comprimento de onda consegue penetrar o corpo hídrico, no caso de águas claras, e é possível levantar informações do fundo. Como não existe água pura no meio ambiente, existem fatores que podem alterar a resposta espectral do corpo hídrico. Os principais fatores que alteram a resposta espectral da água são os sedimentos em suspensão, como partículas de solo e matéria orgânica que aumentam a turbidez da água e alterando a reflectância entre 0,5 μm e 0,7 μm ; a presença de clorofila altera a reflectância na faixa do azul, ou seja, aumenta a reflectância na faixa do verde e do vermelho; o crescimento de macrófitas também tem a capacidade de alterar a resposta espectral da água.

De acordo com Centeno, “Fatores que não alteram as características espectrais da água não podem ser diretamente observados.” (CENTENO, 2009)

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização de imagens orbitais, disponibilizadas gratuitamente, para monitoramento da qualidade da água dos reservatórios de abastecimento e outros corpos hídricos ajudando a determinar eutrofização do reservatório, turbidez e transparência da água. Um monitoramento por sensoriamento remoto permite uma cobertura mais abrangente, permitindo a análise prévia de vários reservatórios a partir de um único local, direcionando as equipes para os locais críticos previamente identificados, reduzindo os deslocamentos das equipes, consequentemente o consumo de combustíveis (e a emissão de GEEs) diárias, amostras de água coletadas e analisadas, ou seja, uma redução considerável dos custos.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho tem o objetivo de analisar a metodologia de análise da qualidade da água utilizando imagens de plataformas orbitais, disponibilizadas de forma gratuita, que correlaciona valores radiométricos dos pixels e os valores dos parâmetros obtidos pelas campanhas de coleta de amostras de água e posterior análise laboratorial, focando principalmente nos parâmetros turbidez da água, concentração de clorofila *a* e transparência.

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar possíveis alterações na qualidade da água do reservatório Piraquara I, no município de Piraquara, Paraná.

1.4.2 Objetivos específicos

Utilização de imagens multiespectrais para determinação de parâmetros de análise de aspectos qualitativos da água do reservatório Piraquara I;

Obtenção da média dos valores radiométricos dos nove pixels mais próximos ao ponto de coleta de amostras de água;

Identificar possíveis pontos de alterações dos parâmetros qualitativos da água no reservatório Piraquara I por meio dos valores radiométricos dos pixels de refletância;

Realização de regressão linear para determinação das correlações entre as bandas espectrais e os parâmetros de qualidade da água e determinação dos modelos matemáticos;

Projeção de valores a partir dos modelos matemáticos obtidos pelas regressões lineares para uma imagem atual.

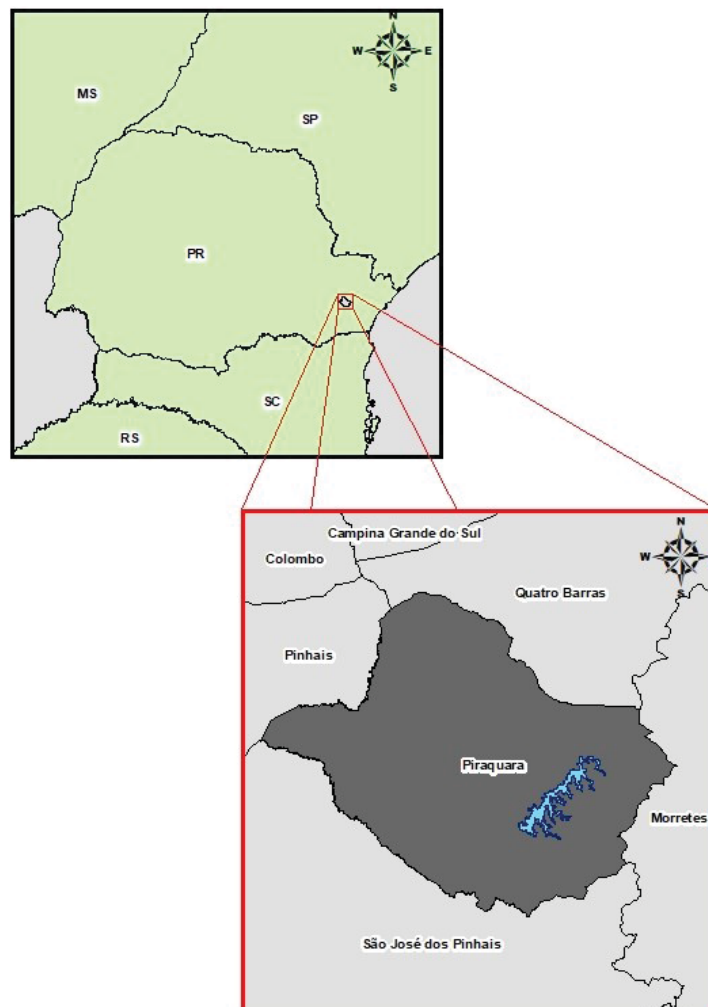
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para a realização do trabalho foi definida como área de estudo o reservatório Piraquara I, por se tratar de um dos principais mananciais de abastecimento do município de Curitiba e algumas cidades da região metropolitana.

O reservatório está localizado no município de Piraquara, um dos municípios da região metropolitana de Curitiba. Piraquara encontra-se a 23 km do centro de Curitiba. O reservatório Piraquara I localiza-se a 9 km do centro do município de Piraquara, como demonstrado na FIGURA 2.

FIGURA 2: LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO PIRAQUARA I.



FONTE: O autor (2022).

2.2 AMOSTRAS DE ÁGUA

Como não havia a possibilidade de realizar coletas e análises de água por conta própria, devido, principalmente, ao alto custo das análises necessárias, foram utilizados dados de amostras já apresentados em literatura. As amostras foram coletadas pelo IAP e analisadas pelo Laboratório Central do Estado do Paraná (LACEN). Os resultados das análises obtidos entre os anos de 1998 e 2013 foram divulgados em relatório apresentado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA) em parceria com o IAP no ano de 2017, intitulado “Qualidade das águas dos reservatórios do estado do Paraná”.

Para fazer a análise da qualidade da água o IAP estabeleceu a verificação de treze parâmetros, sendo eles, transparência (disco de Secchi), pH, alcalinidade total, condutividade elétrica, Demanda Químico de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO5), nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio kjedahl, fósforo total, turbidez, clorofila *a*, fitoplâncton e zooplâncton.

A metodologia estabelecida para definição do índice de qualidade de água fixou como ponto de coleta de amostras d’água a zona lacustre dos reservatórios.

Assim, foi selecionada para o monitoramento, a zona lacustre, ponto de amostragem considerado o mais representativo da dinâmica hídrica do reservatório. A zona lacustre é a zona mais próxima a barragem, normalmente também é a mais larga e profunda do reservatório.

A frequência de amostragem foi estabelecida tendo em conta as principais variações climáticas que podem caracterizar períodos de melhor ou pior qualidade da água, ou seja, preferencialmente os períodos em que os processos de estratificação térmicos químicos e a mistura da coluna d’água. Desta forma foi estabelecida uma frequência semestral para coleta das amostras para realizar o monitoramento, considerando as estações climáticas de características bem definidas no estado do Paraná, no caso o verão e o inverno, sendo que no verão há uma estagnação hídrica derivada de uma elevada biodinâmica causada pelas altas temperaturas, já no inverno ocorre uma maior circulação da coluna d’água devido as baixas temperaturas. Segundo o relatório “as amostras são coletadas preferencialmente no período entre 10:00 e 14:00 horas, quando a biodinâmica dos corpos d’água é máxima.” (FONSECA XAVIER; DIAS; BRUNKOW, 2017).

2.3 MONITORAMENTO

De acordo com Novo (2007), monitoramento é a observação repetitiva ou com uma frequência definida de uma área ou fenômeno, a frequência é definida pela necessidade de informações sobre a dinâmica do seu comportamento. De acordo com informações da Agência Nacional de Águas (ANA), a rede hidrológica básica em que a agência faz a coleta e análise de dados de qualidade de água contempla 969 rios do território nacional. São realizadas quatro campanhas por ano, em aproximadamente 1276 estações que representam uma densidade de 0,0000015 amostras/km². Devido aos altos custos para realizar o monitoramento e a análise técnica, dos corpos hídricos, em campo, que surgem por alguns fatores, como a dificuldade de acesso a alguns locais, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa de menor custo e que permite uma maior acessibilidade para a realização de mapeamentos, monitoramentos e planejamento urbano e ambiental. O sensoriamento remoto pode gerar uma grande quantidade de dados permitindo atualizações mais constantes a serem integradas com os dados convencionais, tornando o sistema de gestão hídrica cada vez mais completo e ágil.

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

As técnicas computacionais utilizadas para a análise de dados adquiridos por vários tipos de sensores, onde busca-se corrigir geometricamente, realçar o contraste, entre outras manipulações, onde o produto de entrada e o de saída é uma imagem, denomina-se de processamento digital de imagens ou PDI.

O PDI pode ser dividido entre pré-processamento, realce e classificação. O INPE define pré-processamento como “processamento inicial dos dados brutos para calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruído.” Realce é definido da seguinte forma: “Realce visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem.” Já a classificação, como já indica a denominação, classifica os objetos presentes na imagem em classes definidas pelo usuário.

O processamento digital de imagens permite que se realize análises das bandas espectrais de forma individual, ou seja, se analisa as bandas de forma individual. As bandas também podem ser combinadas, ou seja, realizar uma

composição de bandas, no mínimo três bandas, que gerarão uma imagem colorida. Dependendo das bandas escolhidas e da ordem destas, pode-se ter imagens de cor natural ou real e falsa cor. Quando escolhida as bandas 1, 2 e 3, ou seja, as bandas do azul, verde e vermelho, forma-se a cor natural e quando substituída uma das três bandas por uma banda no espectro do infravermelho, por exemplo a banda 5, tem-se uma composição de falsa cor. Substituindo-se a banda do vermelho pela banda do infravermelho próximo e substituindo a banda da cor azul pela banda do vermelho (espectro visível), gera-se uma falsa cor onde a vegetação vai sofrer um realce na cor vermelha, portanto corpos hídricos com baixa turbidez apresentaram uma cor mais escura, enquanto corpos hídricos com maior concentração de fitoplanctons apresentaram cor próxima ao verde.

Para realização do presente estudo foi analisada uma banda de cada vez, onde extraiu-se o valor radiométrico dos pixels que abrangem a área do reservatório. Devido ao fato de que a data da coleta das amostras de água e as a data das imagens orbitais não são coincidentes, também pelo fato de não haver identificação do ponto exato do ponto de coleta, foi extraída a informação radiométrica dos pixels vizinhos, totalizando nove pixels. Empregando a mesma técnica apresentada por Vilela (2017), utilizou-se a média aritmética dos valores radiométricos dos nove pixels, obtendo um único valor que foi utilizado para correlação com os parâmetros de qualidade da água analisados. O mesmo processo foi utilizado nas três bandas, vermelho, verde e azul, de todas as imagens. Após extração dos valores e determinação da média aritmética foi aplicada uma função polinomial, que permitiu a construção de gráficos que correlacionam os valores radiométricos dos pixels com os parâmetros de qualidade da água apresentados no relatório do IAP (concentração de clorofila *a*, transparência e turbidez).

Como cada banda espectral apresenta uma correlação maior com um dos parâmetros de qualidade da água e o objetivo do estudo é estabelecer um método para análise de diversas imagens e permitir a identificação de alterações nos parâmetros de qualidade da água dos reservatórios, padronizou-se a classificação das imagens em cinco classes. A primeira classe fica no intervalo de 0 (zero) a 50, apresentando a máxima absorção da radiação eletromagnética; a segunda classe varia de 51 a 102, apresentando uma alta absorção da radiação eletromagnética; a terceira classe fica no intervalo de 103 a 154, apresentando uma média absorção da radiação eletromagnética; a quarta classe fica no intervalo entre 155 a 205,

apresentando uma baixa absorção da radiação eletromagnética; a quinta classe fica no intervalo entre 206 a 255, apresentando a mínima absorção da radiação eletromagnética.

QUADRO 1: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE ACORDO COM A ABSORÇÃO DA REM.

Classe	Intervalo	Nível de absorção da REM
1	0 - 50	Máxima absorção
2	51 - 102	Alta absorção
3	103 - 154	Média absorção
4	155 - 205	Baixa absorção
5	206 - 255	Mínima absorção

FONTE: Vilela (2010)

Após definidas as correlações e o padrão para classificação das imagens, como demonstrado na tabela acima (QUADRO 1), a metodologia foi aplicada a imagens posteriores aos dados publicados pelo IAP, ou seja, o período compreendido entre 2014 e 2022, buscando-se verificar se a tendência de melhora da qualidade da água se manteve.

As imagens utilizadas ficam disponíveis no catálogo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), considerando a data da tomada da imagem, de preferência mais próxima possível a data da coleta da amostra de água, o recobrimento de nuvens sobre o reservatório e a qualidade da imagem, quanto mais incidência solar, melhor o contraste. Buscou-se imagens disponíveis em todos os satélites disponíveis que possuíam ao menos um sensor RGB. Para as datas iniciais do relatório do estado, as imagens que se enquadravam nos atributos descritos supra foram do satélite Landsat-5 com o sensor TM de resolução 30 metros. Já para a imagem utilizada para definição da situação atual do reservatório foi utilizada uma imagem do satélite CBERS-4^a, por ser a mais recente disponível, sem cobertura de nuvens e com um bom contraste. O CBERS-4^a possui multiespectral com resolução de 10 metros.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

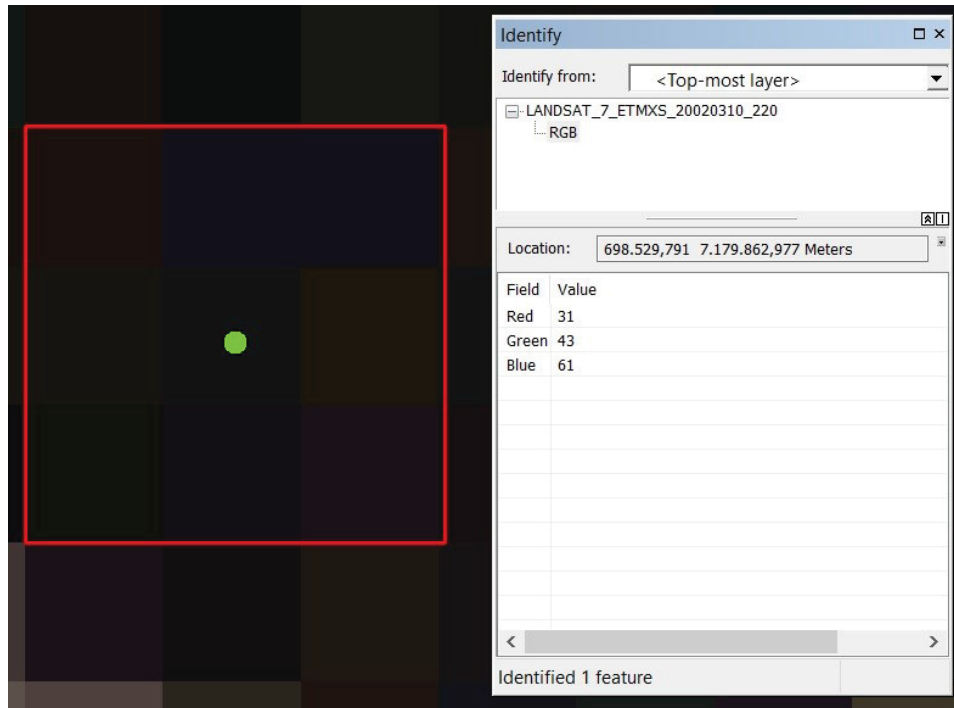
Para o processamento dos dados foi utilizada a mesma metodologia aplicada por Vilela (2010) e por outros autores anteriormente, na qual é realizada a média aritmética entre os nove pixels próximos ao ponto de coleta da amostra de água. No caso deste estudo, o ponto de coleta foi mencionado, no relatório de qualidade da água dos reservatórios do Paraná, como sendo na zona lacustre, porém não define uma coordenada para este ponto, como a zona lacustre é definida como a de maior profundidade e próxima a barragem, definiu-se o centro da barragem como ponto de coleta. A partir deste ponto central foram medidos os valores radiométricos dos nove pixels mais próximos, incluindo o pixel definido como ponto de coleta, nas três bandas espectrais, vermelho, verde e azul.

FIGURA 3: EXEMPLO DE AMOSTRAGEM DOS PIXELS NAS IMAGENS.



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 4: COLETA DOS VALORES RADIOMÉTRICOS DAS BANDAS VERMELHO (RED), VERDE (GREEN) E AZUL (BLUE).



FONTE: O autor (2022).

Após a coleta dos valores radiométricos foi realizada a média aritmética para a determinação de apenas um valor por imagem para a regressão linear, o processo é realizado para cada uma das bandas da imagem, gerando um valor para a banda do vermelho, uma para o verde e uma para o azul, para cada uma das seis imagens selecionadas, devido a sua proximidade com a data de coleta das amostras de água, não superando trinta dias.

Posteriormente a definição das médias dos valores radiométricos, foram coletados os dados dos parâmetros de qualidade da água para o reservatório Piraquara I, presentes no Anexo II do relatório de qualidade da água dos reservatórios do estado do Paraná. Coletou-se os dados para turbidez, transparência e concentração de clorofila *a*.

TABELA 3: MÉDIAS DOS VALORES RADIOMÉTRICOS DAS BANDAS RGB E VALORES DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.

Data da Imagem	Médias			Data da Coleta	Valores dos parâmetros		
	R	G	B		Turbidez	Transparência	Clorofila a
21/01/99	12,89	19,33	53,76	19/01/99	3,00	1,70	3,21
19/08/00	10,00	15,22	42,11	30/08/00	2,00	3,00	1,33
13/07/01	26,44	33,67	49,11	18/07/01	2,80	2,10	4,44
10/03/02	31,67	42,44	60,33	06/03/02	3,30	1,20	5,92
16/07/02	26,44	35,00	41,33	26/04/02	3,50	2,40	2,74
01/02/09	13,22	19,00	52,67	10/02/09	1,90	2,10	6,58

FONTE: O autor (2022).

Utilizando as médias calculadas para os valores radiométricos e os dados dos parâmetros de qualidade da água coletados realizou-se uma regressão linear para a determinação do grau de correlação entre os valores radiométricos e os valores dos parâmetros de qualidade da água e a previsão de valores dos parâmetros para outras imagens.

O cálculo da regressão linear demonstrou que a banda do azul apresentou uma correlação de 98% (noventa e oito por cento) com os valores de transparência, a banda do verde apresentou uma correlação de 73% (setenta e três por cento) com os valores de concentração de clorofila *a*, já a banda do vermelho apresentou uma correlação de 77% (setenta e sete por cento) com os valores de turbidez. Portanto todas as variáveis analisadas foram bem explicadas pelos modelos gerados.

TABELA 4: PARÂMETROS DA REGRESSÃO LINEAR PARA A BANDA DO AZUL E TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA

Modelo Linear de Regressão – Escala da Variável Dependente Transparência			
Coefficientes		Variação	
Correlação	0,98109	Total	33,67148
Determinação	0,96254	Residual	1,26139
Ajustado	0,95317	Desvio Padrão	0,56156

FONTE: O autor (2022).

TABELA 5: PARÂMETROS DA REGRESSÃO LINEAR PARA A BANDA DO VERDE E CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A

Modelo Linear de Regressão – Escala da Variável Dependente Clorofila a			
Coefficientes		Variação	
Correlação	0,73063	Total	0,21629
Determinação	0,53382	Residual	0,10083
Ajustado	0,41728	Desvio Padrão	0,15877

FONTE: O autor (2022).

TABELA 6: PARÂMETROS DA REGRESSÃO LINEAR PARA A BANDA DO VERMELHO E TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA.

Modelo Linear de Regressão – Escala da Variável Dependente Turbidez			
Coefficientes		Variação	
Correlação	0,77316	Total	2,21500
Determinação	0,59778	Residual	0,89091
Ajustado	0,49723	Desvio Padrão	0,47194

FONTE: O autor (2022).

Após a aplicação da regressão linear e definidos os modelos matemáticos para a determinação dos valores dos parâmetros de qualidade da água a partir dos valores radiométricos das bandas foi possível realizar uma extrapolação para outros pontos do reservatório, como também para outros reservatórios e para imagens de outras datas, permitindo, assim, um monitoramento mais amplo, com um menor intervalo de tempo e de maneira mais eficiente.

TABELA 7: MODELOS MATEMÁTICOS PARA REGRESSÃO LINEAR DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.

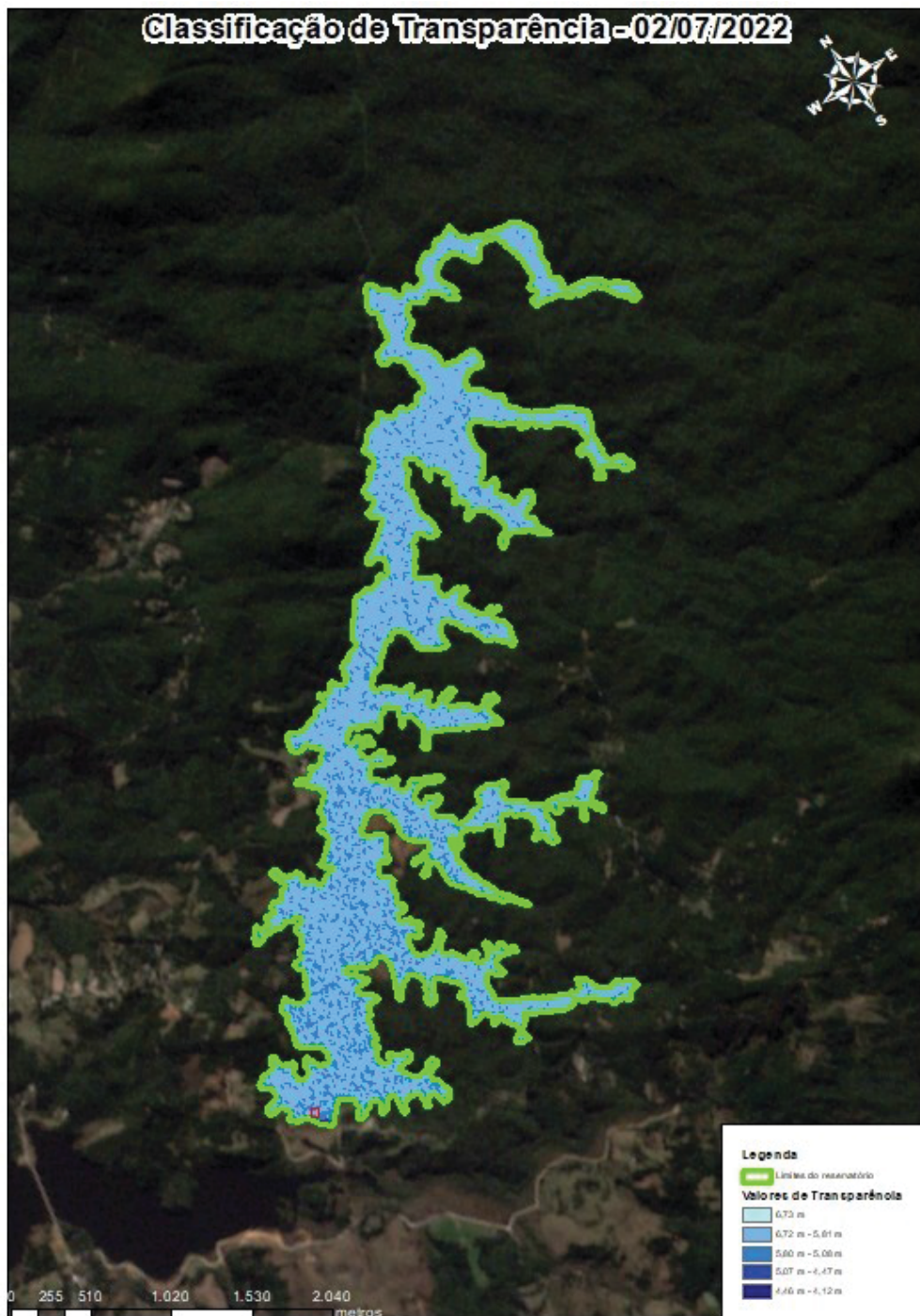
Parâmetro	Modelo matemático
Transparência	$Transparência = (-5,180734 + 36499,424 * Azul(B)^{-2,10})^{0,5}$
Turbidez	$Turbidez = 3,8505106 - 18,319398 * 1/Vermelho(R)$
Clorofila a	$Clorofila a = 1/(-0,054122969 + 101,76342 * 1Verde (G)^2)^{0,5}$

FONTE: O autor (2022).

Para exemplificar a aplicação do modelo em uma imagem mais recente, realizou-se a classificação de uma imagem do dia 02 de julho de 2022 referente a

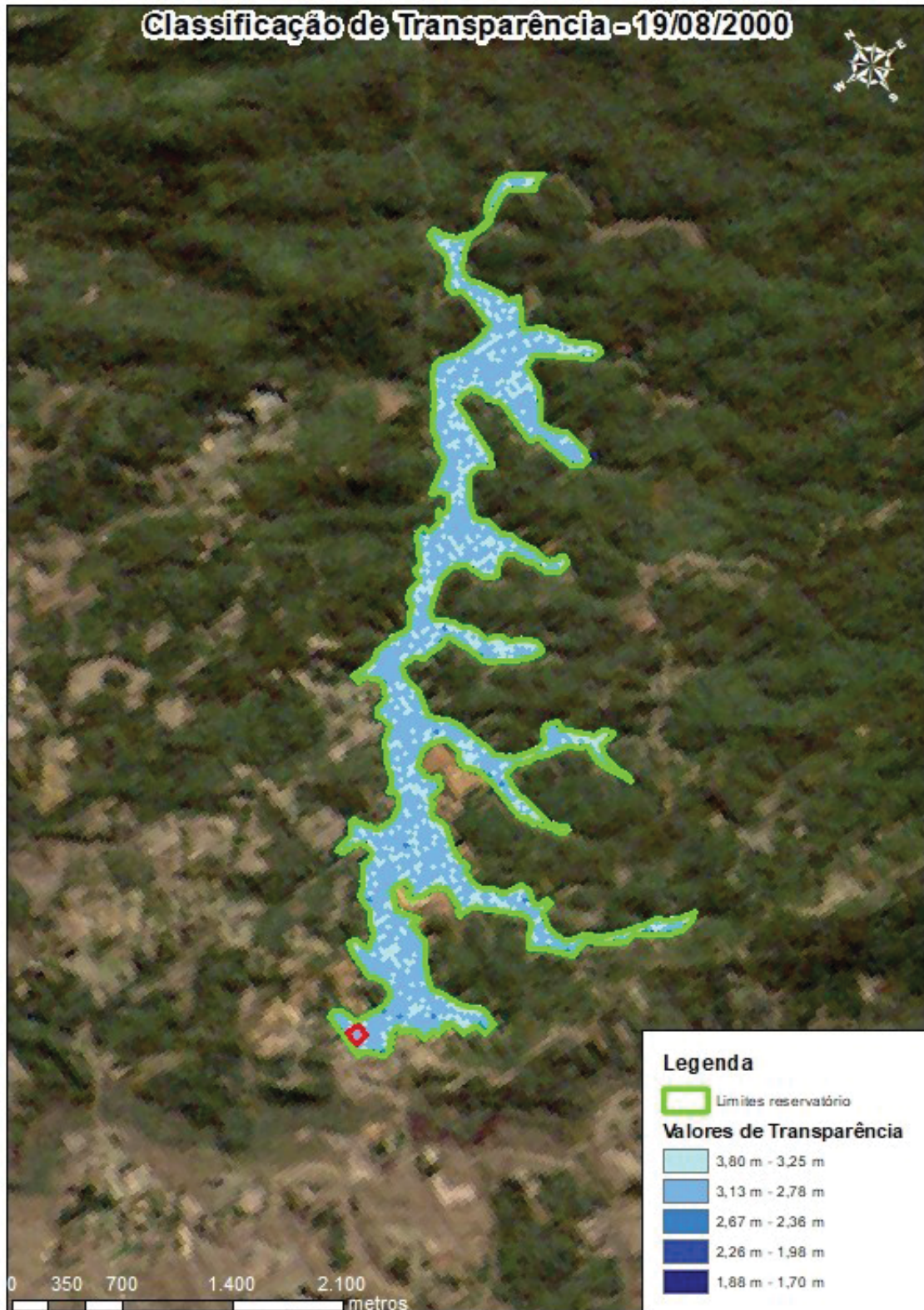
transparência da água, ou seja, a banda do azul, a qual possui uma relação inversamente proporcional com a reflexão da energia eletromagnética, em outras palavras, quanto maior a reflexão da radiação eletromagnética menor a transparência da água. Nota-se na imagem a seguir (FIGURA 5) que quanto mais próximo do reservatório menor a transparência da água.

FIGURA 5: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 02/07/2022, SATÉLITE CBERS 4A.



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 6: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 19/08/2000, SATÉLITE LANDSAT 5.



FONTE: O autor (2022).

Ao comparar as duas imagens percebe-se que apesar de apresentar uma distribuição que pode ser considerada uniforme na imagem do ano de 2000 e

apresentar menor transparência quanto mais próximo da barragem na imagem de 2022, os valores obtidos na imagem mais antiga são bem menores do que os valores obtidos na imagem mais recente.

Comparando com os dados obtidos no anexo II do relatório “Qualidade das águas dos reservatórios do estado do Paraná” (Fonseca Xavier; Dias; Brunkow, 2017) é possível verificar a qualidade do modelo obtido pela regressão linear, uma vez que a tabela apresenta um valor de transparência de 2,0 m (dois metros) e a classificação da imagem apresentou valores entre 1,70 m (um metro e setenta centímetros) e 3,80 m (três metros e oitenta centímetros).

Já a imagem de 2022 apresenta valores que variam de 4,12 m (quatro metros e doze centímetros) a 6,73 m (seis metros e setenta e três centímetros), corroborando com as análises realizadas pelo governo estadual, que indica uma melhora deste parâmetro.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como demonstrado as amostras coletadas *in loco* apresentam um resultado mais completo e detalhado do comportamento do ambiente aquático, porém possuem elevados custos, necessitam de deslocamento de equipes e análises laboratoriais. É justamente esse ponto que o sensoriamento remoto se mostra vantajoso, uma vez que, permite a produção de uma grande quantidade de dados com uma taxa de atualização maior do que as coletas convencionais.

Em um estado como o do Paraná, onde existem mais de 30 reservatórios e vários rios importantes, como rio Paranapanema, rio Paraná e rio Iguaçu, o qual percorre o estado no sentido Leste-Oeste (com aproximadamente 1300 km de extensão) e que intercepta vários perímetros urbanos é de fundamental importância a possibilidade de uma análise de qualidade da água (mesmo que aproximada), mais dinâmica. Nesse sentido, corroborado por Londe (2007), as medições através de sensores remotos vêm sendo usadas porque, além de oferecerem boa cobertura espacial e temporal, podendo facilitar a definição de locais representativos para realização de coletas de amostras de água e possibilita a inclusão de mais lagos e reservatórios em programas de monitoramento.

Portanto, a criação de uma metodologia no âmbito estadual, como foi desenvolvida a metodologia para coleta de amostras e análise da qualidade da água dos reservatórios do estado do Paraná, para definição de parâmetros de qualidade da água através de sensoriamento remoto seria de grande valia e grande economia para o estado.

4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a impossibilidade de realizar coletas de água para análise no decorrer do estudo, futuramente seria de grande valia parceria com o Instituto Água e Terra - IAT e/ou com a Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR para a realização de voo com uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), embarcada com sensor RGB ou RGB e infravermelho e coleta de amostras de água no mesmo dia e horário.

Desta forma haverá a definição das coordenadas do ponto ou dos pontos de coletas, além de que, imagens geradas por um sensor embarcado em uma ARP

possuem maior resolução espacial, ou seja, o tamanho do pixel representado no terreno é menor, enquanto sistemas orbitais o tamanho do pixel gera em torno de 30 metros, enquanto o pixel da ARP fica na casa de centímetros, permitindo uma definição melhor da correlação entre as bandas e os parâmetros de qualidade da água.

Outra linha de estudo a ser explorada é da correlação de outros parâmetros de qualidades da água, além da turbidez, da transparência e da concentração de clorofila *a*, como temperatura da água (através da banda do infravermelho), déficit de oxigênio, demanda química de oxigênio (DQO), com bandas dos sensores multiespectrais, os quais possuem intervalos menores de níveis de cinza, portanto uma maior quantidade de bandas.

REFERÊNCIAS

ANA – **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: www.gov.br/ana. Acesso em: 20 de agosto de 2022.

BARBOSA, C.C.F.; **Caracterização espectral das massas d'água amazônicas**. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 05 – 10 abril de 2003. INPE, p. 2419-2425.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processos de Imagens Digitais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Edição revisada. Instituto de Geociências UNICAMP. Campinas, 1992.

DA FONSECA XAVIER, C.; DIAS, L. N.; BRUNKOW, R. F. **Qualidade das águas dos reservatórios do estado do Paraná**. Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto Ambiental do Paraná. 2017.

DE SOUZA TESSEROLLI, A. E. M.; DA SILVEIRA, M. A. T. **Diagnóstico Socioambiental e Desenvolvimento do Turismo no Município de Piraquara– Aplicação do Projeto**. Secretaria de Estado da Educação do Paraná. 2008.

FILHO, A. C. P.; LASTORIA, G.; TORRES, T. G. **Sensoriamento Remoto Ambiental Aplicado – Introdução as Geotecnologias**. Editora UFMS. Campo Grande, 2008.

IAT – **Instituto Água e Terra**. Disponível em: www.iat.pr.gov.br. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

INPE – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: inpe.br. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

KARABATOS, I; TSAGKARIS, C; KALACHANIS, K. **All roads lead to Rome: Aspects of public health in ancient Rome**. Infez Med. Setembro, 2021.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. New York. 1984.

LIMA, D. L.; **Caracterização da dispersão espacial de plantas aquáticas usando sensoriamento remoto e geoestatística**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril de 2007, INPE p. 5879-5886.

MONTEIRO, F. A. **O Turismo como ferramenta para promover o desenvolvimento social e a preservação do meio ambiente em Piraquara (Paraná, Brasil)**. Turismo e Sociedade, v. 11, n. 3, 2019.

NOVO, E. M. L. M. **Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007.

NOVO, E. M. L. M. **Comportamento espectral da água**. In: MENESES, P. R. & NETTO, J. S. M. (Orgs.). **Sensoriamento remoto – reflectância dos alvos naturais**. Editora Universidade de Brasília – UnB. Embrapa Cerrados. 2001.

PONTOS TURÍSTICOS. Disponível em: <https://piraquara.pr.gov.br/turismo/PONTOS-TURISTICOS-813-12460.shtml>. Acesso em: 05 julho. 2022.

PORTARIA Nº 2.914, 12 de dezembro de 2011 – Ministério da Saúde – MS.

RESOLUÇÃO Nº 274, 29 de novembro de 2000 – Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA.

RESOLUÇÃO Nº 357, 17 de março de 2005 – Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA.

RESOLUÇÃO Nº 70, 01 de outubro de 2009 – Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Paraná – CEMA-PR.

SANEPAR – **Companhia de Saneamento do Paraná**. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.

SWAIN, P. H.; Shirley, M. D. **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. McGraw-Hill International Book Company. University of California. 1978.

TULCHINSKY, TH. **John Snow, Cholera, the Broad Street Pump; Waterborne Diseases Then and Now. Case Studies in Public Health**. 2018.

VILELA, M. A. M. A.; **Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto**. Universidade Federal de Uberlândia. 2010.

XAVIER, C. F.; DIAS, L. N.; BRUNKOW, R. F. **Qualidade das águas dos reservatórios de Estado do Paraná**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Curitiba, 2017.

ANEXO 1 – TABELAS DE PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA O RESERVATÓRIO PIRAQUARA I (Xavier; Dias; Brunkow, 2017)

Os valores destacados nas tabelas correspondem as datas e aos valores utilizados para cálculo das correlações entre as bandas das imagens e os parâmetros de qualidade da água.

PARÂMETRO	UNIDADES	27/01/1998		30/06/1998		19/01/1999		30/08/2000		18/07/2001		06/03/2002	
		PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II
Temperat. Água	⁰ Celcius	26,8	19,2	17,0	15,1	23,5	18,3	16,1	14,6	16,6	16,0	25,5	22,0
Turbidez	NTU	6,0	3,0	2,0	2,0	-	3,0	2,0	2,0	2,8	2,5	3,3	3,2
Transparência	d. Secchi -m.	1,50	-	2,60	-	1,70	-	3,00	-	2,10	-	1,20	-
Alcalinidade Total	CaCO ₃ - mg.l ⁻¹	7,0	14,0	6,0	6,0	7,9	7,7	9,0	8,0	8,2	14,0	7,9	6,9
Nitrato	N - mg.l ⁻¹	0,02	<0,01	0,05	0,02	<0,01	<0,01	0,09	0,09	0,08	0,11	0,02	0,02
Nitrito	N - mg.l ⁻¹	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,002	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003
Nitrogênio Amoniacal	N - mg.l ⁻¹	0,05	0,36	0,04	0,06	<0,02	0,37	0,28	0,23	0,37	0,35	<0,02	0,20
Nitrogênio Kjeldahl	N - mg.l ⁻¹	0,18	0,71	0,23	0,31	0,28	0,60	0,76	0,55	0,48	0,51	0,16	0,73
Res. Susp. Totais	mg.l ⁻¹	3	8	3	2	4	2	13	3	5	5	3	4
DQO	O ₂ - mg.l ⁻¹	7,0	2,0	7,0	6,0	7,0	6,0	3,2	3,5	12,0	14,0	6,4	5,7
DBO5	O ₂ - mg.l ⁻¹	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	<1	1,1	1,1	2,3	2,2	2,0	<2
% sat. oxig. dis.	%	96	0	105	88	107	0	94	80	89	72	101	4
Oxigênio Dissolvido	O ₂ - mg.l ⁻¹	7,2	0,0	9,3	8,1	8,2	0,0	8,5	7,6	7,9	6,3	7,5	0,4
Fósforo Total	P - mg.l ⁻¹	0,011	0,010	0,014	0,014	0,017	0,020	0,019	0,026	0,007	<0,005	0,015	0,010
pH	unidades	7,2	6,7	7,3	7,3	7,0	6,4	7,4	6,8	7,1	7,1	7,9	6,6
Condutividade	µS.cm ⁻¹	20	33	20	20	19	33	22	23	23	25	22	26
Clorofila a	mg.m ⁻³	-	-	4,44	2,54	3,21	0,56	ND	1,33	4,44	2,96	5,92	4,74

PARÂMETRO	UNIDADES	26/07/2002		16/10/2003		08/03/2004		22/06/2004		18/04/2005		24/06/2005	
		PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II
Temperat. Água	⁰ Celcius	16,4	15,7	18,3	16,6	23,9	20,6	16,3	15,3	23,8	23,4	18,2	18,1
Turbidez	NTU	3,5	3,2	2,2	2,2	2,1	3,2	5,5	5,4	2,6	2,5	5,0	5,0
Transparência	d. Secchi -m.	2,40	-	3,70	-	2,20	-	2,00	-	1,60	-	3,00	-
Alcalinidade Total	CaCO ₃ - mg.l ⁻¹	7,5	6,4	7,2	7,6	9,1	9,3	8,0	8,1	6,2	5,7	10,4	8,6
Nitrato	N - mg.l ⁻¹	0,09	0,10	0,06	0,03	0,04	6,02	0,08	0,08	0,02	<0,002	0,05	0,06
Nitrito	N - mg.l ⁻¹	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	0,002	0,002	<0,002	<0,002
Nitrogênio Amoniacal	N - mg.l ⁻¹	0,15	0,15	0,02	0,14	0,10	0,24	0,17	0,19	0,04	<0,002	0,15	0,04
Nitrogênio Kjeldahl	N - mg.l ⁻¹	0,36	0,35	0,41	0,83	0,34	0,74	0,52	0,63	0,32	0,30	0,27	0,36
Res. Susp. Totais	mg.l ⁻¹	2	7	1	1	3	6	2	3	20	2	3	5
DQO	O ₂ - mg.l ⁻¹	6,0	4,6	11,0	16,0	6,0	5,0	11,0	16,0	6,0	<2	<1	<1
DBO5	O ₂ - mg.l ⁻¹	3,0	<2	2,0	<2	<2	<2	3,0	<2	2,0	<1	<2	<2
% sat. oxig. dis.	%	96	81	105	47	98	0	100	88	92	75	83	84
Oxigênio Dissolvido	O ₂ - mg.l ⁻¹	8,6	7,4	9,1	4,3	7,8	0,0	9,1	8,1	7,1	5,7	7,1	7,2
Fósforo Total	P - mg.l ⁻¹	0,015	<0,005	0,020	0,043	0,006	0,051	0,017	0,015	<0,005	<0,005	0,009	<0,005
pH	unidades	7,3	6,9	6,5	6,1	6,7	6,1	7,0	6,7	7,2	7,1	6,9	6,8
Condutividade	µS.cm ⁻¹	23	22	-	24	23	-	22,4	22,9	19	20	22	21
Clorofila a	mg.m ⁻³	2,74	2,07	12,69	1,29	3,85	17,02	3,89	1,78	1,06	1,48	1,33	0,89

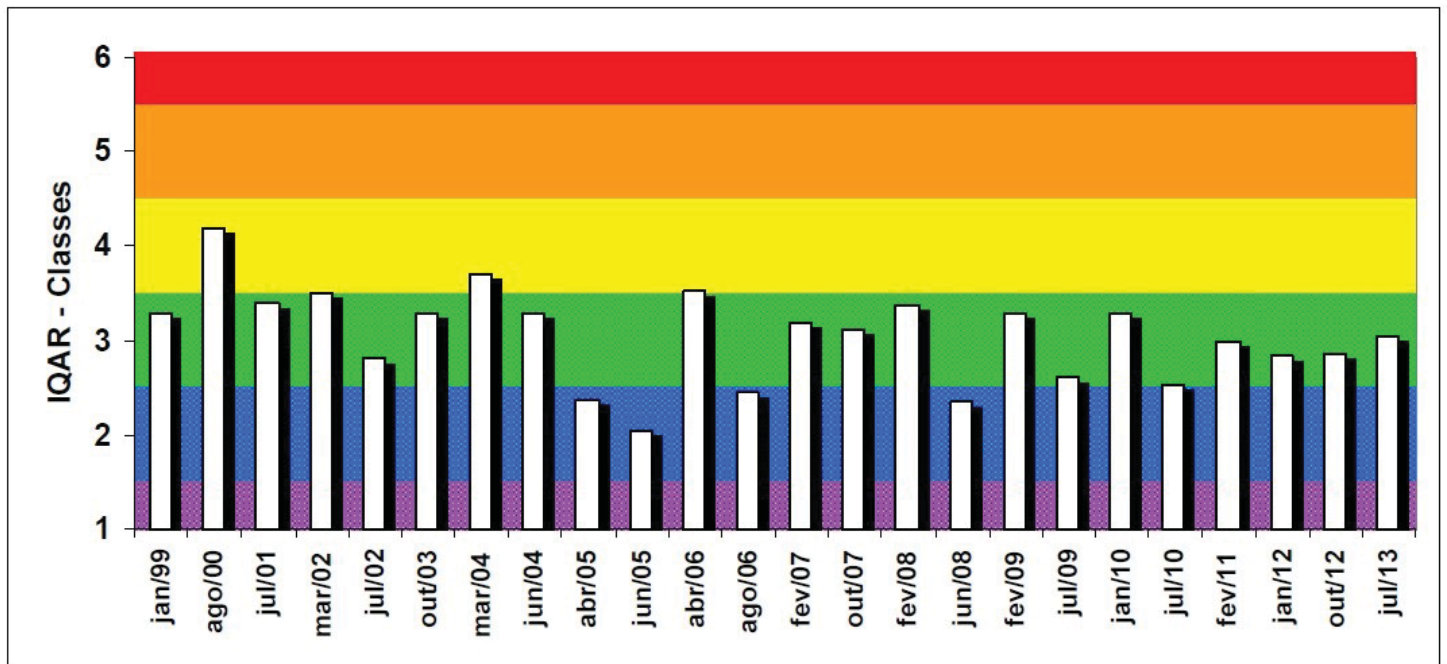
PARÂMETRO	UNIDADES	04/04/2006		01/08/2006		26/02/2007		29/10/2007		14/02/2008		25/06/2008	
		PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II
Temperat. Água	⁰ Celcius	23,2	22,9	16,7	16,5	26,3	22,8	20,8	17,1	24,9	21,4	16,0	15,9
Turbidez	NTU	2,0	3,0	2,0	2,0	2,4	2,5	1,7	2,1	2,0	1,8	1,5	1,5
Transparência	d. Secchi -m.	2,00	-	2,30	-	1,90	-	3,20	-	2,60	-	2,90	-
Alcalinidade Total	CaCO ₃ - mg.l ⁻¹	9,0	9,0	10,0	13,0	9,0	9,2	5,9	6,9	8,6	9,7	7,0	7,0
Nitrato	N - mg.l ⁻¹	11,30	0,03	0,03	0,04	0,11	0,09	0,10	0,09	0,04	0,04	0,04	0,05
Nitrito	N - mg.l ⁻¹	<0,002	<0,002	0,005	0,002	0,003	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
Nitrogênio Amoniacal	N - mg.l ⁻¹	0,06	0,06	0,10	0,10	0,03	0,20	0,04	0,20	0,03	0,32	0,18	0,18
Nitrogênio Kjeldahl	N - mg.l ⁻¹	0,31	0,46	0,33	0,37	0,20	0,40	0,48	0,54	0,35	0,62	0,43	0,44
Res. Susp. Totais	mg.l ⁻¹	2	2	<1	<1	6	2	2	2	3	7	2	2
DQO	O ₂ - mg.l ⁻¹	15,0	29,0	12,0	13,0	17,0	14,0	9,5	12,0	9,8	7,9	3,7	4,2
DBO5	O ₂ - mg.l ⁻¹	4,0	4,0	<2	<2	<2	<2	2,0	2,2	2,0	2,0	<2	3,2
% sat. oxig. dis.	%	88	73	90	88	105	1	107	41	102	39	87	86
Oxigênio Dissolvido	O ₂ - mg.l ⁻¹	6,8	5,6	8,0	7,9	7,7	0,1	8,5	3,6	7,6	3,1	7,7	7,7
Fósforo Total	P - mg.l ⁻¹	0,014	0,063	0,008	0,018	0,017	0,026	0,015	0,009	0,019	0,012	0,017	-
pH	unidades	6,8	6,7	7,1	7,1	6,9	6,3	7,4	6,3	7,2	6,3	6,7	6,7
Condutividade	µS.cm ⁻¹	20	21	22	27	21	23	23	25	22	27	22	23
Clorofila a	mg.m ⁻³	4,29	2,96	0,74	3,81	0,99	1,97	5,05	1,07	3,58	2,61	2,07	1,04

PARÂMETRO	UNIDADES	10/02/2009		28/07/2009		12/01/2010		21/07/2010		16/02/2011		25/01/2012	
		PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II	PROF I	PROF II
Temperat. Água	⁰ Celcius	25,8	18,6	15,0	15,0	24,6	20,8	16,5	15,4	24,7	19,3	25,2	19,5
Turbidez	NTU	1,9	1,3	2,3	2,4	1,6	1,4	1,0	1,5	2,3	2,9	1,1	1,7
Transparência	d. Secchi -m.	2,10	-	2,80	-	2,20	-	4,00	-	3,00	-	3,40	-
Alcalinidade Total	CaCO ₃ - mg.l ⁻¹	7,3	10,0	5,5	5,0	4,0	12,0	13,0	9,0	6,8	8,8	6,7	8,4
Nitrato	N - mg.l ⁻¹	0,03	<0,02	0,07	0,07	0,05	0,05	0,12	0,10	0,05	0,05	0,01	0,01
Nitrito	N - mg.l ⁻¹	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,0006	0,001
Nitrogênio Amoniacal	N - mg.l ⁻¹	0,02	0,24	0,22	0,24	0,07	0,20	0,15	0,16	0,02	0,03	0,05	0,29
Nitrogênio Kjeldahl	N - mg.l ⁻¹	0,41	0,70	0,82	0,95	0,27	0,47	0,17	0,30	0,26	0,66	0,51	0,71
Res. Susp. Totais	mg.l ⁻¹	4	4	3	4	3	1	3	4	5	8	2	1
DQO	O ₂ - mg.l ⁻¹	8,0	7,7	15,0	16,0	14,0	11,0	2,5	5,0	9,5	13,0	9,0	9,3
DBO5	O ₂ - mg.l ⁻¹	2,1	<2	2,4	4,3	2,2	2,2	<2	<2	2,0	2,0	2,0	2,0
% sat. oxig. dis.	%	104	1	95	94	94	5	99	87	89	1	105	2
Oxigênio Dissolvido	O ₂ - mg.l ⁻¹	7,6	0,1	8,7	8,5	7,0	0,4	8,7	7,9	6,7	0,0	7,8	0,2
Fósforo Total	P - mg.l ⁻¹	0,006	0,008	0,007	0,007	0,013	0,012	0,014	0,007	0,007	0,010	0,011	0,011
pH	unidades	7,0	6,3	6,9	7,0	7,0	6,2	7,2	7,0	6,3	6,3	7,2	6,1
Condutividade	µS.cm ⁻¹	19	27	22	22	20	24	20	20	16	21	20	25
Clorofila a	mg.m ⁻³	6,58	2,04	2,37	3,11	3,4	1,04	6,29	2,41	1,73	0	0,97	0,62

PARÂMETRO	UNIDADES	10/10/2012		03/07/2013	
		PROF I	PROF II	PROF I	PROF II
Temperat. Água	⁰ Celcius	22,2	17,7	16,2	16,0
Turbidez	NTU	0,1	0,1	8,0	8,0
Transparência	d. Secchi -m.	2,40	-	2,00	-
Alcalinidade Total	CaCO ₃ - mg.l ⁻¹	9,0	7,9	6,6	6,7
Nitrato	N - mg.l ⁻¹	0,08	0,07	0,08	0,07
Nitrito	N - mg.l ⁻¹	0,0020	<0,002	0,0021	0,003
Nitrogênio Amoniacal	N - mg.l ⁻¹	0,07	0,09	0,16	0,15
Nitrogênio Kjeldahl	N - mg.l ⁻¹	0,45	0,48	0,36	0,41
Res. Susp. Totais	mg.l ⁻¹	4	4	2	4
DQO	O ₂ - mg.l ⁻¹	9,6	11,0	12,0	9,4
DBO5	O ₂ - mg.l ⁻¹	1,6	2,0	<2	<2
% sat. oxig. dis.	%	108	74	89	88
Oxigênio Dissolvido	O ₂ - mg.l ⁻¹	8,4	6,2	7,9	7,9
Fósforo Total	P - mg.l ⁻¹	0,007	0,009	0,007	0,008
pH	unidades	7,2	6,9	6,7	6,8
Condutividade	µS.cm ⁻¹	20	21	21	21
Clorofila a	mg.m ⁻³	5,18	11,98	12,28	2,66

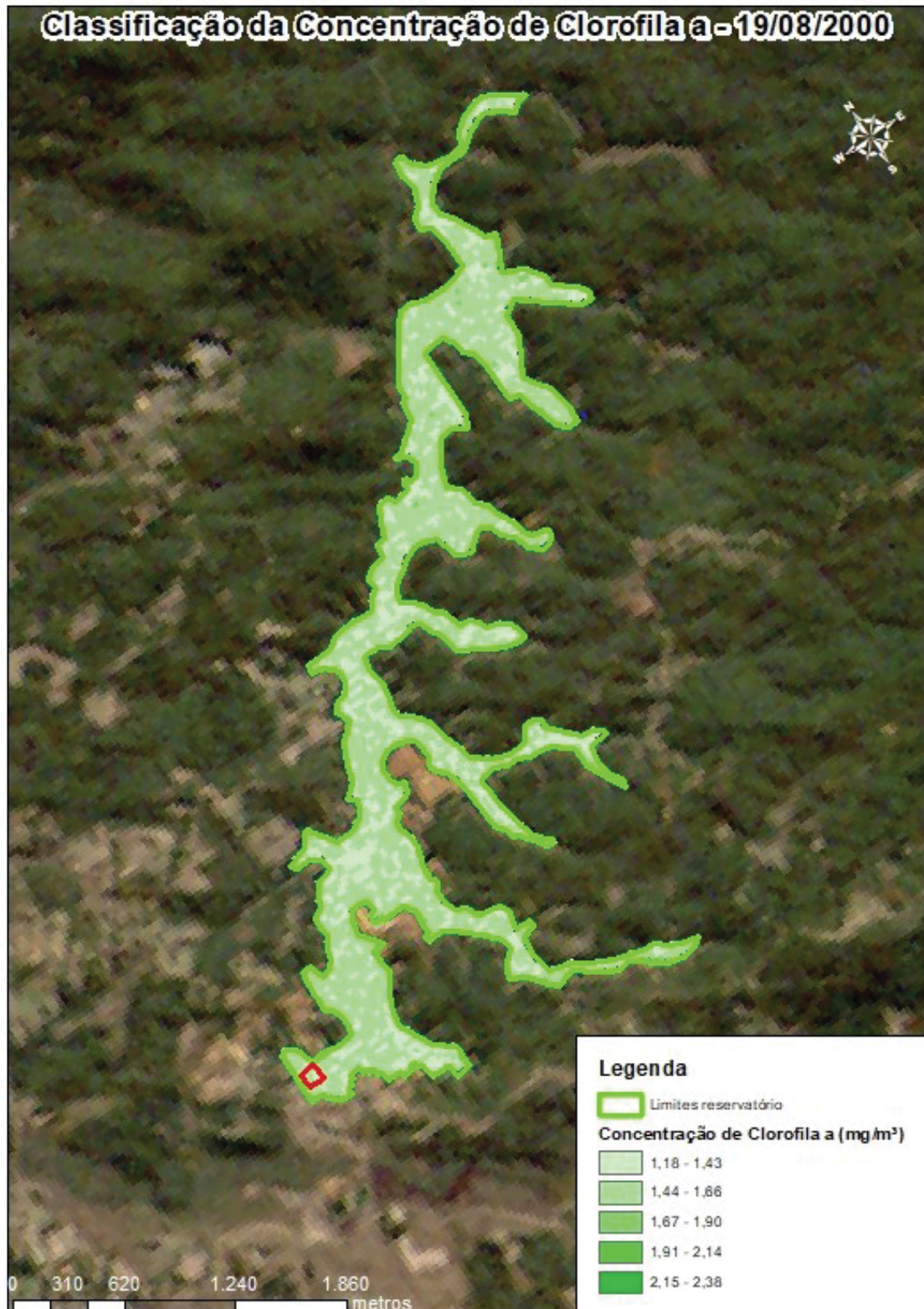
ANEXO 2 – CLASSIFICAÇÃO DO RESERVATÓRIO PIRAQUARA I,
SEGUNDO ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO (IET) (Xavier; Dias; Brunkow, 2017)

Categorias - IET	Ponderação - IET
ULTRAOLIGOTRÓFICO	$IET \leq 47$
OLIGOTRÓFICO	$47 < IET \leq 52$
MESOTRÓFICO	$52 < IET \leq 59$
EUTRÓFICO	$59 < IET \leq 63$
SUPEREUTRÓFICO	$63 < IET \leq 67$
HIPEREUTRÓFICO	$IET > 67$



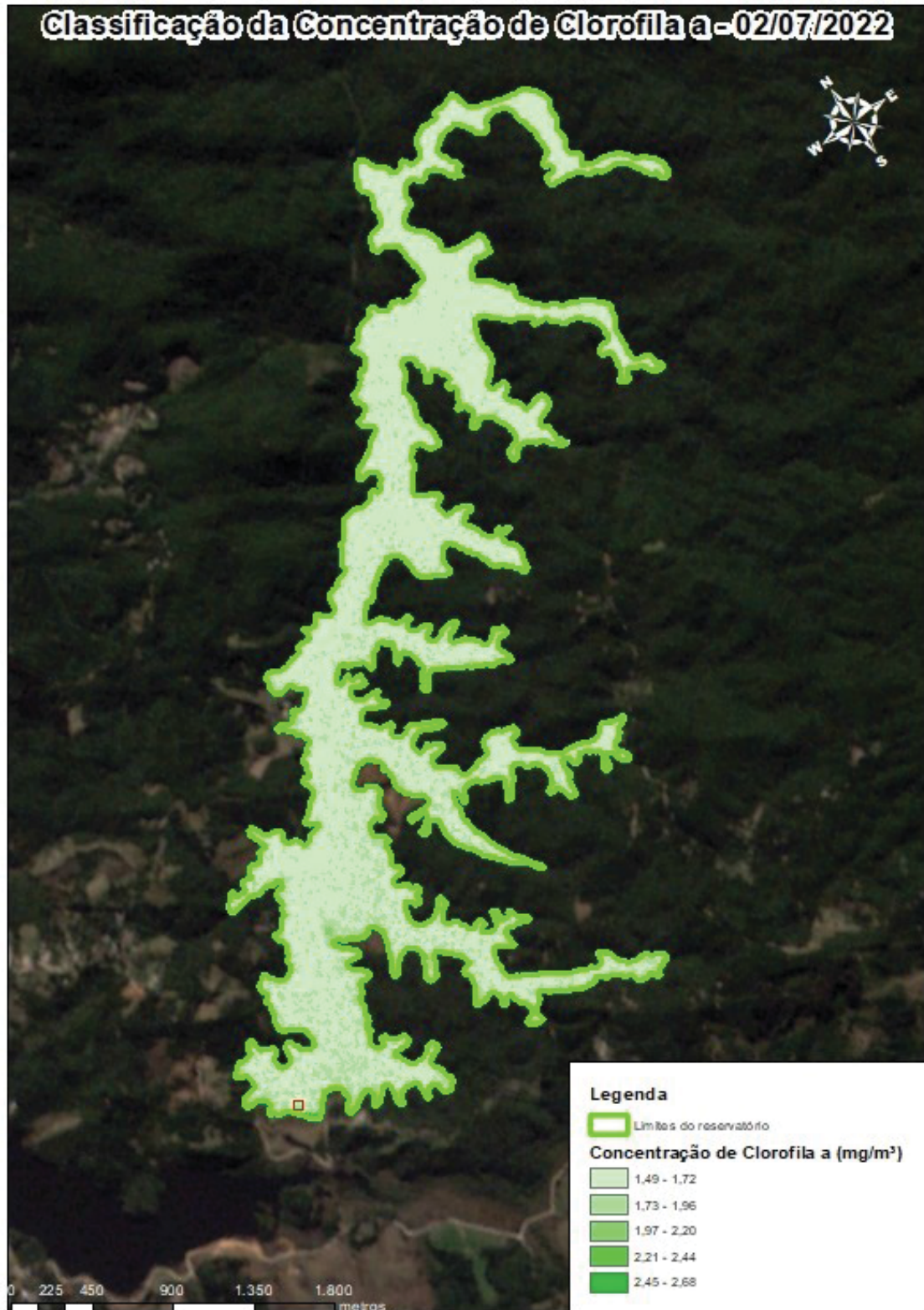
ANEXO 3 – MAPAS DE CLASSIFICAÇÃO PARA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A E TURBIDEZ, IMAGENS DE 19/08/2000 E 02/07/2022

FIGURA 7: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 19/08/2000, PARA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A, SATÉLITE LANDSAT 5.



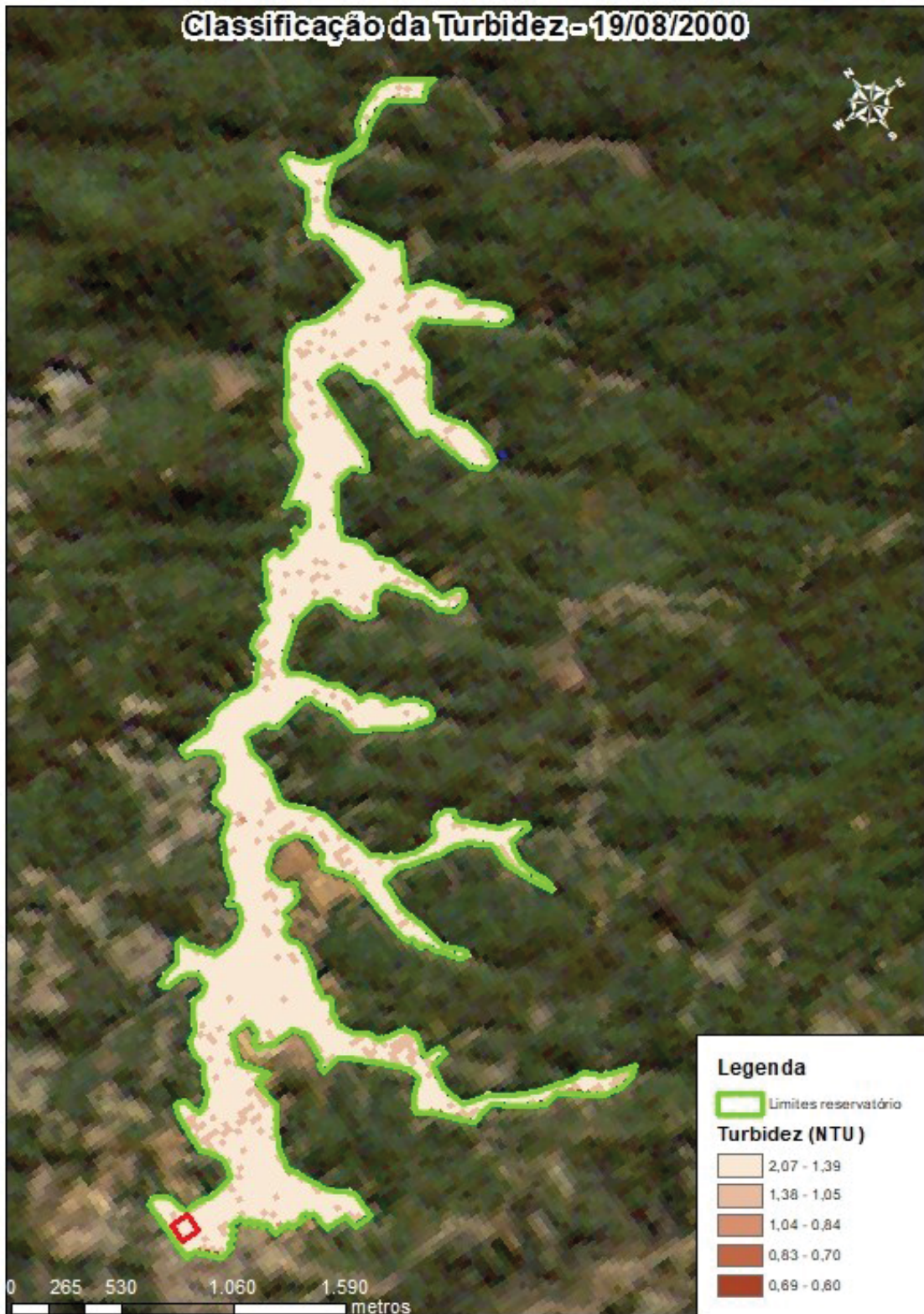
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 8: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 02/07/2022, PARA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A, SATÉLITE CBERS 4A.



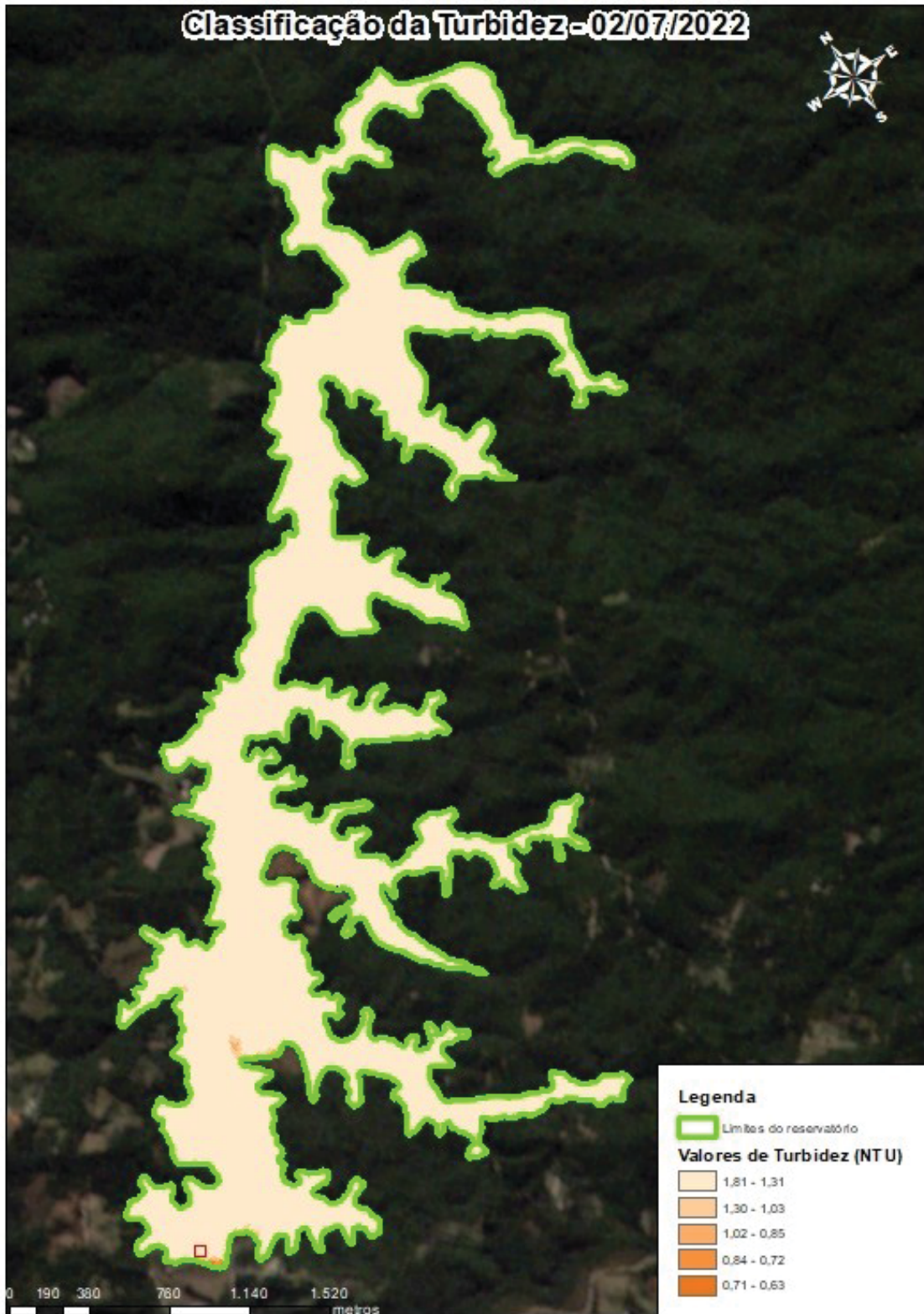
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 9: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 19/08/2000, PARA TURBIDEZ, SATÉLITE LANDSAT 5.



FONTE: O autor (2022).

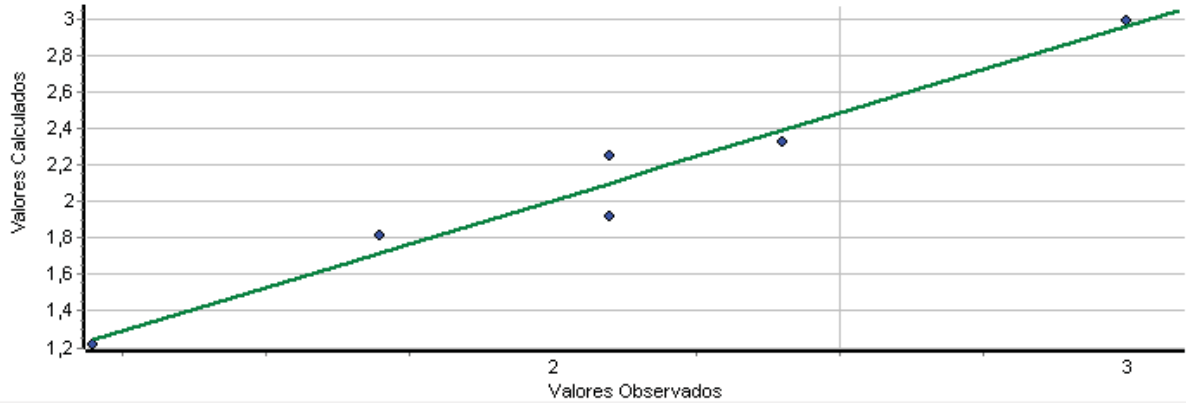
FIGURA 10: CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DE 02/07/2022, PARA TURBIDEZ, SATÉLITE CBERS 4A.



FONTE: O autor (2022).

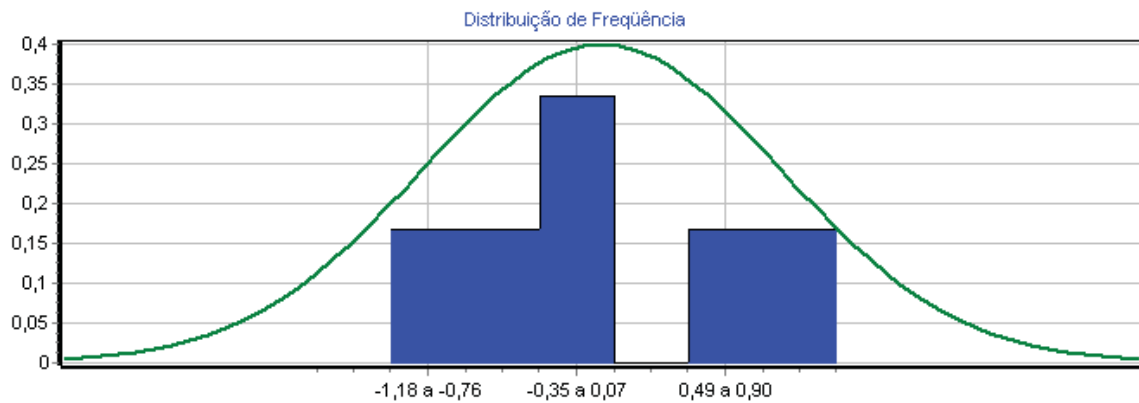
ANEXO 4 – GRÁFICOS GERADOS PELAS REGRESSÕES LINEARES

GRÁFICO 1: GRÁFICO DE ADERÊNCIA (VALOR OBSERVADO X VALOR CALCULADO) PARA A TRANSPARÊNCIA



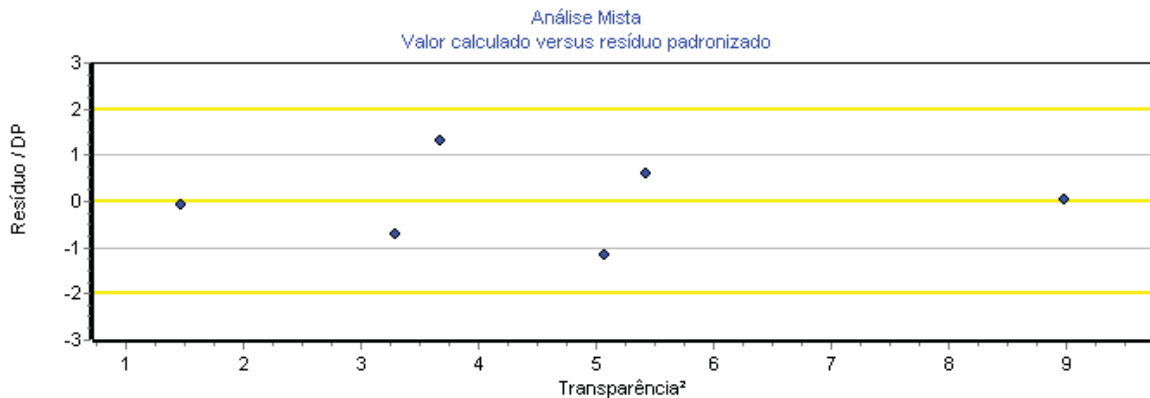
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 2: HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS X CURVA NORMAL PADRÃO (TRANSPARÊNCIA)



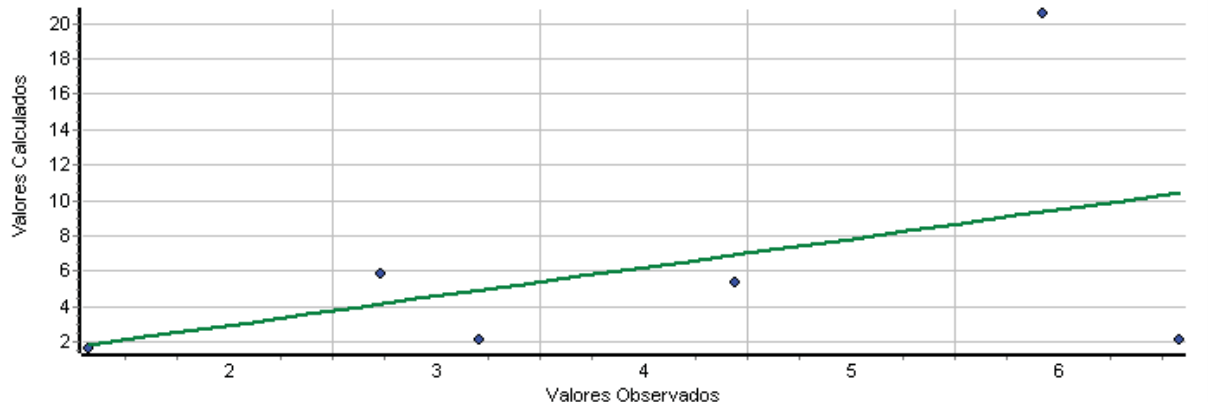
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 3: DISTRIBUIÇÃO DE VALORES AJUSTADOS X RESÍDUOS PADRONIZADOS (TRANSPARÊNCIA)



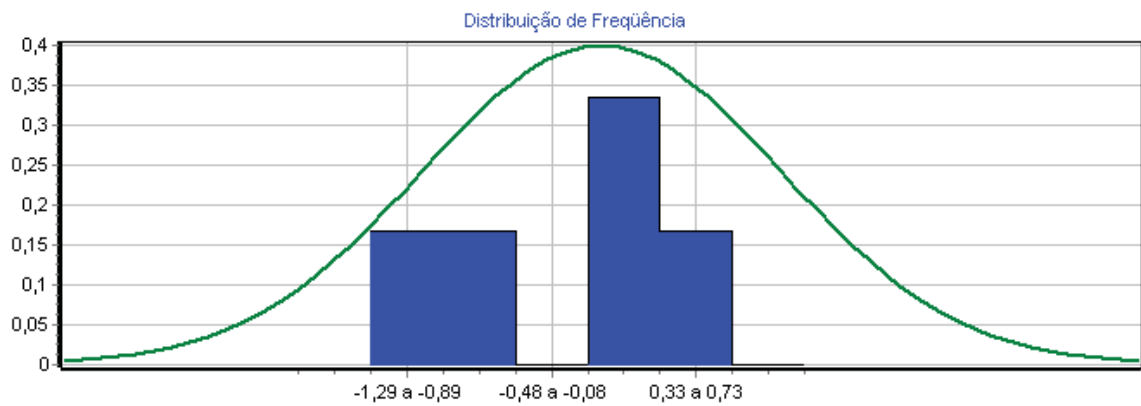
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 4: GRÁFICO DE ADERÊNCIA (VALOR OBSERVADO X VALOR CALCULADO) PARA A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA A.



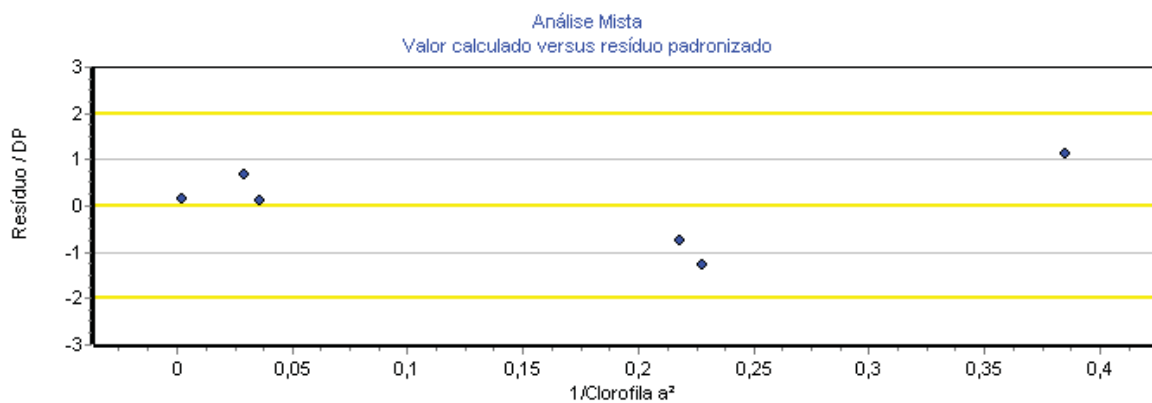
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 5: HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS X CURVA NORMAL PADRÃO (CLOROFILA A)



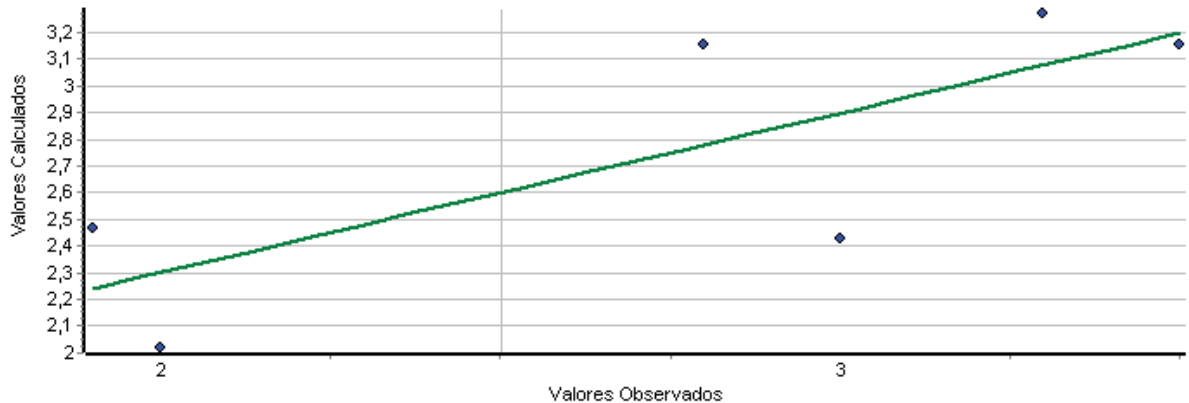
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 6: DISTRIBUIÇÃO DE VALORES AJUSTADOS X RESÍDUOS PADRONIZADOS (CLOROFILA A)



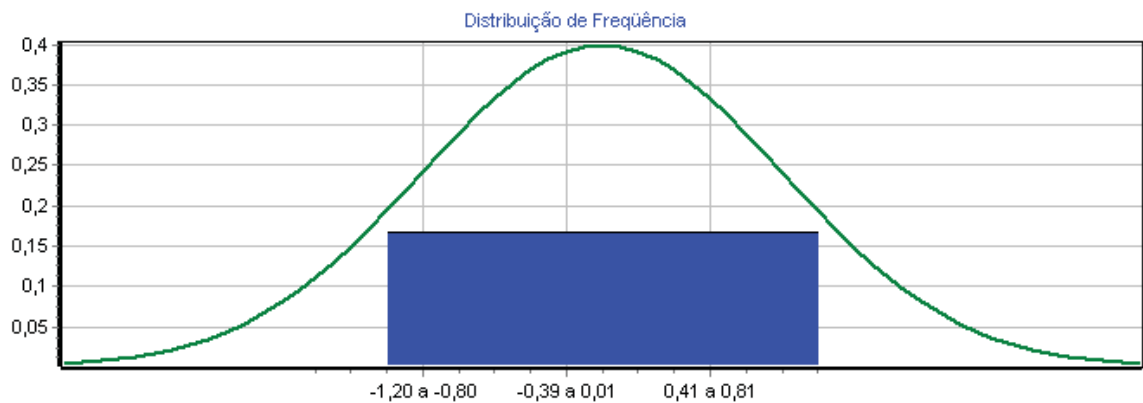
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 7: GRÁFICO DE ADERÊNCIA (VALOR OBSERVADO X VALOR CALCULADO) PARA A TURBIDEZ



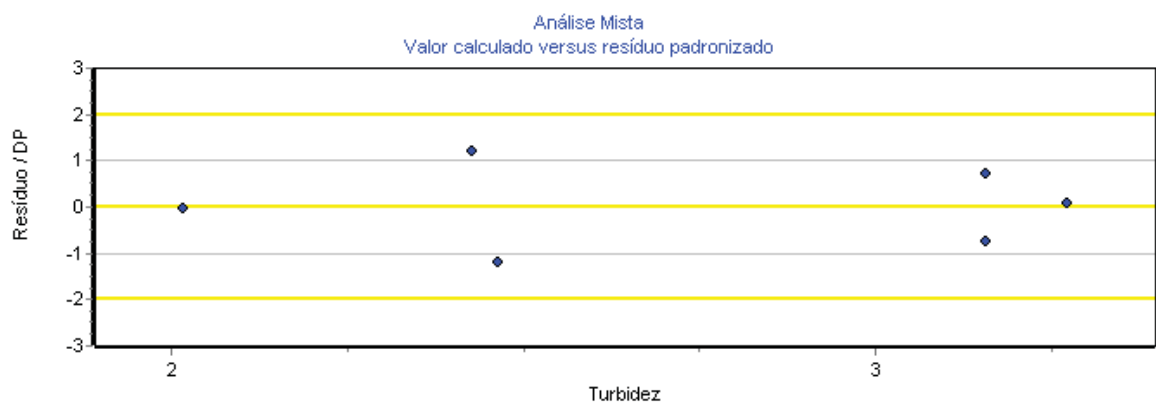
FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 8: HISTOGRAMA DE RESÍDUOS PADRONIZADOS X CURVA NORMAL PADRÃO (TURBIDEZ)



FONTE: O autor (2022).

GRÁFICO 9: DISTRIBUIÇÃO DE VALORES AJUSTADOS X RESÍDUOS PADRONIZADOS (TURBIDEZ)



FONTE: O autor (2022).