

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO LAGO
DESCOBERTO: ANÁLISE DE PARÂMETROS
LIMNOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE
DO AMBIENTE

ANA CAROLINA PEREIRA DE SOUSA

ORIENTADOR: PROF. RICARDO TEZINI MINOTI
CO-ORIENTADOR: PROF^a. LENORA N. LUDOLF GOMES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JULHO/2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO LAGO
DESCOBERTO: ANÁLISE DE PARÂMETROS
LIMNOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE
DO AMBIENTE**

ANA CAROLINA PEREIRA DE SOUSA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**RICARDO TEZINI MINOTI, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LENORA NUNES LUDOLF GOMES, DSc. (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**YOVANKA PÉREZ GINORIS, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JOSÉ FRANCISCO GONÇALVES JÚNIOR, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**IVO AUGUSTO LOPES MAGALHÃES, Msc. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 de julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUSA, ANA CAROLINA PEREIRA DE	
Estudo da qualidade da água do lago Descoberto: análise de parâmetros limnológicos para avaliação da integridade do ambiente.	
xi, 75 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)	
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Reservatório	2. Qualidade
3. Limnológico	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA, A. C. P. (2018). Estudo da qualidade da água do lago Descoberto: análise de parâmetros limnológicos para avaliação da integridade do ambiente. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ana Carolina Pereira de Sousa

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo da qualidade da água do lago Descoberto: análise de parâmetros limnológicos para avaliação da integridade do ambiente.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ana Carolina Pereira de Sousa
QNP 30, Conjunto C, Casa 38.
72236-003 - Ceilândia/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, e por me dar a oportunidade de alcançar mais esse objetivo.

À minha mãe, Francisca, por sempre ter sido um exemplo de mulher forte e determinada. Obrigada pelo apoio incondicional, incentivo em todas as horas e amor.

Aos meus irmãos, Paulo Antonio e Maria Eduarda, por estarem sempre ao meu lado, pelo apreço e por serem parte do suporte que me trouxe até aqui. Ao meu namorado, Jonathan, pelas palavras de apoio, pelos momentos compartilhados e por, acima de tudo, a cada dia me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus orientadores, Ricardo e Lenora, pelo suporte neste período de pesquisa. Obrigada pela paciência, dedicação, correções e incentivos.

Aos meus avaliadores, Yovanka, Gilliard, Ivo e José, pelas orientações, conselhos e conhecimentos transmitidos nesse um ano de projeto, colaborando para a minha formação profissional.

À Universidade de Brasília, ao Laboratório de Saneamento Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB e ao Laboratório de Limnologia, do Departamento de Ecologia, seu corpo docente e administração, pela oportunidade que me foi dada e por, especialmente, abrir meus olhos a novos horizontes e mostrar-me que o conhecimento transforma e edifica.

À CAESB, pelo apoio e disponibilização de seus dados, sua estrutura e equipamentos durante a pesquisa.

Ao Paulino e Ramon, pela companhia, técnica e paciência no trabalho de campo e nas análises de laboratório.

As minhas amigas Anne, Becca, Caló, Évellin, Gabi, Loh e Vevis que há muitos anos estão comigo, compartilhado das fases boas e ruins de uma vida universitária. A ajuda de vocês foi essencial para a dinâmica desse trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

O presente estudo visa compreender as relações entre os parâmetros físicos, químicos e biológico, do ambiente aquático do lago Descoberto, manancial destinado ao abastecimento público de água no DF. Para tanto, foi realizado o diagnóstico de parâmetros abióticos e biótico da água do reservatório em abril e maio de 2018. Os resultados dos parâmetros diagnosticados (fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrato, pH, condutividade elétrica, turbidez, temperatura da água, oxigênio dissolvido e clorofila-*a*) indicaram perfis de distribuição na coluna d'água, tanto dos fatores físicos e químicos quanto do biológico, semelhantes para cada estação de amostragem. Por meio da utilização do IQAR para os meses analisados, foi verificado enquadramento do corpo hídrico como moderadamente degradado em todas as estações. Para o estudo ainda foram utilizados dados secundários de monitoramento realizados pela CAESB referente aos anos de 2004 a 2016, por meio desses dados foram calculados o IET_{Toledo} e o $IET_{\text{Modificado}}$, a fim de identificar o grau de trofia do reservatório, os resultados foram de grau de trofia oligotrófico e ultraoligotrófico respectivamente, para todo os anos. Utilizou-se a resposta espectral da água com intuito de discriminar os parâmetros transparência, clorofila-*a* e turbidez, por meio de dados do sensor Sentinel-2, a presente pesquisa utilizou os dados diagnosticados nos meses de abril e maio, acerca da qualidade da água no reservatório para comparar com as imagens disponibilizadas pelo satélite, as imagens foram manipuladas em um programa de geoprocessamento, selecionando as bandas do espectro eletromagnético mais adequadas para a análise de cada parâmetro. Dentro dessas bandas, foram estabelecidas faixas de níveis de cinza que foram correlacionadas com as análises da água. Os resultados obtidos foram usados para se estabelecer uma escala de classificação de imagens, que foi utilizada para monitorar alterações desses parâmetros no reservatório. A correlação entre os níveis de cinza das imagens e os dados obtidos foi utilizada na previsão da distribuição espacial dos parâmetros ao longo da área do reservatório. Os resultados revelam que a metodologia proposta constitui uma ferramenta interessante para monitorar variações espaciais e temporais de transparência, concentração de clorofila e turbidez em reservatórios.

Palavras-chave: qualidade da água, reservatório, índices, sensoriamento remoto.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	4
2.1. OBJETIVO GERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1. RESERVATÓRIOS E LAGOS: ASPECTOS GERAIS	5
3.1.1. Características gerais de reservatórios e lagos artificiais	5
3.1.2. Estratificação térmica, química e hidráulica.....	6
3.2. VARIÁVEIS FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA	8
3.2.1. Variáveis físicas e químicas	8
3.2.2. Variáveis biológicas	13
3.3. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS	14
3.4. SENSORIAMENTO REMOTO.....	19
3.4.1. Monitoramento de qualidade da água utilizando sensoriamento remoto	21
3.4.2. Processamento digital de imagens	22
3.5. HISTÓRICO DA CRISE HÍDRICA NO LAGO DESCOBERTO.....	23
4. METODOLOGIA.....	27
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.1.1. Área de estudo	27
4.1.2. Área de proteção ambiental - APA.....	30
4.1.3. Considerações gerais acerca do clima, uso do solo e da água.....	31

4.1.4. Índice de qualidade da água utilizado no reservatório do Descoberto	33
4.2. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	34
4.2.1. Coletas	35
4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE	36
4.3.1. Análise laboratorial.....	36
4.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA ENTRE OS MESES AMOSTRADOS.....	37
4.5. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTADO TRÓFICO	38
4.6. GEOPROCESSAMENTO	39
4.6.1. Satélite Sentinel-2.....	40
4.6.2. Processamento digital de imagens	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ESTUDADOS NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES DA COLUNA D'ÁGUA.....	44
5.2. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MESES AMOSTRADOS.....	51
5.3. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTADO TRÓFICO	53
5.3.1. Avaliação do grau de limitação da produtividade do fitoplâncton.....	55
5.4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	56
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de estratificação.....	7
Figura 2 - Distribuição vertical do oxigênio e gás carbônico no lago Curuçá, Estado do Para.	10
Figura 3 - Curvas de resposta espectral padrão da água, solo e vegetação.	21
Figura 4 - Vazão média captada e afluyente no reservatório do Descoberto.	24
Figura 5 - Volume consumido total de água no Distrito Federal.	25
Figura 6 - Variação do volume útil do reservatório do Descoberto.	26
Figura 7 - Localização da bacia do rio Descoberto.	27
Figura 8 - Detalhe da localização do lago Descoberto.	29
Figura 9 - Localização da APA do Descoberto e dos postos fluviométricos e de qualidade da água.....	30
Figura 10 - Localização das estações de amostragem no Lago Descoberto.....	34
Figura 11 - Padrão utilizada para aferição do nível de cinza nas células vizinhas a Estação de amostragem -EA.	42
Figura 12 - Níveis de cinza e escala de absorção de Radiação Eletromagnética.	43
Figura 13 - Perfil térmico das Estações 1,2 e 3 na coleta referente ao mês de abril, no reservatório Descoberto/DF.....	45
Figura 14 - Perfil térmico das Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de maio, no reservatório Descoberto/DF.....	46
Figura 15 - Perfil de oxigênio dissolvido da Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de abril, no reservatório Descoberto/DF.	47
Figura 16 - Perfil de oxigênio dissolvido da Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de maio, no reservatório Descoberto/DF.....	48
Figura 17 - Comportamento do $IET_{\text{modificado}}$ e do IET_{Toledo} para o Reservatório do Descoberto entre os anos de 2004 a 2016.....	53
Figura 18 - Estado trófico obtido para a clorofila-a e para a concentração de fósforo total segundo IET Toledo.	55
Figura 19 - Estado trófico obtido para a clorofila-a e para a concentração de fósforo total segundo IET Modificado.	56
Figura 20 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 2 e o parâmetro transparência monitorado.....	59

Figura 21 - Absorção de REM na banda 2 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	60
Figura 22 - Absorção de REM na banda 2 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	61
Figura 23 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 3 e o parâmetro clorofila-a monitorado.....	62
Figura 24 - Absorção de REM na banda 3 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	63
Figura 25 - Absorção de REM na banda 3 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	64
Figura 26 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 4 e o parâmetro turbidez.....	66
Figura 27 - Absorção de REM na banda 4 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	67
Figura 28 - Absorção de REM na banda 4 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Qualidade da Água para ambientes lênticos.	15
Tabela 2 - Classificação do Estado Trófico segundo o IET _{Toledo}	16
Tabela 3 - Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo IET _{Modificado}	17
Tabela 4 - Variáveis selecionadas e seus respectivos pesos.....	18
Tabela 5 - Matriz de qualidade da água proposta para o uso do IQAR.....	18
Tabela 6 - Descrição das estações de amostragem.....	35
Tabela 7 - Informações acerca das coletas.....	35
Tabela 8 - Relação dos parâmetros físicos e químicos para o monitoramento e seus respectivos métodos e análises.....	36
Tabela 9 - Descrições do MSI/Sentinel-2.....	40
Tabela 10 - Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 1.....	48
Tabela 11 - Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 2.....	49
Tabela 12 Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 3.....	49
Tabela 13 - Qualificação da qualidade da água do reservatório do Descoberto segundo o IQAR proposto pelo IAP (2004).	52
Tabela 14 - Níveis de Cinza na banda 2 em Abril de 2018.....	56
Tabela 15 - Níveis de Cinza na banda 3 em Abril de 2018.....	57
Tabela 16 - Níveis de Cinza na banda 4 em Abril de 2018.....	57
Tabela 17 - Níveis de Cinza na banda 2 em Maio de 2018.....	57
Tabela 18 - Níveis de Cinza na banda 3 em Maio de 2018.....	57
Tabela 19 - Níveis de Cinza na banda 4 em Maio de 2018.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
APA	Área de Proteção Ambiental
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EA	Estação de Amostragem
ENC	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
ESA	European Space Agency
FT	Faculdade de Tecnologia
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IET	Índice de Estado Trófico
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQA	Índice de Qualidade da Água
IQAR	Índice de Qualidade de Água em Reservatórios
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
OD	Oxigênio Dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
PDI	Processamento Digital de Imagens
PDOT	Plano Urbanístico do Distrito Federal
pH	Potencial Hidrogeniônico
PICAG	Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão
REM	Radiação Eletromagnética
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação -
UnB	Universidade de Brasília
UTM	Projeção Universal Transverse de Mercator

1. INTRODUÇÃO

A água é a substância mais abundante no planeta Terra, no entanto a parcela considerada própria para o consumo humano é um percentual ínfimo. A água que se encontra facilmente disponível em lagos e rios representa menos de 0,3% de toda a água doce do planeta. Visto que, a água é um recurso essencial, pois é imprescindível ao metabolismo e desenvolvimento de atividades humanas, além de indispensável na manutenção do equilíbrio ecológico, a necessidade de manter a qualidade das fontes deste recurso disponíveis se torna cada vez mais notável.

A humanidade é reconhecida por exercer fortes pressões sobre o ambiente em prol do desenvolvimento econômico e social em respostas às demandas por recursos. Porém, essas ações estão muitas vezes vinculadas a impactos negativos nos recursos naturais e no meio ambiente. Mediante esses fatores, a Organização Mundial de Saúde - OMS, referenciou que não se pode separar a qualidade da água da saúde da população. Deste modo, existe uma preocupação crescente sobre estudos relacionados as características físico-químicas e biológicas da água destinada ao abastecimento público.

Segundo o SNIS (2016), somente 58% da população urbana brasileira recebe atendimento por redes de esgoto, e apenas 42,7% do esgoto gerado recebe tratamento. Esses dados revelam a precariedade do serviço de esgotamento sanitário no Brasil, visto que, a poluição que afeta rios e lagos nas proximidades dos centros urbanos é em muitos casos resultado desse déficit no saneamento que impacta diretamente a quantidade e a qualidade da água e os seus usos, tais como: abastecimento de água, lazer, irrigação, manutenção das comunidades biológicas, dentre outros. Os nutrientes lançados nos corpos hídricos, quando disponíveis em excesso, favorecem o aumento da produtividade primária, acarretando a deterioração da qualidade das águas, assim como, a falta de manejo adequado na agricultura, a urbanização intensa e sem planejamento e a redução da cobertura vegetal.

Em vista dos fatores apontados, a necessidade de se estudar os corpos hídricos, referente a quantidade e a qualidade, se torna cada vez mais urgente. Tendo em conta a importância do lago Descoberto como manancial para o abastecimento público, pois este é o maior sistema de abastecimento do Distrito Federal – DF, atendendo cerca de 60 % da população local, se

torna indispensável o seu estudo dado a sua importância para a região. Os problemas encontrados na bacia do Descoberto estão intimamente ligados à ocupação intensiva, diversificada e desordenada, incluindo atividades agrícolas, pecuária e extrativismo mineral.

Considerando o cenário da disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos no DF, o monitoramento da qualidade da água se mostra uma ferramenta indispensável, por ser um conjunto de práticas que visam acompanhar alterações nas características físicas, químicas e biológicas do corpo hídrico, decorrentes de atividades antrópicas e de fenômenos naturais. As práticas relacionadas ao monitoramento de qualidade de água incluem a coleta de dados e de amostras de água em locais pré-estabelecidos, realizadas em intervalos de tempo regulares, de modo a gerar informações que possam ser utilizadas para definir as condições da qualidade da água.

Deste modo, a aplicação de índices de qualidade da água é uma alternativa importante para os programas de monitoramento, dado que estes índices são úteis frente a necessidade de sintetizar a informação sobre vários parâmetros físicos, químicos e biológicos, com o intuito de informar a população e orientar as ações de gestão da qualidade da água. Entre as vantagens do uso de índices destacam-se a facilidade de comunicação com o público não técnico e o fato de representar uma média de diversas variáveis em um único número. Em contrapartida, a principal desvantagem consiste na perda de informação das variáveis individuais e da interação entre elas

A execução do monitoramento e aplicação de índices são fatores importantes para implementação dos instrumentos de gestão das águas, pois fornecem informações estratégicas e permitem o acompanhamento das medidas mitigadoras aplicadas, auxiliando na tomada de decisão e favorecendo uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

Dentro desse contexto, pode-se considerar também a aplicação do sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto é uma tecnologia comprovada para análise espacial, podendo ser empregada para pesquisas de vegetação, solos, rochas, ocupação urbana e para o estudo da água. O seu uso na gestão de reservatórios é baseado no fato de que consequências da eutrofização estão associadas com a mudança nas propriedades ópticas da massa hídrica, podendo ser identificadas por meio de geoprocessamento de imagens. É neste contexto que

o sensoriamento remoto se consolida como uma alternativa complementar para se fazer uma estimativa da qualidade da água. O potencial do sensoriamento remoto é destacado principalmente no direcionamento de trabalhos de campo, proporcionando um monitoramento constante e de baixo custo, identificando possíveis pontos críticos para coletas de amostras de água, auxiliando no monitoramento da qualidade do ambiente aquático.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo geral promover o entendimento da dinâmica do ambiente aquático do lago Descoberto, manancial destinado ao abastecimento público de água no DF, por meio da análise de parâmetros bióticos e abióticos de qualidade da água.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Nesse contexto, objetivou-se especificamente os seguintes pontos:

- Estabelecer relações entre os parâmetros físicos, químicos e biológicos com a qualidade da água por meio do monitoramento limnológico do manancial e aplicação do Índice de Qualidade da Água para Reservatórios;
- Avaliar a classificação de índices de trofia para o reservatório do Descoberto por meio da aplicação dos dados de monitoramento realizados pela CAESB aos Índices do Estado Trófico (IET_{Toledo} e $IET_{\text{Modificado}}$);
- Analisar a aplicabilidade do uso de técnicas de sensoriamento remoto no diagnóstico da qualidade da água no reservatório do Descoberto para os seguintes parâmetros: transparência, clorofila-a e turbidez.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica e revisão bibliográfica dos tópicos considerados importantes para o desenvolvimento do trabalho, tais como: aspectos gerais sobre sistemas aquáticos continentais, caracterização de lagos, aspectos gerais sobre qualidade da água, entre outros.

3.1. RESERVATÓRIOS E LAGOS: ASPECTOS GERAIS

A princípio os reservatórios possuem a função de armazenar a água que escoar em um curso d'água, dessa forma, o barramento deve ser realizado em pontos estratégicos, a fim de garantir o atendimento das demandas de uso. No entanto, o armazenamento pode possuir objetivos distintos com o propósito de beneficiar a sociedade. As principais motivações pelas quais são construídos reservatórios são: consumo humano, irrigação, navegação, controle de cheias e geração de energia hidrelétrica.

3.1.1. Características gerais de reservatórios e lagos artificiais

Os reservatórios são sistemas considerados como uma transição entre rios e lagos, pois apresentam um regime hidrodinâmico intermediário entre os sistemas lóticos (rios) e os lânticos (lagos). São componentes diferenciados na paisagem e representam uma inserção nova no ponto de vista de ecossistema aquático, promovendo consideráveis alterações no regime hidrológico e na dinâmica ecológica de rios e bacias hidrográficas (HENRY, 1999).

A formação de reservatórios provoca alterações na área da bacia hidrográfica, onde se destacam: alterações no ciclo hidrológico e modificações no balanço hídrico, modificações na morfologia dos sistemas terrestres, movimentações do terreno, impactos sobre o microclima regional, impactos sobre os sistemas aquáticos e, impactos sobre a flora e fauna, terrestre e aquática (ESTEVEZ, 2011; STRAŠKRABA e TUNDISI, 2000).

Os sistemas lacustres são influenciados pelos sistemas terrestres que os circundam, podendo sofrer alterações guiadas por fatores e processos regionais específicos, como atividades antropogênicas. Em reservatórios, uma característica importante que influencia a qualidade

das águas é a tendência a apresentar instabilidade limnológica devido às suas características hidráulicas ou regras de operação, especialmente pelo tipo de tomada de água da barragem (ESTEVEVES, 2011).

3.1.2. Estratificação térmica, química e hidráulica

A estratificação, está relacionada ao processo de divisão em camadas de um fluido ao longo da direção vertical, em virtude de gradientes de densidade. Esses gradientes são desenvolvidos por meio de diferentes temperaturas no fluido e pelo grau de concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão (PORTO *et al.*, 1991).

Nos reservatórios, esse processo costuma estar associado ao balanço de calor entre a água armazenada e os tributários, absorção da radiação solar de acordo com a profundidade, a direção e força do vento e da precipitação e, direção e energia cinética das saídas de água. Os processos de estratificação e desestratificação são acompanhados por uma série de alterações físicas e químicas na água, como a distribuição vertical de nutrientes, modificação na distribuição dos organismos e recirculações de compostos do sedimento (ESTEVEVES, 2011; TUNDISI e MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Em lagos de regiões tropicais, o mais comum é a ocorrência de estratificação e desestratificação diária ou ainda estratificação durante o verão e desestratificação no inverno. Esses processos ocorrem devido, principalmente às baixas profundidades de lagos tropicais e a grande variação da temperatura ao longo do dia (ESTEVEVES, 2011).

Os processos físicos que ocorrem nos reservatórios são os mesmos em lagos quando relacionados a temperatura. Entretanto, nos reservatórios podem ocorrer processos adicionais como a estratificação hidráulica em função da profundidade da saída da água. A estratificação hidráulica ocorre em represas com grande profundidade, em que é necessário criar um gradiente vertical para geração de energia (TUNDISI e MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Segundo Tundisi e Matsumura Tundisi (2008), o fenômeno da estratificação térmica é essencial para a organização e o funcionamento dos ecossistemas lacustres, e a diferença de

temperatura ao longo da profundidade resulta na formação de três regiões distintas, como descrito abaixo e apresentado na Figura 1:

- Epilímnio – camada superficial de maior temperatura e menor densidade com maior abundância de oxigênio;
- Metalímnio – camada intermediária, considerada como zona de transição entre a camada superficial e a mais profunda, com concentração de oxigênio variável. Nessa camada a região em que a descontinuidade da temperatura é mais pronunciada é denominada termoclina;
- Hipolímnio – camada mais profunda, com menor temperatura e maior densidade, com ausência ou presença de baixa quantidade de oxigênio.

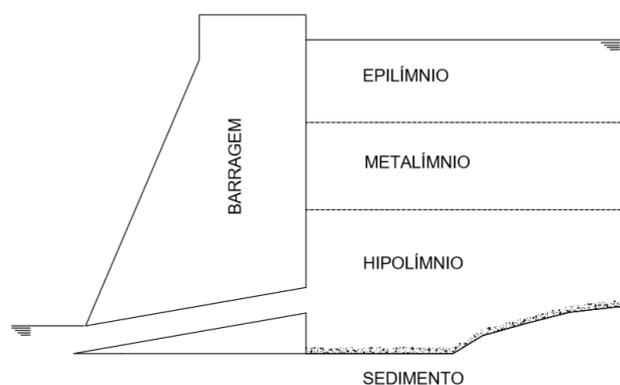


Figura 1 - Camadas de estratificação.
Fonte: Martin e McCutcheon (1999) – modificado.

A estratificação introduz no processo de análise da qualidade da água a compartimentalização do reservatório, visto que, ocorre uma redução considerável no transporte de massa na direção vertical entre as camadas geradas pela diferença de temperatura (PORTO *et al.*, 1991).

A presença de estratificação em lagos determina a ocorrência de gradientes verticais de concentração de nutrientes e oxigênio, determinantes nas atividades fotossintéticas e respiratórias. Durante o período de estratificação, a termoclina pode restringir a distribuição do oxigênio nas camadas mais profundas aumentando o déficit de oxigênio e podendo conduzir essas regiões à anóxia. Já o acúmulo de poluentes, substâncias tóxicas e materiais que anteriormente se encontravam em suspensão ocorre nas camadas mais profundas e no sedimento, de modo que, a movimentação (circulação) do hipolímnio pode aumentar a

dispersão desses compostos e acarretar em uma diminuição da qualidade da água (PORTO *et al.*, 1991).

3.2. VARIÁVEIS FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é considerada um indicador da existência de influências externas ou internas no metabolismo do sistema aquático, sendo resultado das interações de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Em vista da importância desses parâmetros, esse item abordará algumas das principais variáveis utilizadas na avaliação da qualidade da água em reservatórios.

3.2.1. Variáveis físicas e químicas

Vários mecanismos atuam na estrutura de lagos e reservatórios impulsionando os processos de organização vertical e horizontal. O estudo de parâmetros físicos é de grande importância para o conhecimento do ambiente e identificação dos padrões de variação das condições ambientais. Esses mecanismos, são constantemente influenciados por fatores hidrológicos e climatológicos, principalmente pela inter-relação entre atmosfera e a superfície do lago.

De forma geral, são os parâmetros químicos que caracterizam a qualidade da água e compõem os indicadores e índices utilizados para a determinação dos seus usos. Por meio desses parâmetros se pode caracterizar o grau de contaminação, a origem dos principais poluentes e seus efeitos no corpo hídrico. Nesse item serão abordados alguns parâmetros comumente utilizados nas análises de qualidade da água.

- Temperatura da água

A origem natural da temperatura em corpos hídricos ocorre por meio da transferência de calor por radiação, condução e convecção pela atmosfera e pelo solo. No entanto, também pode ocorrer por origem antrópica mediante lançamentos de águas de torres de resfriamento e despejos industriais. Esse parâmetro é um importante fator ecológico, pois determina os

tipos de organismos que habitam o local e influencia diretamente na química da água, por meio da relação entre temperatura e o teor de gases dissolvidos, além da influência na densidade (ESTEVES, 2011).

Em lagos, essa estrutura de variação de densidade com a temperatura é responsável por padrões de circulação bastante característicos, pois quando as diferenças de temperatura geram camadas d'água com diferentes densidades, forma-se uma barreira física que impede a mistura. Quando este fenômeno ocorre, o ecossistema aquático está estratificado termicamente.

- Radiação solar - zona eufótica

A zona eufótica é a porção iluminada da coluna d'água, podendo ser de apenas alguns centímetros ou de até metros, variando de acordo com a capacidade do corpo hídrico em minorar a radiação subaquática. Em lagos, o comportamento da absorção de luz se desenvolve com um decaimento exponencial, que varia de acordo com a turbidez e difere de lago para lago (ESTEVES, 2011).

Essa zona é caracterizada como a região em que ocorre a produção de oxigênio em sistemas aquáticos. Essa produção é feita por organismos fotossintetizantes capazes de sintetizar matéria orgânica por meio de gás carbônico, sais minerais e energia solar. A utilização desse parâmetro juntamente com os índices de fósforo e clorofila-a, é um excelente indicador do estado trófico dos corpos hídricos (ESTEVES, 2011).

- Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido – OD, é um dos gases mais importantes quando relacionado a análises biológicas, pois participa de várias reações químicas nos ecossistemas aquáticos. Na água, as principais fontes de oxigênio ocorrem por meio da inter-relação com a atmosfera e pela fotossíntese. Já as perdas ocorrem pelo seu consumo nos processos de respiração aeróbia e decomposição de matéria orgânica (ESTEVES, 2011).

A concentração de oxigênio ocorre de forma diferente em profundidades distintas, esse fator está relacionado com os processos de estratificação, desestratificação e a distribuição vertical de organismos. A solubilidade do oxigênio na água, está associada a temperatura e pressão, de modo que, a elevação da temperatura e diminuição da pressão, acarretam a redução da solubilidade do oxigênio na água. A figura 2, é apresentado o comportamento da concentração de oxigênio em diferentes profundidades em um ambiente estratificado.

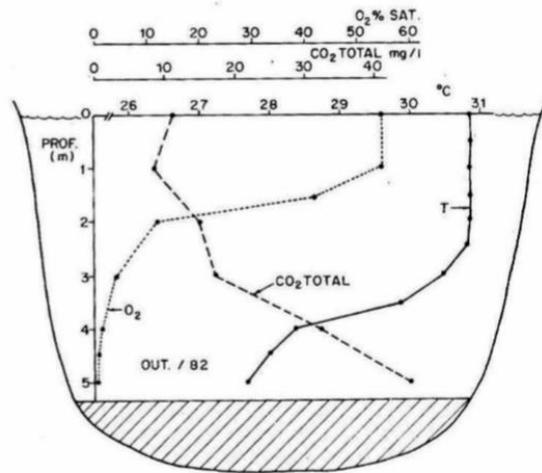


Figura 2 - Distribuição vertical do oxigênio e gás carbônico no lago Curuçá, Estado do Para.
Fonte: Esteves (1998).

- Potencial hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico - pH, representa a concentração de íons hidrogênio H⁺ na água, de modo a representar a predominância das condições ácidas ou alcalinas do ambiente aquático. A origem natural do pH ocorre por meio da dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese, as origens antropogênicas são despejos domésticos e despejos industriais. O pH influencia diretamente a fisiologia de diversas espécies, pois afeta os processos bioquímicos, principalmente as trocas iônicas com o meio extracelular, modificando os processos de absorção e excreção de substância orgânicas e iônicas (VON SPERLING, 2005).

- Nitrogênio

Segundo Esteves (2011), o nitrogênio é um macroelemento de importância fundamental para a vida dos organismos, pois é um dos principais componentes dos aminoácidos, elemento

básico da biomassa, e é considerado um dos mais importantes e limitantes nutrientes à vida dos organismos de água doce.

Dentre as principais fontes naturais de nitrogênio pode-se citar: a chuva, material orgânico e inorgânico de origem alóctone e a fixação de nitrogênio molecular dentro do próprio lago. O nitrogênio pode ser encontrado em ambientes aquáticos sob várias formas, como: nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amônia (NH_3), íon amônio (NH_4^+), óxido nitroso (N_2O), nitrogênio molecular (N_2), nitrogênio orgânico dissolvido e nitrogênio orgânico particulado. Dentre essas formas, o nitrato e o íon amônio representam as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários. O nitrogênio total, amplamente utilizado em análises de qualidade da água, representa a soma das frações de nitrato, nitrito, amônio e nitrogênio orgânico. (ESTEVEES, 2011).

- Fósforo

O fósforo é um elemento de extrema importância nos sistemas biológicos, pois participa de processos fundamentais no metabolismo dos seres vivos como, por exemplo: armazenamento de energia e a estruturação da membrana celular, sendo considerado em ambientes aquáticos continentais como um dos principais fatores limitantes de desenvolvimento biológico (ESTEVEES, 2011).

Segundo Esteves (2011), o fósforo presente na água tem origem natural na liberação a partir do intemperismo nos minerais primários da rocha, por meio de material particulado presente na atmosfera e o fosfato resultante da decomposição de organismos de origem alóctone. As fontes artificiais de fosfato mais expressivas são: esgotos domésticos, industriais e material particulado de origem industrial contido na atmosfera.

- Turbidez

A turbidez está relacionada com a medida da capacidade da água em dispersar a radiação solar devido a presença de partículas em suspensão, sendo que podem ou não apresentar cor própria. De modo geral, a turbidez é proveniente da carga de sólidos erodida na área de drenagem dos tributários do reservatório, bem como pela erosão laminar observada na bacia

hidrográfica como um todo. Nas águas naturais, a presença da turbidez provoca a redução de intensidade dos raios luminosos que penetram no corpo de água, influenciando nas características do ecossistema presente (BOLLMANN *et al*, 2005).

- Demanda Bioquímica de Oxigênio

A Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Esse parâmetro retrata a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar, por meio de processos biogeoquímicos, a matéria orgânica carbonácea, sendo assim, de fundamental importância na caracterização do grau de poluição de um corpo de água (VON SPERLING, 2005).

- Demanda Química de Oxigênio

A Demanda Química de Oxigênio – DQO, mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico. O valor obtido está relacionado com uma indicação indireta do teor de matéria orgânica presente na amostra. Ambos ensaios, DBO e DQO, fornecem indícios sobre a degradabilidade de despejos na água, no caso, a DBO mede apenas a fração biodegradável e a DQO a fração oxidada quimicamente (VON SPERLING, 2005).

- Carbono Orgânico

O carbono é um dos indicadores da concentração de matéria orgânica em águas naturais, pois em sua oxidação o oxigênio dissolvido na água é consumido e é utilizado em grandes quantidades pelos organismos fotossintetizantes, desse modo a sua quantificação está intimamente relacionado com a matéria orgânica existente nos corpos hídricos (ESTEVES, 2011).

3.2.2. Variáveis biológicas

O monitoramento das variáveis biológicas constitui uma ferramenta importante na avaliação da qualidade da água em reservatórios. Esses parâmetros são comumente utilizados na avaliação de impactos ambientais, pois animais, plantas, microrganismos e suas interações com o meio respondem de maneira diferenciada às modificações na paisagem.

- Fitoplâncton

O fitoplâncton é composto por um grupo diverso de organismos procariontes e eucariontes fotoautotróficos portadores de clorofila. A existência nesses organismos de diferentes tipos de clorofila e pigmentos permite que o aparato fotossintético absorva a luz no espectro visível compreendido entre 400nm e 700nm (TUNDISI e MATSUMURA TUNDISI, 2008).

A biomassa fitoplanctônica em reservatórios é influenciada por fatores físicos, químicos e biológicos, sujeitos à ação de forças produzidos pelo sistema, podendo ser de origem natural (vento, precipitação e influxo do rio) ou antropogênica (aporte de nutrientes e retirada da água decorrente dos múltiplos usos) (STRASKRABA e TUNDISI, 2000).

Fazem parte deste grupo as cianobactérias, de grande importância sanitária e de saúde pública. São microrganismos aeróbicos fotoautotróficos e algumas de suas espécies têm a capacidade de produzir metabólitos secundários que podem produzir toxinas (STRASKRABA e TUNDISI, 2000).

- Clorofila

Existem diferentes tipos de clorofila, nomeados de *a*, *b*, *c* e *d*, e diferem-se pela estrutura de sua molécula e sua capacidade de absorção de luz. A clorofila-a é o pigmento fotossintético mais importante nos organismos fitoplanctônicos. Este pigmento é essencial para a produção de oxigênio pela fotossíntese nesses organismos, logo, o conhecimento de sua concentração pode dar indicações da biomassa, da produtividade e estado fisiológico do fitoplâncton (TUNDISI e MATSUMURA TUNDISI, 2008).

- Macroinvertebrados bentônicos

Os macroinvertebrados bentônicos são amplamente utilizados em biomonitoramento por apresentarem características especiais, por moverem-se livremente ou permanecerem fixos ao substrato. Esses organismos, desempenham um papel importante no fluxo de energia e ciclagem de nutrientes, atuando como elo entre as cadeias alimentares de detritos e de herbivoria (BRANDIMARTE, 2004).

Nos reservatórios, a comunidade bentônica pode ser afetada pela concentração de matéria orgânica no sedimento, oxigênio dissolvido na água, flutuações no nível e velocidade das correntes próximas ao sedimento do fundo. As mudanças de nível e descargas intermitentes nos reservatórios pode afetar a fauna bentônica, diminuindo sua diversidade e biomassa (TUNDISI e MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Devido a necessidade de sintetizar informações acerca de parâmetros físicos, químicos e biológicos na avaliação da qualidade das águas, a aplicação de índices de qualidade tem se mostrado uma boa alternativa quando aplicada juntamente com programas de monitoramento. Esses índices são utilizados com intuito de informar o público não técnico acerca da qualidade dos corpos hídricos, além de orientar o planejamento da gestão da qualidade da água de forma simples e rápida.

3.3. ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS

Para a auxiliar na avaliação da qualidade das águas superficiais faz-se necessária a utilização de algum método, preferencialmente simples, para obter resultados rápidos e agir com eficácia na remediação. Logo, o uso de índices de qualidade de água é uma alternativa importante para os programas de monitoramento de águas superficiais, para acompanhar o possível avanço na degradação dos recursos hídricos ao longo da bacia hidrográfica, ou ao longo do tempo. Comumente, são utilizados indicadores físico-químicos da qualidade da água, estes consistem na avaliação de variáveis que se correlacionam com as alterações ocorridas nos corpos hídricos e região, sejam estas ações de origem antrópica ou natural (TOLEDO e NICOLELLA, 2002; DONADIO *et al.*, 2005).

No monitoramento da qualidade da água dos mananciais são utilizados índices que têm como proposta retratar, de forma numérica, a qualidade da água em pontos de interesse. Nesse aspecto, uma metodologia que pondera diversos parâmetros consiste na aplicação de índices de avaliação da qualidade da água, permitindo classificar os cursos d'água em classes ou níveis de qualidade, alguns índices comumente usados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices de Qualidade da Água para ambientes lênticos.

Índice	Parâmetros
IET _{Toledo} - Índice do Estado Trófico*	Fósforo Total, Transparência e Clorofila-a
IET _{Modificado} - Índice do Estado Trófico**	Fósforo Total e Clorofila-a
IQAR - Índice de Qualidade de Água em Reservatórios	Déficit de Oxigênio, Fósforo Total, Nitrogênio Inorgânico Total, Clorofila-a, transparência, DQO, Tempo de Residência, Profundidade Média e Cianobactérias (nº de células/ml)

*Toledo Jr (1983); ** Lamparelli (2004).

Fonte: ANA (2017); LAMPARELLI (2004) - Modificado.

A avaliação da qualidade da água obtida por meio de índices apresenta certa limitação já que poucos parâmetros são analisados, visto que, o intuito principal da análise é a obtenção de respostas rápidas e simplificadas. Para a aplicação de indicadores de qualidade da água em reservatórios de natureza física são utilizados, parâmetros como: cor, turbidez, temperatura, sabor e odor, e já para os de qualidade química estão relacionados: pH, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, DBO, DQO, entre outros. Os indicadores de qualidade biológica são geralmente as algas e a concentração de coliformes. A seguir serão descritas as características e formulações dos índices apresentados na Tabela 1.

- Índice do Estado Trófico – IET_{Toledo}

O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, isto significa avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento de nutrientes e seu respectivo efeito no processo de crescimento das algas e cianobactérias.

O índice a ser descrito foi proposto por CARLSON (1977) e modificado por TOLEDO Jr *et al* (1983), que através de método estatístico baseado em regressão linear, alterou as expressões originais para adequá-las a ambientes subtropicais utilizando dados de reservatórios do Estado de São Paulo. No caso de regiões tropicais, onde o metabolismo dos ecossistemas aquáticos apresenta comportamento diferente dos encontrados em ambientes

temperados, fez-se necessário adaptar os valores limites de qualidade para os nutrientes e clorofila, bem como as equações de correlação entre esses parâmetros que servem de base para os índices de estado trófico (CETESB, 2002). Os parâmetros utilizados na análise deste índice se encontram descritos na Tabela 1 e os respectivos limites dos estados tróficos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do Estado Trófico segundo o IET_{Toledo}.

IET - Toledo (1983)	
Índice	Classificação
$IET \leq 24$	Ultraoligotrófica
$24 < IET \leq 44$	Oligotrófica
$44 < IET \leq 54$	Mesotrófica
$54 < IET \leq 74$	Eutrófica
$IET > 74$	Hipereutrófica

Fonte: LAMPARELLI (2004) - Modificado.

O estado trófico é obtido por meio da resolução dos índices do estado trófico para a transparência - IET(S), para o fósforo - IET(P), e para a clorofila - IET(Chla), modificados por TOLEDO Jr *et al* (1983), sendo suas respectivas equações:

$$IET(S) = 10x \left[6 - \left(\frac{0,64 + \ln S}{\ln 2} \right) \right] \quad \text{Equação 1}$$

$$IET(PT) = 10x \left[6 - \left(\frac{80,32/PT}{\ln 2} \right) \right] \quad \text{Equação 2}$$

$$IET(Chla) = 10x \left[6 - \frac{2,04 - 0,695x(\ln Chla)}{\ln 2} \right] \quad \text{Equação 3}$$

$$IET_{Toledo} = \frac{IET_S + IET_{Chla} + 3(IET_{PT})}{5} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo,

IET_{Toledo} = Índice de Estado Trófico_{Toledo};

S = leitura da transparência da água pela profundidade do disco de Secchi (m);

PT = concentração de fósforo total na superfície;

$Chla$ = concentração de clorofila na superfície.

- Índice do Estado Trófico modificado - IET_{modificado}

O Índice do Estado trófico modificado difere do proposto por TOLEDO Jr *et al* (1983) devido a utilização de somente duas variáveis: clorofila-a e fósforo total, com justificativa

de que os valores de transparência muitas vezes não são representativos do grau de trofia de um corpo hídrico, pois, está pode ser afetada pela elevada turbidez decorrente de material mineral em suspensão e não apenas pela densidade de organismos planctônicos.

Dessa forma, o IET modificado segue a metodologia adotada pela CETESB (2002), resultado dos trabalhos feitos por LAMPARELLI (2004), para reservatórios. A classificação do estado trófico dos reservatórios ocorre conforme os limites apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo IET Modificado.

Critério	Estado Trófico	Fósforo Total (mg.m⁻¹)	Clorofila a (mg.m⁻³)
IET ≤ 47	Ultraoligotrófico	≤ 8	≤ 1,17
47 < IET ≤ 52	Oligotrófico	8-19	1,17-3,24
52 < IET ≤ 59	Mesotrófico	19-52	3,24-11,03
59 < IET ≤ 63	Eutrófico	52-120	11,03-30,55
63 < IET ≤ 67	Supereutrófico	120-233	30,55-69,05
IET > 67	Hipereutrófico	233 <	69,05 <

Fonte: CETESB, 2017 - Modificado.

O resultado para este índice, no caso de reservatórios, é obtido por meio do cálculo das fórmulas apresentadas abaixo:

$$IET_{Chla} = 10 \times \left(6 - \left(0,92 - 0,34 \times \left(\frac{\ln CL}{\ln 2} \right) \right) \right) \quad \text{Equação 5}$$

$$IET_{PT} = 10 \times \left(6 - \left(1,77 - 0,42 \times \left(\frac{\ln PT}{\ln 2} \right) \right) \right) \quad \text{Equação 6}$$

$$IET_{Modificado} = \left[\frac{IET_{PT} + IET_{CL}}{2} \right] \quad \text{Equação 7}$$

Sendo,

$IET_{Modificado}$ = Índice de Estado Trófico Modificado;

PT = concentração de fósforo total medida à superfície da água (mg.m⁻¹)

Chla=concentração de clorofila-a medida à superfície da água (mg.m⁻³)

- O Índice de Qualidade de Água em Reservatórios – IQAR

O índice foi criado pelo Instituto Ambiental do Paraná – IAP, com objetivo principal de analisar a degradação da qualidade da água em reservatórios. Para a realização do cálculo

do IQAR as variáveis relacionadas na Tabela 1 foram submetidas à análise estatística multivariada, com o propósito de classificar o seu nível de importância para caracterização da qualidade da água dos reservatórios estudados (IAP, 2004). Como resultado as variáveis receberam pesos distintos, em função de seus diferentes níveis de importância na avaliação da qualidade da água, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis selecionadas e seus respectivos pesos.

Variáveis	Pesos
Déficit de oxigênio dissolvido (%)*	17
Fósforo Total (PO ₂ -mg/L)**	12
Nitrogênio inorgânico total (N- mg/L)**	8
Clorofila a (µg/L)***	15
Profundidade Secchi (m)	12
DQO (O ₂ - mg/L)**	12
Cianobactérias (nº de células/ml)***	8
Tempo de residência (dias)	10
Profundidade média (m)	6

(*) média da coluna d'água; (**) média das profundidades I e II; (***) concentração da profundidade I.

Fonte: IAP (2004) – Modificado.

Com o objetivo de estabelecer diferentes classes para os reservatórios em relação ao grau de degradação da qualidade de suas águas, foi desenvolvida uma matriz contendo intervalos de classe dos parâmetros selecionados (Tabela 5). Para montagem desta matriz, foram considerados reservatórios com diferentes características tróficas, morfométricas e hidrológicas.

Tabela 5 - Matriz de qualidade da água proposta para o uso do IQAR.

Variáveis	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V	Classe VI
Déficit de oxigênio (%)	≤ 5	06-20	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	≤ 0,15	0,16-0,25	0,26-0,60	0,61-2,00	2,00-5,00	>5,00
Clorofila a	≤ 1,5	1,5-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	11,0-32,0	>32
Disco de Secchi (m)	≥ 3	03-2,3	2,2-1,2	1,1-0,6	0,5-0,3	<0,3
DQO (mg/L)	≤ 3	03-05	06-08	09-14	15-30	>30
Tempo de residência	≤ 10	11-40	41-120	121-365	366-550	>550
Profundidade média (m)	≥ 35	34-15	14-07	6-3,1	03-1,1	<01
Cianobactérias (nº de células/ml)*	≤ 5000	5001-10000	10001-20000	20001-50000	50001-100000	>100000

Fonte: IAP (2004) - Modificado.

As seis classes de qualidade de água estabelecida podem ser definidas como: Classe I - Não Impactado a Muito Pouco Degradado; Classe II - Pouco Degradado; Classe III -

Moderadamente Degradado; Classe IV - Criticamente Degradado a Poluído; Classe V - Muito Poluído e Classe VI - Extremamente Poluído.

A classe de qualidade de água a que cada reservatório pertence, é definida através do cálculo da fórmula apresentada abaixo.

$$IQAR = \frac{\sum(w_i \times q_i)}{\sum w_i} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo,

w_i = peso variável i;

q_i = classe de qualidade em relação a variável i (pode variar de 1 a 6).

Os dados coletados a cada campanha de monitoramento semestral são calculados e recebem um IQAR parcial. A média aritmética de dois ou mais índices parciais fornece o IQAR final e a classe na qual o reservatório se enquadra. Para os casos em que um reservatório possua mais do que uma estação de monitoramento o IQAR é calculado separadamente para cada estação e o reservatório poderá apresentar classes de qualidade de água distintas para cada compartimento monitorado. Segundo Cardoso (2011), quando não se dispõe da medida de um dos parâmetros é possível calcular o índice desconsiderando-a, assim como seu peso.

3.4. SENSORIAMENTO REMOTO

A tecnologia denominada sensoriamento remoto é formada por um conjunto de técnicas que permitem a obtenção de informações sobre alvos na superfície terrestre (objetos, áreas, fenômenos), por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, realizado por sensores distantes, ou remotos (NOVO, 2007).

Objetos encontrados na superfície terrestre, como vegetação e água, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com suas características biofísicas e químicas. Esses processos são variáveis e são definidos pelas características moleculares do objeto que recebe a radiação. As variações da energia refletida pelos objetos podem ser representadas por curvas e, graças a essas variações, é possível distinguir os objetos nas imagens de sensores remotos (ROSA, 2007).

Os sensores, em sua maioria, estão presentes em plataformas orbitais ou satélites, aviões e a nível de campo. No Brasil, o principal órgão atuante nesta área é o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e a aquisição de informações por meio do sensoriamento remoto pode ocorrer por diversas maneiras, como por exemplo: por espectrorradiômetro de campo, em laboratório, a nível de aeronave e orbital (PONZONI, 2002).

Conforme CONAB (2018), o princípio do funcionamento dessa tecnologia se dá pela decomposição da radiação eletromagnética pelos sensores dos satélites. O sensor armazena essa energia, que é composta em diversas faixas espectrais com larguras variáveis, sendo essas faixas denominadas bandas espectrais. Cada satélite apresenta diversos números de bandas espectrais, resolução espacial, temporal e radiométrica de acordo com o objetivo de sua construção.

O termo banda espectral faz referência a determinado intervalo de ondas eletromagnéticas que compreende alguma região do espectro, sendo que cada banda é definida de acordo com a resolução espectral de cada sistema sensor. Os melhores sistemas sensores são aqueles que operam cobrindo uma grande faixa do espectro eletromagnético, distribuindo os comprimentos de onda em diversas bandas espectrais.

O uso do sensoriamento remoto na gestão de reservatórios é baseado no fato de que consequências da eutrofização estão associadas com mudança nas propriedades ópticas da massa hídrica. Logo, o uso de sensoriamento remoto apresenta elevada potencialidade na identificação e representação espacial e temporal da qualidade das águas. Os resultados de monitoramento, usando sensoriamento remoto, podem mostrar a situação atual do ambiente aquático, que pode ser comparado com medições futuras e identificar possíveis problemas na superfície da água (RUDORF, 2006).

De acordo com Magalhães (2013), o processo de monitoramento e análise técnica em campo, apresenta custos elevados e se trata de um procedimento oneroso devido a demanda de tempo e as dificuldades de acessar determinados locais. O sensoriamento remoto apresenta-se como alternativa por ser uma ferramenta de menor custo financeiro e com maior acessibilidade para realização de levantamentos técnicos, mapeamentos e monitoramentos, podendo ser integrado aos dados convencionais.

Deste modo, o sensoriamento remoto pode favorecer o monitoramento de recursos hídricos devido a gama de parâmetros que podem ser analisados por sensoriamento, tais como: transparência (KLOIBER *et al.*, 2002), clorofila-a (CHEN *et al.*, 2011; KLOIBER *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2011), sólidos suspensos total (ARTIGAS *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2006), turbidez (WANG *et al.*, 2006), entre outros.

3.4.1. Monitoramento de qualidade da água utilizando sensoriamento remoto

Os dados de sensoriamento remoto podem ser empregados no estudo de vários alvos espectrais, como a vegetação, solo, rochas, agricultura e neste caso na água. Para a água limpa, a reflectância é baixa sendo maior na faixa do visível principalmente na faixa correspondente a cor azul, e sendo absorvida na medida que se avança em direção as faixas do infravermelho próximo, como apresentado na Figura 3 que faz referência as curvas espectrais de alguns alvos em relação a sua reflectância.

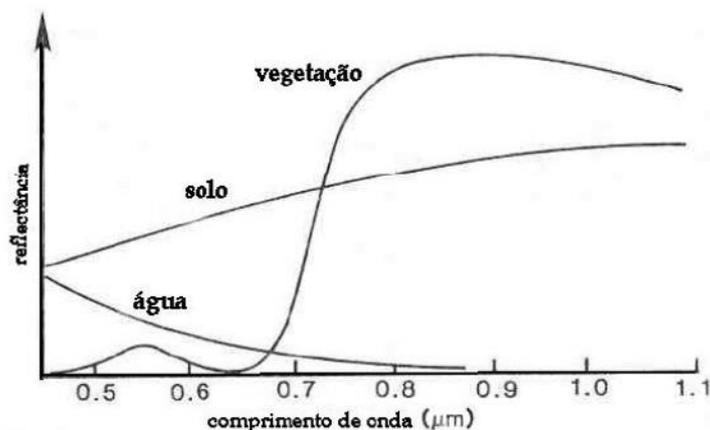


Figura 3 - Curvas de resposta espectral padrão da água, solo e vegetação.
Fonte: Erbert M. (2001)

A principal dificuldade encontrada no estudo do comportamento espectral da água é que, diferentemente de outro alvo em que se busca conhecer as propriedades dele mesmo, no caso da água, se busca conhecer os componentes que se encontram nela, sejam dissolvidos ou suspensos. Outro fator que pode ser considerado como dificuldade para a aplicação de sensoriamento remoto na averiguação da qualidade da água é a possível interferência de fatores climáticos, como nuvens, no momento em que o satélite realiza sua varredura, podendo interferir na visualização e análise da imagem (VILELA, 2010).

Nesse sentido, para a água limpa, as taxas de reflectância são baixas e aumentam com a presença de materiais dissolvidos e ou suspensos. De acordo com Moreira (2003), em seu estado líquido a água absorve a radiação eletromagnética em comprimentos de onda menores de 380µm e maiores que 700µm

Segundo Wachholz e Filho (2008), a água possui componentes opticamente ativos, principalmente no que se refere aos sólidos totais e à clorofila, influenciadores do espectro de reflectância. Esse aumento na reflectância se dá devido ao processo de espalhamento, principalmente da clorofila em comprimentos de onda da faixa do espectro visível correspondente à cor verde e, para o total de sólidos em suspensão, na faixa do vermelho.

3.4.2. Processamento digital de imagens

De acordo com Crósta (2002), pode ser dito que uma imagem é composta pelas informações obtidas no ato da varredura de um determinado sensor sobre uma determinada região, e que após esse processo de varredura, o registro das assinaturas espectrais dos objetos é processado em computadores e convertido ao que chamamos imagens, o nome do processamento realizado por computadores é nomeado de Processamento Digital de Imagens - PDI.

A principal função PDI é a de fornecer ferramentas com intuito de facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, esses sistemas são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, contendo informações específicas, extraídas e enfatizadas (SILVA, 2001).

A informação de interesse nas imagens é caracterizada em função das propriedades dos objetos ou padrões que a compõem. Portanto, extrair informação de imagens envolve o reconhecimento de objetos ou padrões, o propósito do processamento de imagens se baseia na remoção de empecilhos na visualização do analista de modo a facilitar a extração de informações (VILELA, 2010).

Nesse contexto, o processamento digital deve ser encarado como um estágio preparatório para a interpretação das imagens de sensoriamento remoto. Segundo CONAB (2018), o PDI é composto por diversas etapas, que podem ser sintetizadas em pré-processamento, realce, correção atmosférica, registro, restauração e classificação.

É importante salientar que não se pode prescindir de coletas amostrais com certa frequência, pois se faz necessária a existência de dados de monitoramento dos parâmetros de qualidade da água para a calibração e validação da ferramenta. O uso do sensoriamento remoto é considerado como uma alternativa auxiliar ao monitoramento, podendo identificar regiões que apresentam a necessidade de monitoramento limnológico.

3.5. HISTÓRICO DA CRISE HÍDRICA NO LAGO DESCOBERTO

No ano de 2016, o DF passou por uma das mais severas secas dos últimos anos, acarretando uma série de consequências para as atividades que fazem uso dos recursos hídricos, principalmente os maiores consumidores, abastecimento de água e a irrigação. Chuvas abaixo da média histórica, altas temperaturas, ocupação desordenada no solo, captações clandestinas, ausência de obras estruturantes, além do aumento populacional, que foi de 62.386 habitantes no DF entre os anos de 2015 e 2016 (IBGE, 2017), impactaram diretamente o principal reservatório de abastecimento de Brasília. Na Figura 4, nota-se a baixa na pluviometria, além da diminuição em 33% na vazão média afluyente (resultado das problemáticas citadas anteriormente) e aumento de 8% na vazão média captada durante os anos de 2010 e 2016 no reservatório do Descoberto, devido principalmente ao aumento populacional.

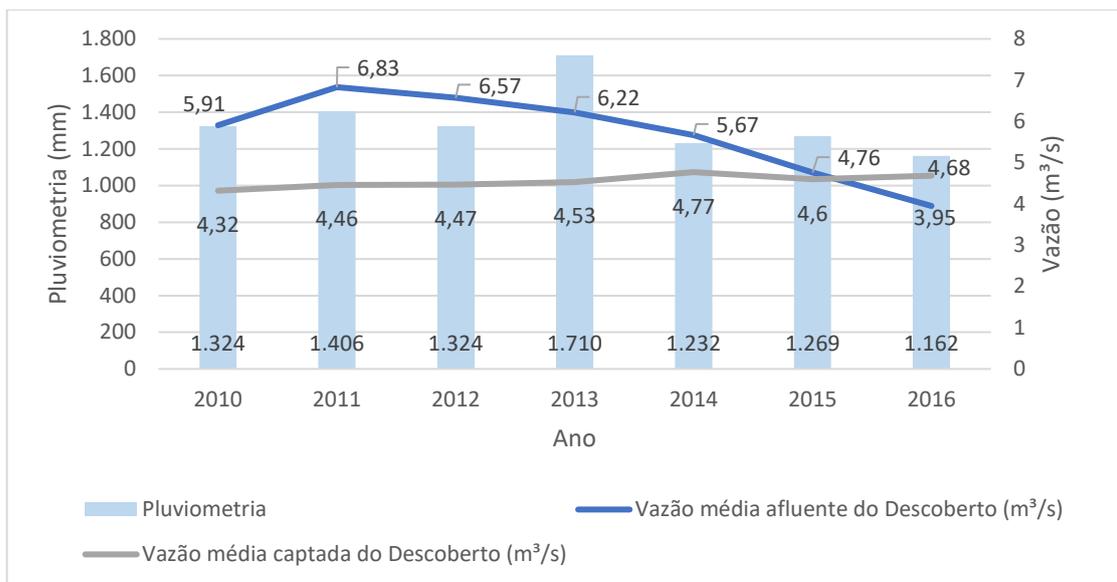


Figura 4 - Vazão média captada e afluente no reservatório do Descoberto.
 Fonte: ADASA (2017b) – modificado.

O período de estiagem teve início no mês de maio de 2016 e seus impactos puderam ser observados em diversas captações superficiais com alcance de vazões próximas às mínimas da série histórica e também por uma acentuada queda nas vazões dos tributários do reservatório do Descoberto (CAESB, 2017a). Em agosto deste mesmo ano, a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – ADASA, publicou a Resolução nº 13, que estabelece volumes de referência e ações de contenção em situações críticas de escassez hídrica nos reservatórios do Descoberto e Santa Maria, com intuito de assegurar os usos prioritários da água.

Segundo dados do SNIS, o valor do consumo médio per capita de água no DF nos anos de 2012, 2013 e 2014 foi de 186,4 litros e nesse mesmo período o valor para o Brasil foi de cerca de 165 litros, dados que demonstram o elevado consumo de água do DF, sendo um dos maiores consumidores de água do Brasil (SNIS, 2016).

A CAESB teve que tomar medidas mais efetivas com um plano de enfrentamento à crise. Em janeiro de 2017 começou o sistema de rodízio no fornecimento de água com a interrupção do abastecimento em 16 cidades atendidas pelo Sistema de captação do Descoberto, também foi reduzida a pressão da rede, assim como a realização de reparos, substituição de redes antigas e cobrança da tarifa de contingência sobre consumos superiores a 10 m³. Na Figura 5 é apresentado o volume total de água consumido no DF entre os anos

de 2013 e 2017. Nota-se a diminuição expressiva no consumo em 2017, resultado das medidas citadas anteriormente.

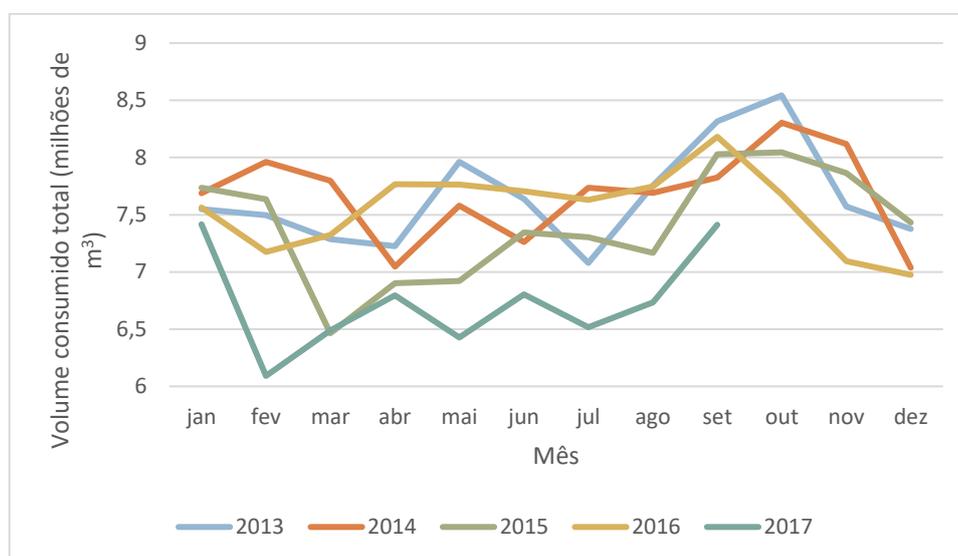


Figura 5 - Volume consumido total de água no Distrito Federal.
Fonte: ADASA (2017a) – modificado.

De acordo com Tundisi (2003), a água de boa qualidade é necessária para manter a sustentabilidade e a qualidade de vida de populações urbanas e rurais. A deterioração da qualidade dos mananciais e do suprimento de água é resultado do constante aumento no volume de água utilizado para vários fins e do aumento da poluição e da contaminação hídrica.

O DF é uma região sensível por ter longos períodos de seca, por estar situado em área com predominância de nascentes, por não possuir rios de grande volume e por ter rápido crescimento populacional. Para enfrentar a escassez da água, devem-se considerar tecnologias para a obtenção de água com qualidade compatível com os padrões de potabilidade, diminuição do desperdício e do consumo excessivo, técnicas de reuso e de conservação, proteção de mananciais e reservas superficiais e subterrâneas.

A profundidade do reservatório tem uma grande influência sobre a qualidade da água, assim como sua área superficial, pois afetam a intensidade da mistura da coluna d'água. A carga de nutrientes nos corpos hídricos em períodos de escassez favorece aumento da concentração desses nutrientes nos reservatórios, devido a diminuição do volume de água, favorecendo o processo de eutrofização e diminuição da qualidade da água. O tratamento da água bruta

comprometida, além de ser um processo mais oneroso, significa que, independentemente dos processos de tratamento, o resultado não será tão bom quanto o de um manancial preservado (STRASKRABA e TUNDISI, 2000). Na Figura 6 pode-se observar o comportamento do volume útil do reservatório do Descoberto.

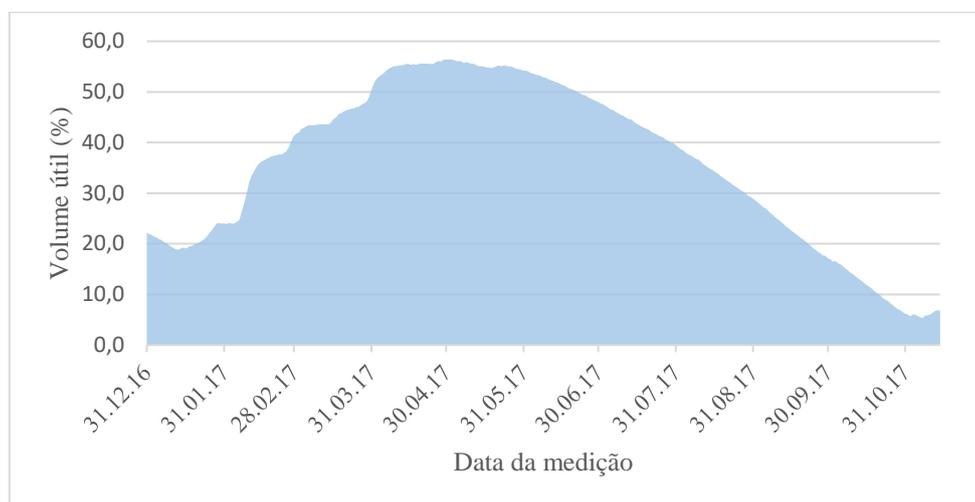


Figura 6 - Variação do volume útil do reservatório do Descoberto.
Fonte: ADASA (2017a) – modificado.

A diminuição no volume útil do reservatório traz à tona a discussão do uso da reserva técnica, que é a parte da reserva de água que fica localizada abaixo do ponto onde a tomada de água costuma ocorrer. Essa região possui água com qualidade inferior à encontrada na superfície por conta da baixa oxigenação, maior concentração de nutrientes e em alguns casos de poluentes.

Em 15 de junho de 2018 a política implementada de racionamento de água para o DF foi encerrada, a decisão foi baseada na recuperação do volume útil do reservatório, esse alcançou ainda em abril 90% do seu volume. Além disso, durante o período de racionamento foram observadas redução do consumo de água pela população de cerca 13%, e o aumento da rede de abastecimento do DF com a implementação de novas obras de captação, tais como a do Córrego Bananal e a do reservatório de Corumbá IV contribuíram para que a medida fosse encerrada (ADASA, 2017a).

Diante do exposto, torna-se necessária o entendimento da dinâmica do ambiente aquático do reservatório do Descoberto, a metodologia seguida no presente estudo é apresentada a seguir.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa e cumprimento dos objetivos propostos a metodologia descrita a seguir foi desenvolvida.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesse item são apresentadas as informações específicas do lago Descoberto e região, assim como sua importância em relação ao DF. Fazem parte da caracterização da área de estudo sua localização geográfica, características naturais e as atividades realizadas na área, bem como as formas de utilização dos recursos hídricos na região.

4.1.1. Área de estudo

O DF está situado no Planalto Central do Brasil, com uma área aproximada de 5.814 km², limitado a norte pelo paralelo 15°30'S, a sul pelo paralelo 16°03', a leste pelo rio Preto e a oeste pelo rio Descoberto (MARTINS, 2004). O posicionamento geográfico do DF, juntamente com sua altitude, faz com que a região se torne um dos divisores naturais de águas de 3 das principais bacias hidrográficas do Brasil: a bacia do Paraná, a bacia do São Francisco e a bacia do Tocantins (CARMO, 2001). As observações citadas estão apresentadas na Figura 7.



Figura 7 - Localização da bacia do rio Descoberto.
Fonte: Comitê de bacias hidrográficas do Rio Paranoá (2009).

A bacia do Descoberto está inserida na bacia do Paraná, possui uma área de 895,9 km², o que representa aproximadamente 15,4 % da área total do DF. Os principais rios dessa bacia são: o rio Descoberto e o rio Melchior (RIBEIRO, 2001). A barragem do rio Descoberto foi concluída em novembro de 1973 e teve como principal propulsor para sua construção a alteração das perspectivas acerca do abastecimento de água que, na época, era realizado apenas pelos sistemas do Torto e de Santa Maria (CAESB e CNEC, 1985).

O rio Descoberto, que dá origem ao reservatório, é represado após ter recebido sete afluentes que nascem no DF e um afluente que nasce no estado de Goiás. Nesse mesmo braço do reservatório formado pelo rio Descoberto, ocorre também a contribuição das bacias dos córregos Chapadinha e Olaria, pela margem esquerda. O córrego Chapadinha recebe as contribuições das áreas de drenagem dos córregos Pulador e Capãozinho (CAESB e CNEC, 1985).

O lago Descoberto, resultado do barramento do rio Descoberto, está situado entre o estado de Goiás e o Distrito Federal (Figura 8) e possui a capacidade de manter um volume de acumulação de 102×10^6 m³ com uma área inundada de até 14,8 km². O vertedor não controlado da barragem tem soleira na cota de 1.028 m e, quando não há vertimento na barragem, a adufa permite a liberação, na época da seca, de uma vazão em torno de 750 L/s (BARNEZ, 2004).

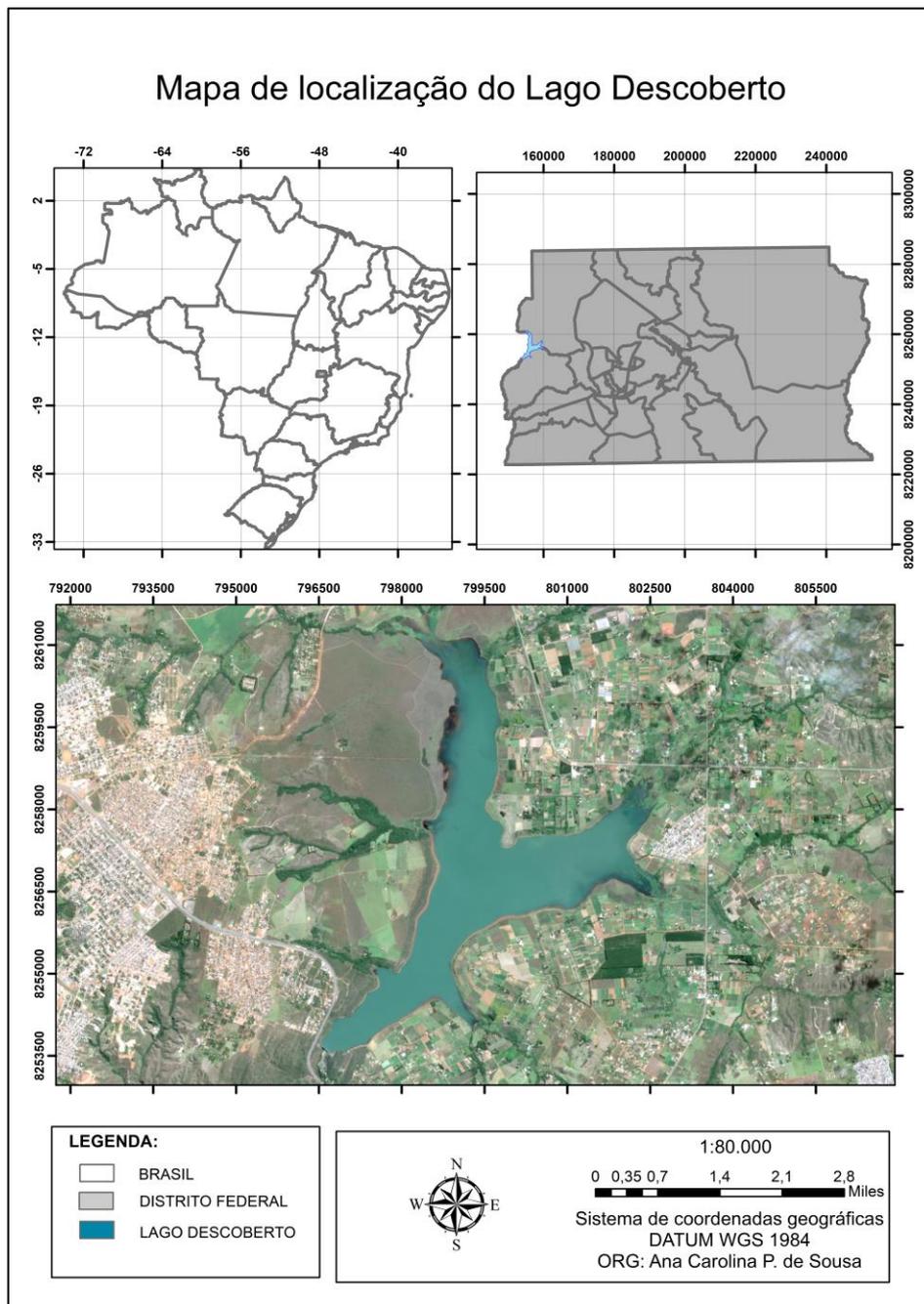


Figura 8 - Detalhe da localização do lago Descoberto.
Fonte de dados: IBGE (2010).

O lago Descoberto é o principal reservatório de abastecimento público de água do DF, fornecendo aproximadamente 60% da água e suprindo várias regiões administrativas do Distrito Federal. Outros usos da água na região, além do abastecimento público, são: diluição de efluentes de esgoto sanitário, lançamento de águas pluviais e atividades agropecuárias (MMA e IBAMA, 1998).

4.1.2. Área de proteção ambiental - APA

Por meio do decreto 88.940/83 do Governo Federal foi criada a Área de Proteção Ambiental, do Descoberto e conforme o Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC, a APA é definida como:

Uma área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais (SNUC - Lei 9.985/2000).

Um dos pontos que diferencia a APA das demais unidades de conservação ambiental é que é permitido que as terras permaneçam sob o domínio dos proprietários, ainda que submetidas a restrições de uso do solo e dos recursos naturais, de acordo com os planos de manejo elaborados para atender aos objetivos de proteção, promovendo, até certo ponto, convivência harmônica do ser humano e seus sistemas produtivos (CÔRTE, 1997). A Figura 9, representa a localização da APA do Descoberto e os locais dos pontos de coleta utilizados para análise da qualidade da água realizados pela CAESB.

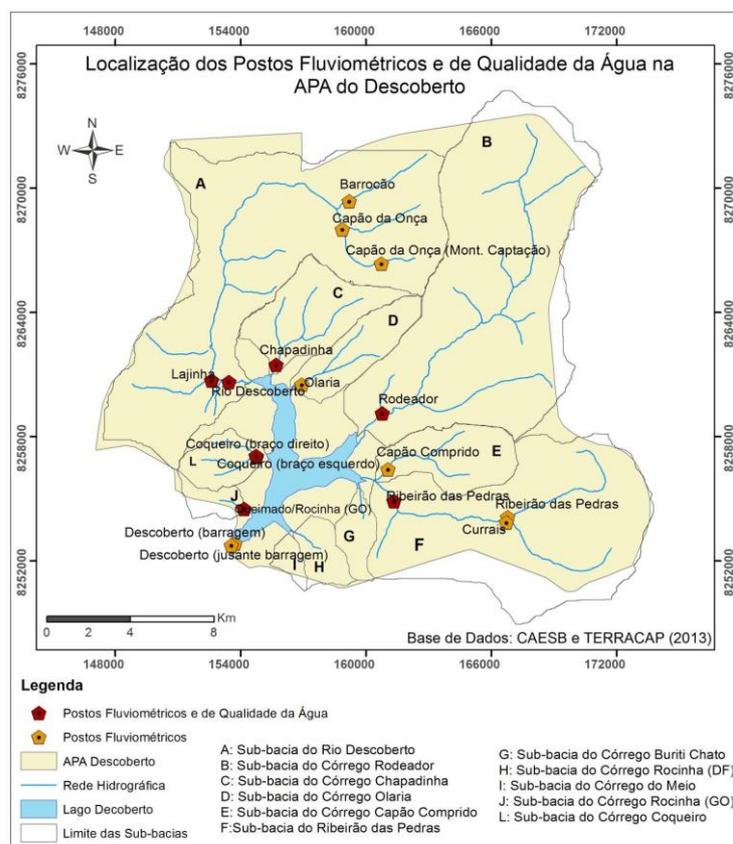


Figura 9 - Localização da APA do Descoberto e dos postos fluviométricos e de qualidade da água. Fonte: ICMBio (2014).

A APA do Descoberto está inserida nas regiões administrativas de Taguatinga, Brazlândia e Ceilândia, além do município de Águas Lindas de Goiás, abrangendo as bacias dos rios São Bartolomeu e Descoberto. No referido decreto, foram determinadas providências a serem tomadas para garantir a integridade e proteção da APA. Dentre essas medidas, destacam-se:

- Zoneamento: indicando em cada zona as atividades que deverão ser encorajadas ou incentivadas, bem como as que deverão ser limitadas, restringidas ou proibidas;
- Uso de instrumentos legais e de incentivos financeiros governamentais, para assegurar o uso racional do solo e outros aspectos referentes à salvaguarda dos recursos ambientais;
- Implementação pela CAESB de sistemas de coleta e tratamento de esgoto de núcleos urbanos abrangidos e assim reconhecidos pelo Plano Urbanístico do Distrito Federal - PDOT e sua destinação final compatível com as exigências das APAs, não comprometendo a qualidade da água dos reservatórios que já estão construídos ou os que serão;
- Controle da poluição hídrica, objetivando manter a boa qualidade da água;
- Inclusão de uma faixa verde em torno do Lago onde somente atividades de florestamento e reflorestamento, com intuito de proteção e conservação de mananciais, poderão ser permitidas.

4.1.3. Considerações gerais acerca do clima, uso do solo e da água

A seguir, são apresentados, de modo geral, os aspectos climáticos e de uso do solo e da água, que possuem maior relevância para o presente estudo.

- Clima

O clima na região do DF é caracterizado pela existência de duas épocas bem definidas: A época seca, que corresponde também ao período frio, compreendido entre os meses de maio e setembro e pújante em junho e julho, que corresponde a um índice de precipitação que pode ser nulo e apresentando temperaturas médias que podem variar de 16 a 18 °C; e a época chuvosa, que coincide com período quente do ano, prolonga-se de outubro a abril, sendo que

geralmente a maior concentração de chuva é alcançada no mês de dezembro, período que ocorre cerca de 80% do total anual de chuvas (PINTO, 1985; CAMPOS, 2004).

- Uso do solo

De acordo com o Plano de Gestão Ambiental realizado pelo Ministério do Meio Ambiente e o Instituto Brasileiro do meio Ambiente (MMA e IBAMA, 1998), a APA do Descoberto é uma região considerada de grande valor ecológico e abriga ecossistemas representativos do bioma cerrado e além disso se trata de uma região com importantes nascentes, cujas águas fluem para o lago Descoberto e posteriormente são drenadas para o rio Corumbá, da bacia do Paraná (FALCOMER, 2001).

A bacia do lago do Descoberto, além de ser uma área utilizada para abastecimento de água, é empregada para produção de hortifrutigranjeiros devido à criação do Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão - PICAG, que foi implantado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, na década de 1960, com intuito de absorver os agricultores que não foram fixados como mão de obra na construção civil e também pela necessidade de implementação de um cinturão verde nas proximidades das cidades satélites (SILVA, 2013).

Como descrito por Koide (2006), o solo próximo à nascente do rio Descoberto, à altura do córrego do Capão da Onça, é utilizado para atividades rurais (Chácaras do PICAG), além do reflorestamento com Pinus e Eucaliptos, os impactos gerados por essas atividades não resultam comprovadamente em impactos expressivos no meio ambiente. Entretanto, a montante do lago Descoberto nota-se a existência de loteamentos rurais destinados à agricultura intensiva, desenvolvimento de suinocultura e criações de gado, além da ocupação por agricultura familiar principalmente no cultivo de hortifrutigranjeiros.

À jusante da barragem do Descoberto, as atividades antrópicas que possuem maior expressão são as ocupações urbanas e as atividades industriais. Na altura do córrego Taguatinga, encontra-se a região mais populosa e povoada do DF: as cidades satélites de Ceilândia e Taguatinga e, mais adiante no curso da água, a cidade de Samambaia.

- Uso da água

Segundo o relatório da qualidade da água elaborado pela CAESB (2017b), o abastecimento de água do DF é efetuado atualmente por cinco subsistemas produtores com capacidade total para fornecer até 9441 L/s abastecendo 99,06% da população.

O subsistema produtor do Descoberto possui captações em quatro pontos: Descoberto, Crispim I e II, Engenho das Lajes e mananciais subterrâneos. O subsistema é responsável por abastecer as seguintes localidades: Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Água Quente, Riacho Fundo, CAUB, Riacho Fundo II, Recanto das Emas, Resid. Palmeiras, Águas Claras, Arniqueira, Santa Maria, Engenho das Lajes, Núcleo Bandeirante, Park Way, Candangolândia, Gama, Sítio do Gama, Novo Gama, Guará, Vicente Pires, reforço no abastecimento de Brasília, Lago Sul, Jardim Botânico, Cruzeiro, Estrutural, Cidade do Automóvel, Sudoeste/Octogonal e SIA. Tornando-se o maior sistema de abastecimento de água da CAESB e atendendo cerca de 60% da população do DF.

4.1.4. Índice de qualidade da água utilizado no reservatório do Descoberto

A CAESB, responsável pelo monitoramento das captações no DF, realiza o monitoramento dos reservatórios e caracteriza a qualidade da água “in natura” dos mananciais utilizando o Índice de Qualidade da Água – IQA para água bruta. Esse índice possibilita uma avaliação simples e sistemática das atuais condições bacteriológicas e físico-químicas de um corpo hídrico destinado ao abastecimento para consumo humano.

Segundo a CAESB (2017b), no ano de 2016 o valor do IQA do Descoberto foi de 69,2 e segundo o Relatório da Qualidade da Água Distribuída pela CAESB, em 2015 o valor foi de 74 (CAESB, 2016), em uma escala que varia de 0 a 100, na qual quanto mais alto o valor, melhor é a qualidade da água analisada. Esses dados demonstram uma diminuição acentuada da qualidade das águas do reservatório nesse período. Em modos gerais, a diminuição do valor do IQA representa o aumento da poluição do corpo hídrico e dentre os principais fatores causadores dessa diminuição, pode-se citar os impactos negativos gerados por atividades antrópicas, como: o desmatamento, ocupação irregular, lançamento de esgotos e substâncias tóxicas em áreas inapropriadas, entre outras.

4.2. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para o monitoramento dos parâmetros a serem utilizados na avaliação da qualidade da água do manancial, foram escolhidas 3 estações de amostragem representativas do lago Descoberto. Os locais escolhidos estão representados na Figura 10, de modo que, a Estação 1 se encontra nas proximidades da barragem (ponto de captação da Estação de Tratamento de Águas - ETA), a Estação 2 anterior ao Braço do Rodeador e do Rio das Pedras e a Estação 3 no Braço Descoberto. A descrição das estações de amostragem se encontra na Tabela 6.

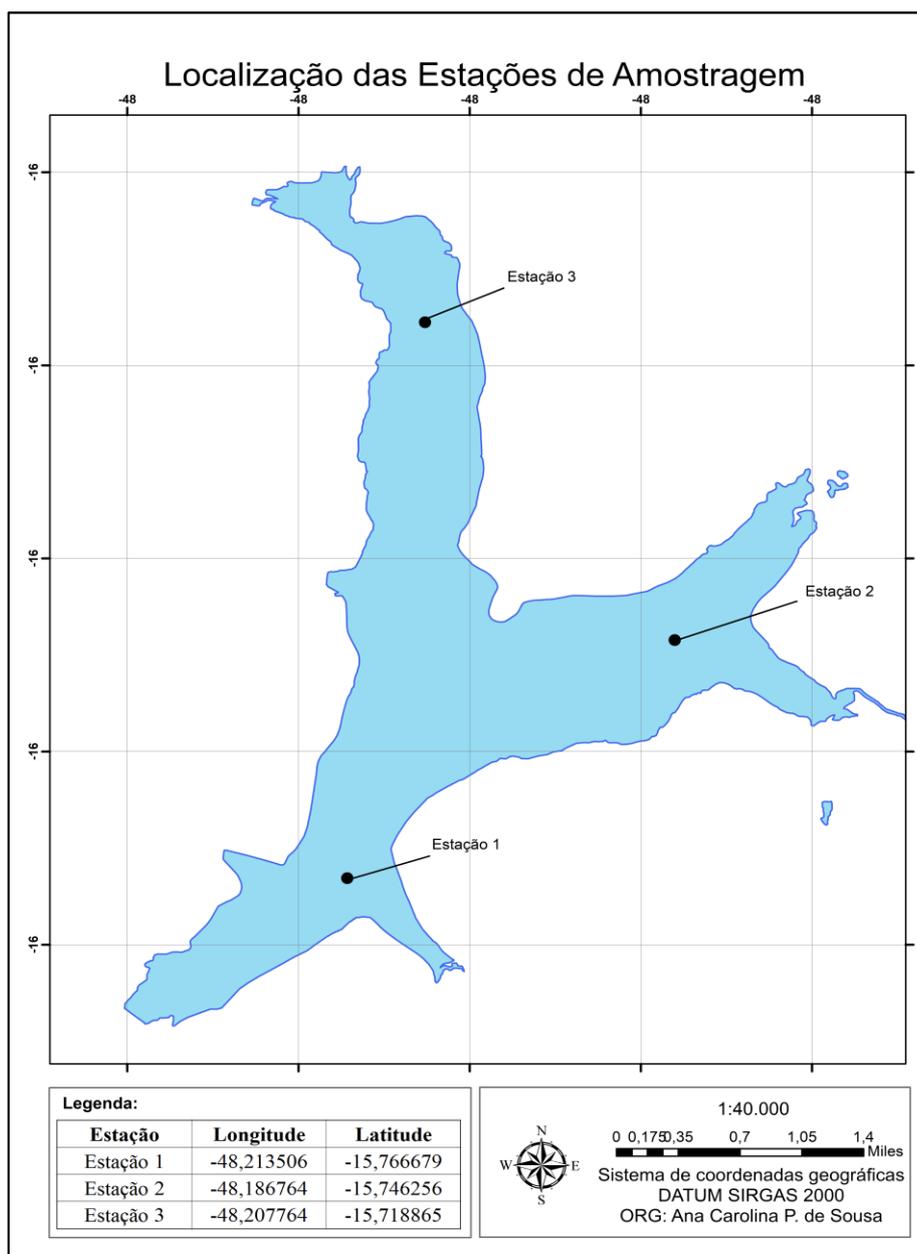


Figura 10 - Localização das estações de amostragem no Lago Descoberto.

Fonte de Dados: IBGE (2010).

Tabela 6 - Descrição das estações de amostragem.

Estação de amostragem	Descrição
1	Nas proximidades do barramento, na captação da ETA, caracterizando a região mais profunda do reservatório.
2	Ponto confluyente entre o Braço Rodeador e o do Rio das Pedras, avaliando a influência dos tributários para a região.
3	Ponto no Braço Descoberto, avaliando a influência dos tributários para a região.

Além de representarem regiões com influência de diferentes tributários e características limnológicas distintas, a motivação para escolha dessas estações foi baseada também na disponibilidade de outros estudos que utilizaram esses pontos para monitoramento, a fim de se obter um acompanhamento da qualidade das águas com o avanço do tempo.

4.2.1. Coletas

O monitoramento das estações de amostragem selecionadas ocorreu com frequência mensal, nos meses de abril e maio de 2018. As datas das coletas estão apresentadas na Tabela 7, em cada estação foram coletadas amostras em diferentes profundidades (superfície, profundidade de extinção do disco de Secchi, final da zona eufótica, e a um metro do fundo).

Tabela 7 - Informações acerca das coletas.

Data da Coleta	Condição do Tempo	Observações
19 de abril de 2018	Predomínio de Sol	Sem observações
24 de maio de 2018	Parcialmente Nublado / Nublado	A coleta foi realizada na Estação 1 no período da manhã e nas Estações 2 e 3 no período da tarde devido aos ventos fortes

Para a realização das coletas, foi utilizada a estrutura operacional da CAESB, embarcações e arrais, e os outros equipamentos necessários foram disponibilizados pelo Laboratório de Saneamento Ambiental – LSA (ENC/FT/UnB) e pelo Laboratório de Limnologia, do Departamento de Ecologia do Instituto de Biologia, da Universidade de Brasília.

4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE

4.3.1. Análise laboratorial

As análises dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da primeira coleta foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental – LSA, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB e as análises referentes à segunda coleta foram realizadas no Laboratório de Limnologia, do Departamento de Ecologia, do Instituto de Biologia da UnB.

- Determinação dos parâmetros físicos e químicos

Para o monitoramento da qualidade da água foram analisados os seguintes parâmetros físicos e químicos: nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$), fósforo total (PO_4^{3-}), além de pH, oxigênio dissolvido, condutividade, temperatura e turbidez. As metodologias e as respectivas referências que foram utilizadas estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Relação dos parâmetros físicos e químicos para o monitoramento e seus respectivos métodos e análises.

Análise	Método - 1ª Coleta	Referência	Método - 2ª Coleta
Fósforo Total	Pré-digestão/Colorimétrico	APHA 4500	Cromatografia líquida
Nitrogênio amoniacal	Colorimétrico/iodofenol	APHA 4500	Cromatografia líquida
Nitrato	Colorimétrico/salicílico	APHA 4500	Cromatografia líquida
pH*	Sonda multipamétrica	APHA 4500	Sonda multipamétrica
Condutividade elétrica*	Sonda multipamétrica	APHA 4500	Sonda multipamétrica
Turbidez*	Sonda multipamétrica	APHA 4500	Sonda multipamétrica
Temperatura da água*	Sonda multipamétrica	APHA 4500	Sonda multipamétrica
Oxigênio dissolvido*	Sonda multipamétrica	APHA 4500	Sonda multipamétrica

**in loco*

Os processos de preservação, transporte e análise das amostras seguiram a metodologia proposta pelo “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

- Determinação do parâmetro biológico

O parâmetro biológico determinado nas estações foi a análise quantitativa da clorofila-a. Para a análise de clorofila-a, foi utilizado o método espectrofotométrico com extração por

etanol 90% descrito no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

4.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA ENTRE OS MESES AMOSTRADOS

Por meio dos dados de monitoramento obtidos durante essa pesquisa optou-se por identificar possíveis alterações na qualidade da água entre os meses de abril e maio por meio da aplicação do Índice de Qualidade da Água em Reservatórios – IQAR (IAP, 2004). A formulação para o cálculo do índice, como apresentado no item 3.3. Índices de qualidade da água de reservatórios, é apresentada a seguir na Equação 8.

Inicialmente com os dados obtidos pelo monitoramento foi construído o banco de dados a ser utilizado, levando em consideração os parâmetros: oxigênio dissolvido, fósforo total, nitrato, nitrogênio amoniacal, clorofila-a, profundidade de extinção do disco de Secchi, profundidade média e o tempo de residência aproximado considerando o valor de 2016 (calculado por meio vazão média afluyente apresentada na Figura 4).

Para o cálculo do índice foi necessário o valor em porcentagem do déficit de oxigênio médio na coluna d’água, esse parâmetro foi obtido por meio da variação entre a concentração de oxigênio dissolvido e o valor da concentração de oxigênio de saturação na temperatura da água do reservatório.

O IQAR utiliza os valores de nitrogênio inorgânico em seu cálculo, para esse estudo esse parâmetro foi considerado como o resultado da soma entre as frações nitrato e nitrogênio amoniacal, uma vez que não foram determinadas as concentrações de nitrito. Devido ao fato das suas concentrações serem normalmente desprezíveis nos ambientes aquáticos, acredita-se que não haveria grande variação no resultado.

Assim como proposto pelo IAP (2004), o valor de clorofila-a deve representar a concentração presente na camada superficial da água e, para os valores de nitrogênio inorgânico e fósforo total a concentração deve ser referente as duas primeiras profundidades, superficial e zona eufótica.

Segundo Cardoso (2011), quando não se dispõe da medida de um dos parâmetros é possível calcular o índice desconsiderando-o, bem como seu peso. Para essa pesquisa, não foram utilizados no cálculo do índice os valores de DQO e a concentração de cianobactérias devido ao monitoramento realizado não ter abrangido esses parâmetros.

4.5. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTADO TRÓFICO

O objetivo da aplicação dos índices de estado trófico foi identificar diferenças no grau de trofia do reservatório para os anos amostrados e identificar qual índice é mais representativo para o ambiente. Por meio dos resultados obtidos os dois índices foram comparados temporalmente a fim de detectar diferenças expressivas nas classificações.

Por meio dos dados limnológicos monitorados pela CAESB no reservatório do Descoberto no período de 2004 a 2016, foi avaliada a classificação de índices de estado trófico, mediante a aplicação dos dados disponibilizados nos índices selecionados, com exceção do ano de 2014, no qual não foram disponibilizados os dados referentes a profundidade de extinção do disco de Secchi e por isso o IET_{Toledo} não pode ser calculado. Os dados monitorados pela CAESB fazem referência somente a Estação 1, com sua localização apresentada na Figura 10.

As formulações para o cálculo do IET_{Toledo} , como apresentado no item 3.3. Índices de qualidade da água de reservatórios, foram as Equações 1, 2, 3 e 4. E para o cálculo do $IET_{\text{Modificado}}$, as equações utilizadas foram a 5, 6 e 7.

Para o IET_{Toledo} foram utilizados os dados referentes aos parâmetros: clorofila-a, profundidade de extinção do disco de Secchi e a concentração de fósforo total. O resultado mensal foi obtido por meio da resolução dos índices para os três parâmetros analisados e posteriormente foi realizada média ponderada desses valores, sendo que o IET correspondente ao fósforo possui peso 3. A partir desses dados, foram calculados os valores do IET anual por meio da média aritmética simples dos respectivos valores de IET mensais.

Já para o $IET_{\text{modificado}}$ foram utilizados os dados referentes aos parâmetros: clorofila-a e a concentração de fósforo total. O resultado mensal foi obtido por meio da resolução dos

índices de estado trófico para os dois parâmetros analisados e posteriormente foi realizada média desses valores. Com esses dados, foram calculados os valores do IET anual por meio da média aritmética simples dos respectivos valores de IET mensais.

A aplicação dos índices de estado trófico não foi realizada para os dados monitorados por essa pesquisa, devido ao monitoramento da concentração de clorofila-a, parâmetro necessário para o cálculo, ter ocorrido somente no mês de maio e para duas estações, não possuindo continuidade necessária para tomada de conclusões.

Ainda sobre a aplicação dos dois índices foi realizada a avaliação do grau de limitação da produtividade do fitoplâncton por meio da comparação das classificações obtidas entre o IET(Chla) e o IET(PT). Segundo Lamparelli (2004), quando esses dois índices classificam os ambientes na mesma classe trófica, o grau de limitação é normal. Caso a classificação através do IET(PT) classifique o ambiente em classe superior à obtida através das concentrações de IET(Chla), indicando que há algum fator limitante que reduz a produtividade das algas, o grau de limitação elevado. Quando as concentrações de clorofila-a resultam em uma classificação superior à obtida pelo IET(PT), o grau de limitação é baixo, existindo condições favoráveis para a produtividade primária, considerando os nutrientes disponíveis.

4.6. GEOPROCESSAMENTO

Este trabalho utilizou dados de campo obtidos pelo monitoramento das três estações de amostragens estabelecidas anteriormente nos meses de abril e maio. Em cada uma das estações foram examinadas três variáveis, sendo elas: transparência da água, turbidez e clorofila-a. Com esses dados foi feita a relação dos dados coletados em campo com os dados de sensoriamento remoto obtidos nas imagens do satélite Sentinel-2 (COPERNICUS, 2018). Essas variáveis de qualidade da água foram selecionadas por apresentarem alterações na coloração da água, podendo ser identificáveis em sensoriamento remoto.

A metodologia adotada para a realização do presente estudo foi realizada conforme a metodologia proposta por Vilela (2010).

4.6.1. Satélite Sentinel-2

O sensor Sentinel-2 faz parte da missão da European Space Agency – ESA, desenvolvido no quadro do programa da União Europeia Copernicus, foi lançado no dia 23 de junho de 2015 e atualmente está em operação. Os dados adquiridos, a cobertura da missão e a alta frequência de visitas, possibilitam a geração de geoinformação em escalas locais, regionais, nacionais e internacionais (SEGL *et al.*, 2015).

Atualmente, há disponibilidade de imagens multiespectrais ópticas gratuitas de sensoriamento remoto orbital de média resolução espacial. Nesse contexto, é possível destacar o sensor MSI/Sentinel-2 que apresenta potencial de aplicação em questões ambientais, incluindo análise da qualidade da água.

Para este trabalho foram utilizadas imagens do sensor MSI/Sentinel-2 dos meses de abril e maio de 2018. A imagem do sensor é disponibilizada pela ESA no endereço eletrônico: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Para a manipulação e processamento digital dessas imagens, foi utilizado o software ArcGis 10.4, a descrição do sensor MSI/Sentinel-2 com as respectivas bandas do espectro óptico são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Descrições do MSI/Sentinel-2.

Nº da banda	Nome da banda	Comprimento de onda central (nm)	Resolução espacial (m)
B01	Aerossol	443	60
B02	Azul	490	10
B03	Visível verde	560	10
B04	Visível vermelho	665	10
B05	Vermelho	705	20
B06	Vermelho	740	20
B07	Vermelho	783	20
B08	Infravermelho próximo	842	10
B08A	Vermelho	865	20
B09	Vapor de água	945	60
B10	Cirrus	1375	60
B11	Infravermelho médio	1610	20
B12	Infravermelho médio	2190	20

Fonte: ESA (2018).

4.6.2. Processamento digital de imagens

No sentido de buscar uma correlação com as coletas de campo, as imagens utilizadas foram escolhidas pela maior proximidade com a data em que as coletas ocorreram, deste modo, para a coleta ocorrida no dia 19 de abril a imagem correspondente foi a de 23 de abril e, para a coleta de 24 de maio, a imagem foi de 23 de maio.

As imagens foram adquiridas por banda espectral, sendo 13 bandas por imagem, podendo ser combinadas ou analisadas individualmente. Para a análise dos parâmetros estabelecidos nesse estudo foram utilizadas as bandas: 2, 3 e 4. A banda 2, corresponde à faixa espectral da cor azul, sendo utilizada para a análise da transparência da água. A banda 3, corresponde à cor verde, foi utilizada para analisar a concentração de clorofila-a. A banda 4, corresponde à cor vermelha, foi utilizada para analisar a turbidez presente no reservatório. Dessa forma, após a aquisição destas faixas espectrais, iniciou-se a fase de processamento.

O início do PDI consistiu na padronização das projeções. Foi utilizada a projeção Universal Transverse de Mercator - UTM, e o Datum foi o WGS84. Em todas as bandas foi extraída apenas a área do reservatório objeto de estudo, um procedimento importante para a realização de processos de classificação e ajuste de contraste na área de interesse. As coordenadas UTM coletadas em campo foram transferidas para as imagens por meio do aplicativo computacional ArcGis 10.4, localizando as estações de amostragem. Assim, cada estação de amostragem corresponde a um pixel da imagem.

Para cada estação de amostragem, em todas as bandas, foram aferidos os valores de nível de cinza de cada pixel. Nesse contexto, cada intensidade de cinza é valorada como um índice numérico, sendo que cada imagem do Sentinel-2 possui 16 bits correspondendo a 65536 níveis diferentes.

Visando à diminuição de erros de precisão, foram extraídos os valores para níveis de cinza nos 8 pixels vizinhos as estações de amostragem (Figura 11). Esse procedimento teve o objetivo de evitar a concentração de informações, relacionadas aos níveis de cinza, em uma única célula, fator que poderia levar a concentrações muito discrepantes dos parâmetros de qualidade analisados entre células vizinhas. Além disto, as datas de coletas de amostras em

campo e da varredura realizada pelo satélite não são coincidentes. Por isso, a concentração de informações, sobre o parâmetro, em um único pixel pode ser prejudicial por não considerar a possível dispersão.

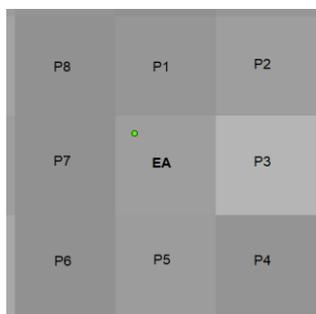


Figura 11 - Padrão utilizada para aferição do nível de cinza nas células vizinhas a Estação de amostragem - EA.

Nesse sentido, cada pixel corresponde a uma área de 10 m² e para os valores de níveis de cinza extraídos desses 9 pixels, optou-se por retirar a média aritmética, obtendo um único valor que foi usado na correlação com os parâmetros de qualidade da água analisados.

Com os resultados obtidos estabeleceu-se uma escala de classificação de imagens que foi utilizada para monitorar alterações na transparência da água, presença de clorofila e turbidez no reservatório. Para realizar a classificação, Vilela (2010) criou conjuntos de valores de níveis de cinza, no entanto, em seu trabalho foram utilizadas imagens do satélite Landsat. O Landsat possui 256 níveis de cinza, enquanto as imagens do Sentinel-2 possuem 65536 níveis. Nesse sentido, foi realizada correlação entre os intervalos de Vilela (2010) e os dessa pesquisa, a forma utilizada foi a aplicação de regra de três, a fim de obter intervalos com significância semelhante. A escala para este estudo possui os seguintes intervalos: 0 a 12800; 12801 a 26112; 26113 a 39424; 39425 a 52480 e 52481 a 65536 englobando todos os valores possíveis para níveis de cinza das imagens.

Para cada um dos parâmetros a serem analisados, obteve-se a correspondência de umas das 3 bandas espectrais localizadas na região do visível do sensor Sentinel-2, assim, foi desenvolvida uma escala de absorção de radiação eletromagnética em níveis de cinza que representa um significado diferente para cada banda analisada. Com base na escala de absorção proposta por Vilela (2010) para o satélite Landsat, a escala de absorção de Radiação

Eletromagnética – REM, foi composta por 5 graduações que variam de acordo com os valores de níveis de cinza, como demonstrado na Figura 12.

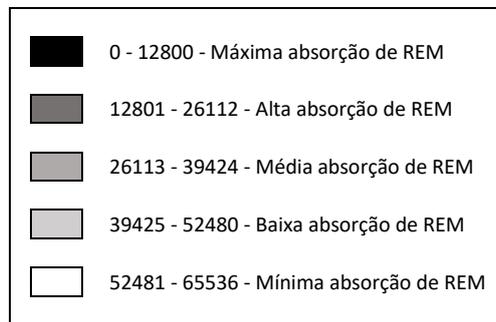


Figura 12 - Níveis de cinza e escala de absorção de Radiação Eletromagnética.

A utilização dessa classificação permite que partindo de uma análise de diversas imagens do mesmo reservatório, em curto espaço de tempo, seja possível identificar alterações na qualidade da água e pontuar os locais mais críticos que colaboram para processos de eutrofização e aumento da turbidez.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ESTUDADOS NAS DIFERENTES PROFUNDIDADES DA COLUNA D'ÁGUA

Os resultados do monitoramento realizado no reservatório do Descoberto compreendem os meses de abril e maio de 2018 para as três estações de amostragem (Figura 10). No intuito de caracterizar o ambiente estudado, primeiramente, são apresentados os resultados das três estações de amostragem, considerando separadamente os parâmetros. Como não foram obtidos dados suficientes para a determinação do tipo de distribuição de frequência que melhor representasse o comportamento das variáveis, não foi possível efetuar as transformações necessárias para a normalização de dados assimétricos.

Analisando a Figura 13, referente a variação da temperatura da água em função da profundidade para as três estações de amostragem no mês de abril, observa-se que as maiores variações dos valores de temperatura ocorreram nas camadas mais profundas da água, demonstrando que à medida que a profundidade avança ocorre uma diminuição proporcional dos valores da temperatura.

Conforme apresentado na Figura 13, embora existam diferenças entre as temperaturas da água entre as estações, não foram observadas grandes variações entre as estações e tampouco entre as profundidades no período. Pode-se observar que a maior variabilidade entre a temperatura da superfície e do fundo do lago foi de 0,5°C na Estação 2, não configurando ocorrência de estratificação térmica no período amostrado.

O perfil térmico das estações 2 e 3 para o mês analisado é muito semelhante. A menor profundidade dessas estações pode favorecer a maior influência dos ventos, chuvas e mesmo insolação diária, levando ao aquecimento da massa de água, o que explicaria a maior homogeneidade do perfil térmico nesses pontos. Devido ao pequeno intervalo amostral analisado não é possível comprovar a influência dos fatores climáticos no comportamento térmico das estações de estudo. Na estação 1, mesmo apresentando maior profundidade, apresentou comportamento similar as outras estações.

A variação do perfil de temperatura para as três estações analisadas não foi observada e de forma geral, os valores amostrais foram próximos quando comparados as diferentes profundidades para as diferentes estações, demonstrando que no período analisado o corpo hídrico não apresentava estratificação térmica.

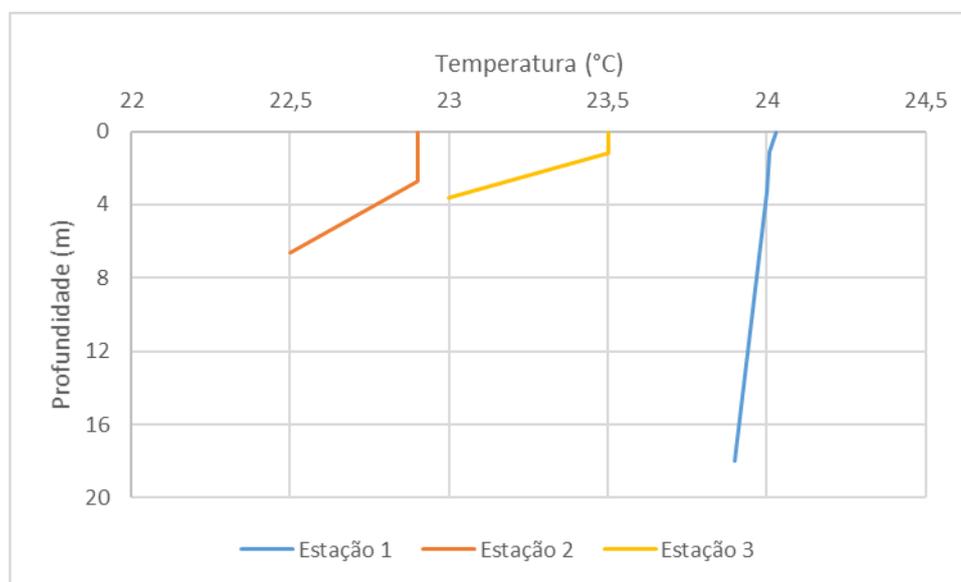


Figura 13 - Perfil térmico das Estações 1,2 e 3 na coleta referente ao mês de abril, no reservatório Descoberto/DF.

A Figura 14, ilustra o perfil térmico da água para as três estações de amostragem em relação ao mês de maio. Observa-se que ocorre diminuição mais acentuada dos valores da temperatura com o aumento da profundidade. A variação da temperatura entre a superfície e o fundo do Lago foi maior, alcançando seu maior valor de 3,7°C para a Estação 3, podendo ser considerada uma região estratificada termicamente. Por outro lado, as Estações 1 e 2 variaram em, 1°C e 0,5°C, respectivamente.

As amostras de água referentes a Estação 1 foram coletadas no período da manhã e as coletas referentes as Estações 2 e 3 foram realizadas durante a tarde. Mesmo com a coleta tendo ocorrido em períodos do dia distintos a variação do perfil de temperatura para as estações 1 e 2 não foi expressiva, apresentando intervalo similar de temperaturas no perfil d'água.

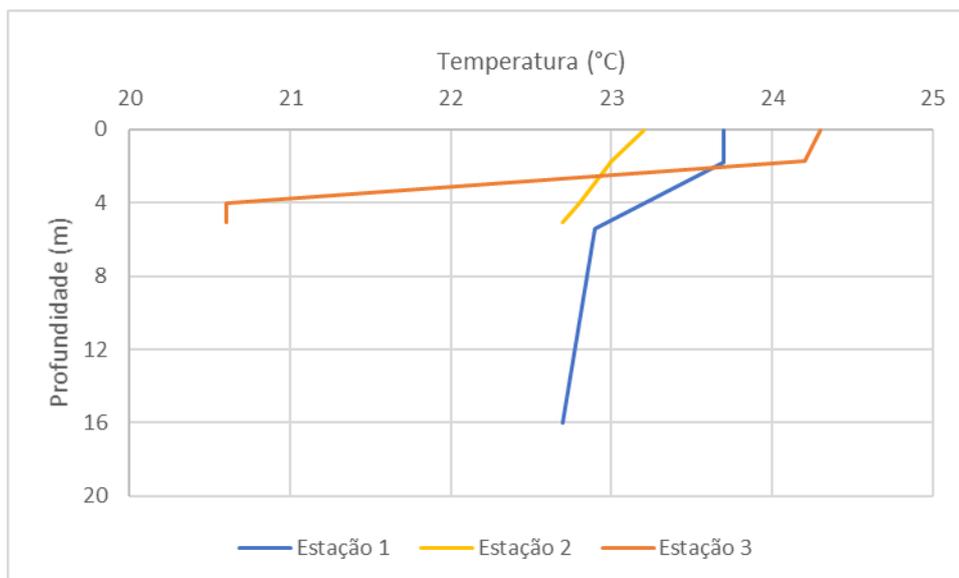


Figura 14 - Perfil térmico das Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de maio, no reservatório Descoberto/DF.

Na Figura 15 são ilustrados os valores correspondentes ao gradiente de concentração de oxigênio dissolvido. Para o mês de abril a coluna d'água apresentou OD distribuído da superfície até o fundo.

Na zona eufótica a atividade fotossintética ocorre de forma mais intensa, favorecendo uma maior produção de oxigênio, enquanto na zona afótica, devido à decomposição microbiana da matéria orgânica, ocorre consumo. A variação da concentração de OD entre a superfície e o fundo não foi expressiva para as estações. A maior variação ocorreu na Estação 1, com cerca de 1,6 mg/L de diferença entre as camadas.

As três estações monitoradas apresentaram perfil de concentração de OD com comportamento similar, sem apresentar variações bruscas de concentração e intervalo amostral similar.

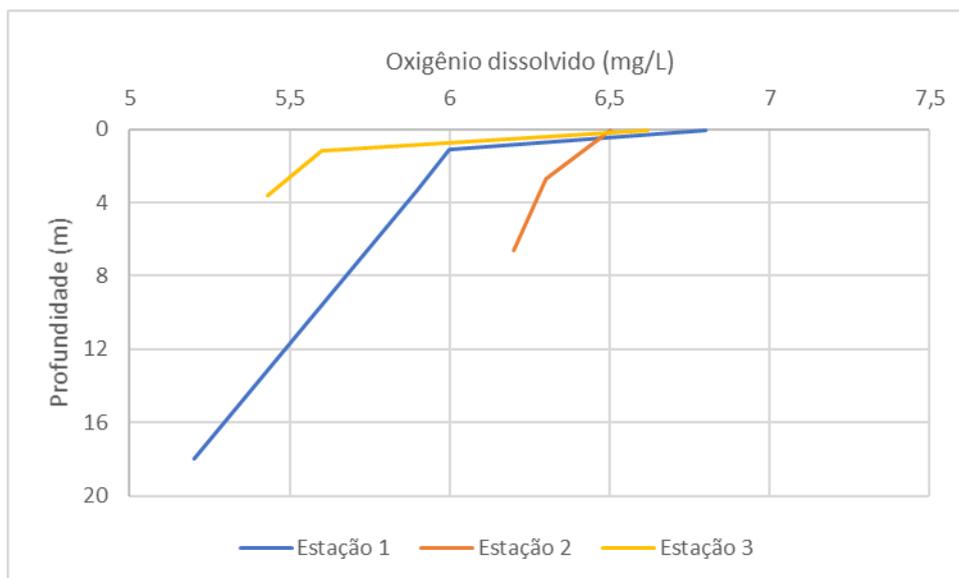


Figura 15 - Perfil de oxigênio dissolvido das Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de abril, no reservatório Descoberto/DF.

A Figura 16, ilustra a variação da concentração de OD na coluna d'água para o mês de maio nas três estações monitoradas. Assim como para o mês anterior, observa-se que a coluna d'água apresentou OD distribuído da superfície até o fundo.

Para o mês de maio a Estação 3, localizada no braço do Descoberto, apresentou as concentrações de OD mais baixas do monitoramento, com 4,5 mg/L ainda na superfície. Contudo, as demais estações apresentaram decaimento similar na concentração de oxigênio.

De forma geral, o comportamento do perfil de oxigênio dissolvido na água no período monitorado não apresentou variações repentinas entre as profundidades em nenhuma das estações amostradas. Esse comportamento demonstra que no período amostrado o perfil de OD se encontrava homogêneo, distribuído da superfície até o fundo, não apresentando regiões em situação de anóxia.

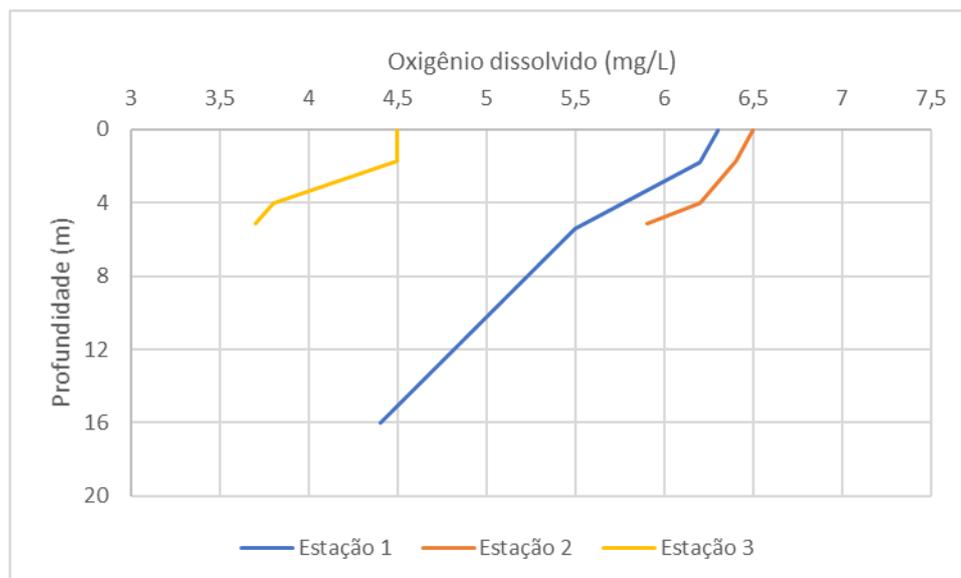


Figura 16 - Perfil de oxigênio dissolvido da Estações 1, 2 e 3 na coleta referente ao mês de maio, no reservatório Descoberto/DF.

Os dados obtidos no monitoramento dos demais parâmetros estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 de modo que, cada tabela contém os dados de cada uma das estações monitoradas nos meses de abril e maio.

Tabela 10 - Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 1.

Profundidades	Datas	Parâmetros monitorados						
		Cond. (µS/cm)	pH	Turb. (uT)	PO ₄ -3 (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Chla (µg/L)
(0,05m)	Abril/2018	27	7,88	5,5	0,093	0,064	0,010	NC
	Maiο/2018	21,5	6	3,6	0,161	0,000	0,018	0,00022
(1,1m)	Abril/2018	27	8,02	5,6	0,079	0,063	0,020	NC
	Maiο/2018	22,6	6,5	3,4	0,192	0,000	0,023	NC
(3,3m)	Abril/2018	27	8,1	5,7	0,081	0,073	0,010	NC
	Maiο/2018	21,4	6	3,4	0,168	0,005	0,016	NC
(18m)	Abril/2018	27	8,07	7,2	0,077	0,065	0,015	NC
	Maiο/2018	22,3	6	4,1	0,249	0,000	0,000	NC

NC - Dado não coletado

Tabela 11 - Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 2.

Profundidades	Datas	Parâmetros monitorados						
		Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Turb. (uT)	PO ₄ -3 (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Chla ($\mu\text{g}/\text{L}$)
(0,05m)	Abril/2018	26	8,4	5,9	0,085	0,060	0,015	NC
(0,05m)	Maiο/2018	22,6	6,5	4,09	0,179	0,000	0,013	NC
(2,7m)	Abril/2018	26	8,2	5,8	0,126	0,053	0,015	NC
(1,7m)	Maiο/2018	23,2	6,5	4,02	0,131	0,000	0,076	NC
(6,6m)	Abril/2018	NC	NC	NC	0,446	0,041	0,010	NC
(4,0m)	Maiο/2018	23,3	6,5	4,9	0,154	0,000	0,020	NC
(9,6m)	Abril/2018	NC	NC	NC	0,128	0,049	0,015	NC
(5,1m)	Maiο/2018	23,4	6,5	5,7	0,130	0,000	0,014	NC

NC - Dado não coletado

Tabela 12 Apresentação dos dados de monitoramento obtidos nos meses de abril e maio para a Estação 3.

Profundidades	Datas	Parâmetros monitorados						
		Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Turb. (uT)	PO ₄ -3 (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Chla ($\mu\text{g}/\text{L}$)
(0,05m)	Abril/2018	27	8,49	5,9	0,129	0,050	0,020	NC
(0,05m)	Maiο/2018	24,3	6,4	6,9	0,284	0,000	0,043	0,00
(1,2m)	Abril/2018	NC	8,4	5,6	0,064	0,049	0,010	NC
(1,7m)	Maiο/2018	25,4	6,6	3,3	0,254	0,000	0,000	NC
(3,6m)	Abril/2018	NC	8,22	14,7	0,108	0,041	0,020	NC
(4,0m)	Maiο/2018	20,8	6,6	7,6	0,158	0,000	0,000	NC
(4,6m)	Abril/2018	NC	NC	NC	0,114	0,066	0,015	NC
(5,1m)	Maiο/2018	20,7	6,5	6,7	0,150	0,000	0,016	NC

NC - Dado não coletado

Os maiores valores referentes a condutividade foram obtidos no mês de abril, em muitas profundidades não foi possível realizar a medição, não obtendo dados suficientes para realizar uma discussão. As demais medidas da condutividade elétrica não apresentaram diferenças expressivas entre as profundidades. As estações apresentaram intervalo amostral similar.

Observa-se que na profundidade de extinção do disco de Secchi e na zona eufótica existe um leve aumento da condutividade. Segundo Markewitz *et al.* (2006), devido à associação da alta taxa de intemperismo com os baixos teores nutrientes encontrados nos solos do Cerrado, geralmente seus corpos d'água apresentam baixa concentração de íons, como encontrado no reservatório do Descoberto.

Os valores de pH foram menores para as análises realizadas no mês de maio em todas as profundidades. Ao analisar os valores de pH, observa-se um pH de neutro a levemente alcalino (pH: 6 - 8,5) em todas as profundidades. Apesar da pequena faixa de variação observada, o pH medido nas camadas mais profundas da coluna d'água, principalmente a 1 metro do fundo, foi menor do que o das profundidades mais superficiais nos dois períodos. Esse resultado é esperado, uma vez que a atividade fotossintética na zona eufótica consome gás carbônico, bicarbonatos e carbonatos, acarretando a elevação do pH, enquanto no fundo a decomposição da matéria orgânica, assim como a respiração, geram gás carbônico e ácidos orgânicos causando a diminuição do pH (SAWYER *et al.*, 1994).

Analisando os resultados acerca da concentração do nitrato e do nitrogênio amoniacal, não foram observadas variações expressivas na concentração desses compostos quando comparadas com as profundidades em cada período ou mesmo quando comparadas com concentrações medidas entre os dois períodos.

Da mesma forma, as concentrações de fósforo total não apresentaram diferenças entre as profundidades. Segundo Von Sperling (2005), as fontes naturais de fósforo na água são resultado da dissolução de compostos do solo, da decomposição de matéria orgânica e o fósforo proveniente da decomposição celular de microrganismos, devido aos demais resultados é possível inferir que as concentrações de fósforo encontradas no reservatório são resultado de fontes naturais.

A turbidez é causada pela presença de materiais sólidos em suspensão. A origem desses materiais pode ser diversa, desde o solo, mineração, indústrias, esgoto doméstico lançado no manancial, entre outros. Após as chuvas, as águas dos mananciais ficam turvas, principalmente ao carreamento dos sedimentos das margens, fazendo com que ocorra o aumento da turbidez. Uma consequência da turbidez é a diminuição da penetração da luz na

água e, com isso, há interferência na atividade fotossintética realizadas pelos organismos fitoplanctônicos.

Analisando-se a turbidez na coluna d'água, observa-se que os valores apresentaram pouca variação. Os valores da turbidez não apresentaram uma correlação clara com o aumento da profundidade, variando entre valores mais baixos e mais altos entre as profundidades amostradas. No entanto, a pouca variação no intervalo dos valores pode ser justificada devido às coletas terem ocorrido no período de seca, o que contribui para baixos valores de turbidez, além do fato das profundidades do reservatório serem baixas, tornando o processo de sedimentação mais rápido.

O monitoramento de clorofila-a no reservatório ocorreu somente para o mês de maio nas Estações 1 e 3. Os resultados para concentração foram realizados com acidificação, pois esses desconsideram o pigmento em processo de degradação no momento da coleta e análise. Os valores encontrados no mês de maio para as Estações 1 e 3 não tiveram variações para concentração de clorofila, detectando baixas concentrações, com valores nulos ou bem próximos de zero.

5.2. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MESES AMOSTRADOS

Para realizar análise comparativa entre as estações monitoradas durante os meses de abril e maio, foram aplicados os dados necessários para o cálculo do Índice de Qualidade da Água em Reservatórios - IQAR, com o objetivo de estabelecer classes para o reservatório em relação ao grau de degradação da qualidade de suas águas (IAP, 2004). Para esse caso, o reservatório possui mais de uma estação de monitoramento, devido a isso o IQAR foi calculado separadamente para cada estação e o reservatório.

Segundo Cardoso (2011), quando não se dispõe da medida de um dos parâmetros é possível calcular o índice desconsiderando-o, bem como seu peso. Para o cálculo do IQAR foram utilizados os parâmetros: déficit de oxigênio, fósforo total, nitrogênio inorgânico total, clorofila-a, transparência, tempo de residência e profundidade média. A Tabela 13 apresenta os valores do IQAR obtidos bem como os resultados dos parâmetros monitorados.

Tabela 13 - Qualificação da qualidade da água do reservatório do Descoberto segundo o IQAR proposto pelo IAP (2004).

Estação	Datas	IQAR	
		Valor	Qualificação
Estação 1	abr/18	2,723	Moderadamente degradado
	mai/18	2,400	Moderadamente degradado
Estação 2	abr/18	2,723	Moderadamente degradado
	mai/18	2,723	Moderadamente degradado
Estação 3	abr/18	2,723	Moderadamente degradado
	mai/18	2,975	Moderadamente degradado

Para o cálculo do IQAR utilizando todos os parâmetros relacionados pelo IAP (2004), a qualificação como moderadamente degradado representa corpos de água com qualidade de água podendo ser considerada como regular/aceitável que apresentam: um déficit considerável de oxigênio dissolvido na coluna de água (podendo ocorrer anóxia próximo ao fundo), médio aporte de nutrientes e matéria orgânica, grande variedade e/ou densidade de algas, tendência moderada a eutrofização e tempo de residência das águas considerável.

Para as três estações nos dois meses monitorados os dados demonstram uma leve tendência de degradação na qualidade da água do reservatório do Descoberto, no entanto, é importante salientar que os parâmetros DQO e concentração de cianobactérias não foram considerados no cálculo devido ao monitoramento não ter sido realizado para esses parâmetros, esse fator pode alterar o real enquadramento do reservatório no período analisado.

O parâmetro mais influente para a qualificação de todos os pontos como moderadamente degradado foi principalmente o aporte de fósforo. Esse parâmetro foi classificado como classe 5 em todo o monitoramento, com exceção da Estação 3 no mês de maio que apresentou classificação 6 (as classes descritas são apresentadas na Tabela 5). Os resultados referentes ao fósforo devem ser compreendidos como uma medida do potencial de eutrofização, pois esse nutriente atua como agente causador do processo.

Segundo IAP (2004), o enquadramento nessa classe significa que o reservatório se encontra dentro dos limites considerados aceitáveis para ser utilizado como manancial de abastecimento.

5.3. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE ESTADO TRÓFICO

Os índices são utilizados para fornecer uma visão geral da qualidade da água, pois integram os resultados de diversas variáveis através de um único indicador. Nesse sentido, os dados de monitoramento levantados pela CAESB, entre os anos de 2004 e 2016, no reservatório do Descoberto, mais especificamente na Estação de amostragem 1, foram utilizados para avaliar o grau de trofia do reservatório quando levado em consideração diferentes parâmetros limnológicos por meio da aplicação de dois índices $IET_{\text{modificado}}$ e IET_{Toledo} . O comportamento do reservatório em relação aos dois índices analisados é apresentado na Figura 17.

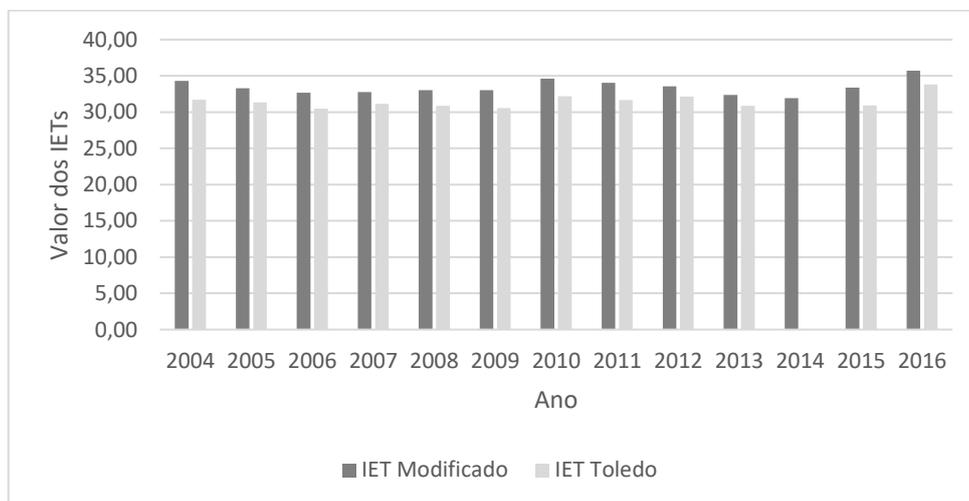


Figura 17 - Comportamento do $IET_{\text{modificado}}$ e do IET_{Toledo} para o Reservatório do Descoberto entre os anos de 2004 a 2016.

Fonte de dados: CAESB (2018).

Como apresentado na Figura 17, a classificação do IET_{Toledo} do lago não apresentou variação, mantendo-se na faixa de valores correspondente a $24 < IET < 44$, pois os resultados encontrados se mantiveram entre 30,59 a 33,81, que segundo a classificação proposta por Toledo *et al* (1983), significa enquadramento como corpo hídrico oligotrófico, característico de corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.

Em virtude da variabilidade sazonal dos processos ambientais que têm influência sobre o grau de eutrofização de um corpo hídrico, esse processo pode apresentar variações no decorrer do ano, havendo épocas em que se desenvolve de forma mais intensa. Em geral, no

início da primavera, com o aumento da temperatura da água, maior disponibilidade de nutrientes e condições propícias de penetração de luz na água, é comum observar um incremento do processo, após o período de inverno, em que se mostra menos intenso. Nesse sentido, a determinação do grau de eutrofização médio anual de um corpo hídrico pode não identificar, de forma explícita, as variações que ocorreram ao longo do período anual.

O cálculo do $IET_{\text{modificado}}$ leva em consideração apenas as variáveis clorofila-a e fósforo total, pois acredita-se que os indicadores de transparência muitas vezes não são representativos para o estado de trofia, pois essa pode ser afetada pela elevada turbidez decorrente de material mineral em suspensão e não apenas pela densidade de organismos planctônicos.

Para o $IET_{\text{modificado}}$, a classificação do lago também não apresentou variação, mantendo-se na faixa de valores correspondente a $IET \leq 47$, pois os resultados encontrados se mantiveram entre 32,70 a 35,72. que de acordo com a classificação da CETESB (2002), representa enquadramento como corpo hídrico ultraoligotrófico, que são considerados corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água.

A aplicação do IET_{Toledo} demonstrou que o estado trófico do reservatório é oligotrófico, já a aplicação do $IET_{\text{Modificado}}$ caracterizou o estado trófico como ultraoligotrófico. Os dois estados tróficos obtidos para os dados são caracterizados de forma similar o reservatório como não eutrofizado, demonstrando que os valores referentes a profundidade de extinção do disco de Secchi não influenciaram na alteração do grau de trofia do lago. Desse modo, como apresentado pela CETESB (2002), os valores de transparência não afetaram expressivamente os resultados, demonstrando que para o caso do reservatório do Descoberto esses valores não são representativos do grau de trofia.

Segundo Lamparelli (2004), a aplicação do $IET_{\text{Modificado}}$ não altera de forma expressiva a distribuição das classificações, indicando que o IET_{Toledo} é pertinente à aplicação em reservatórios. Porém, os critérios de classificação propostos por Lamparelli (2004) para o $IET_{\text{Modificado}}$ permitem uma maior gama de classificações, além de incluir uma nova classe, a supereutrófica.

5.3.1. Avaliação do grau de limitação da produtividade do fitoplâncton

De acordo com Lamparelli (2004), para avaliar o grau de limitação da produtividade do fitoplâncton, são comparadas as classificações obtidas entre o IET(Chla) e o IET(PT), apresentadas no item 3.3. Índices de qualidade da água de reservatórios. As relações para os dois índices utilizados são apresentadas abaixo.

- IET_{Toledo}

Como apresentado na Figura 18, os valores do IET (Chla) são característicos do estado trófico mesotrófico para todos os anos, já para os valores de IET (PT) o enquadramento é no estado trófico ultraoligotrófico. Esse comportamento indica que há algum fator limitante que reduz a produtividade das algas, demonstrando a existência de condições desfavoráveis para a produtividade primária, considerando os nutrientes disponíveis.

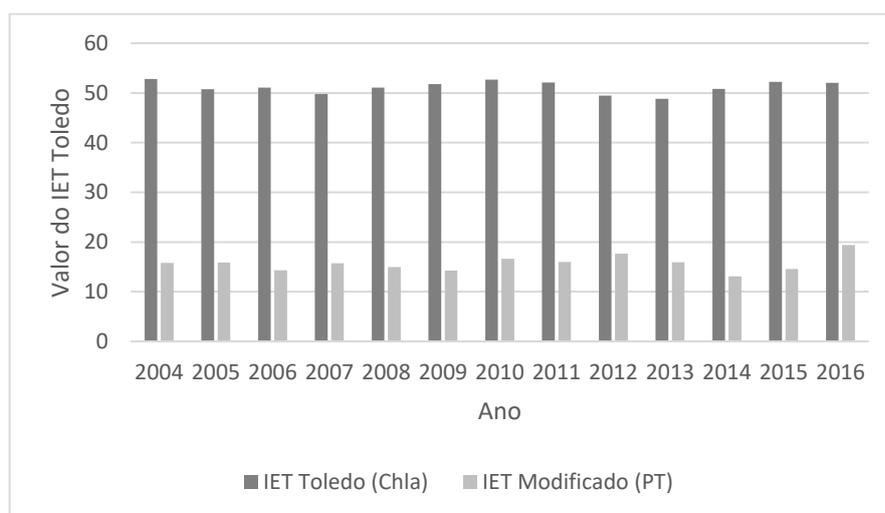


Figura 18 - Estado trófico obtido para a clorofila-a e para a concentração de fósforo total segundo IET Toledo.

Fonte de dados: CAESB (2018).

- IET_{modificado}

Para o IET_{modificado}, 8 anos foram considerados com estado trófico oligotrófico para IET (Chla) e os demais como mesotrófico, no caso do IET (PT) o enquadramento é no estado trófico ultraoligotrófico. Assim como para o IET anterior, esse comportamento indica que

existe algum fator limitante para a produtividade das algas, demonstrando a existência de condições desfavoráveis para a produtividade primária, considerando os nutrientes disponíveis, conforme apresentado na Figura 19.

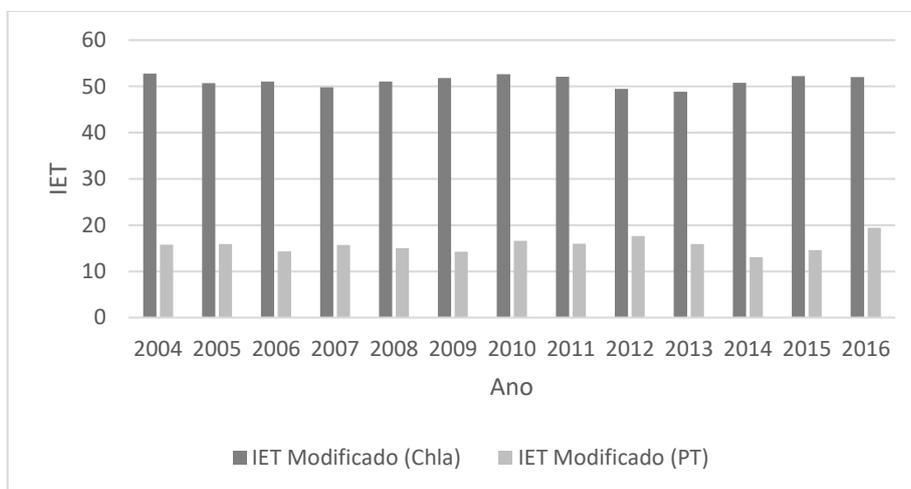


Figura 19 - Estado trófico obtido para a clorofila-a e para a concentração de fósforo total segundo IET Modificado.

Fonte de dados: CAESB (2018).

5.4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Os valores digitais extraídos das imagens estão representados nas Tabelas 14, 15, 16, 17, 18 e 19. Essas tabelas foram separadas por data e banda espectral de acordo com os pontos coletados em campo.

Tabela 14 - Níveis de Cinza na banda 2 em Abril de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Abril de 2018 - Banda 02										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	151	152	148	147	140	145	149	150	150	148,00
Estação 2	141	137	134	140	152	141	143	145	139	141,33
Estação 3	109	109	110	112	104	108	109	113	104	108,67

Fonte de dados: ESA (2018).

Tabela 15 - Níveis de Cinza na banda 3 em Abril de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Abril de 2018 - Banda 03										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	150	152	148	147	140	145	149	150	150	147,89
Estação 2	139	137	134	140	152	141	143	145	139	141,11
Estação 3	109	102	100	109	108	112	109	109	107	107,22

Fonte de dados: ESA (2018).

Tabela 16 - Níveis de Cinza na banda 4 em Abril de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Abril de 2018 - Banda 04										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	151	152	148	147	140	145	149	150	150	148,00
Estação 2	141	137	134	140	152	141	143	145	139	141,33
Estação 3	110	102	100	109	108	112	112	109	107	107,67

Fonte de dados: ESA (2018).

Tabela 17 - Níveis de Cinza na banda 2 em Maio de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Maio de 2018 - Banda 02										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	154	167	152	154	160	170	154	144	143	155,33
Estação 2	159	152	160	183	150	156	147	147	146	155,56
Estação 3	114	109	96	103	113	112	120	114	113	110,44

Fonte de dados: ESA (2018).

Tabela 18 - Níveis de Cinza na banda 3 em Maio de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Maio de 2018 - Banda 03										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	152	153	154	153	153	152	153	152	149	152,33
Estação 2	160	158	160	164	162	153	160	159	161	159,67
Estação 3	113	110	109	111	115	114	118	123	117	114,44

Fonte de dados: ESA (2018).

Tabela 19 - Níveis de Cinza na banda 4 em Maio de 2018.

Imagem SENTINEL 2 - Maio de 2018 - Banda 04										
Valores Digitais nos Pontos Georreferenciados										
Estação de Amostragem	Nível Digital no Ponto	Nível de Cinza nas células vizinhas								Média
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	
Estação 1	77	83	79	77	81	73	72	78	84	78,22
Estação 2	98	100	100	98	96	97	97	97	97	97,78
Estação 3	67	62	55	61	61	63	63	62	58	61,33

Fonte de dados: ESA (2018).

Os resultados foram divididos em três sessões que indicam os parâmetros analisados, relacionados com as respectivas bandas espectrais estudadas.

- **Transparência**

A transparência da água que em campo foi medida pela utilização do disco de Secchi, é um importante parâmetro para a análise da qualidade de um corpo hídrico. Tal parâmetro é uma medida, em metros, correspondente à máxima profundidade extinção do disco imerso na água. Regiões que possuem baixa transparência podem indicar grandes concentrações de sólidos suspensos. Além disso, pequenos índices de transparência também podem ser indicadores da possível presença de substâncias dissolvidas que conferem cor à água, na maioria das vezes, matéria orgânica. Logicamente, elevadas transparências apontam para pouco sólido suspenso/pouca matéria orgânica dissolvida.

Para análise de transparência, foi utilizada a banda 2 do sensor Sentinel-2, que corresponde à faixa espectral da cor azul. Os dados de campo foram coletados nas três estações de amostragem em estudo e os resultados encontrados nesses três pontos foram relacionados, na presente pesquisa, com o valor dos níveis de cinza das imagens.

Segundo Vilela (2010), ao serem relacionados os resultados para transparência da água com os valores digitais da banda correspondente, constatou-se que à medida que aumenta a transparência, aumenta a absorção de REM e, ao diminuir a transparência da água, aumenta a reflexão de REM. Nesse sentido, os menores níveis de cinza correspondem às maiores transparências e às maiores absorções de REM.

Ambas as imagens, referentes ao mês de abril e maio, mostraram-se uniformes, devido à boa qualidade da água, com valores de nível de cinza próximos para os diferentes pontos. O mês de abril apresentou as maiores absorções nas três estações correspondendo a maior transparência na água, segundo o método. No entanto, para os resultados amostrais as maiores profundidades relativas à transparência ocorreram no mês de maio. A Estação 3, localizada no braço do Descoberto, apresentou as maiores absorções para os dois períodos, representando uma maior transparência da água, conforme apresentado na Figura 20, em que as barras correspondem as médias dos valores digitais extraídos das imagens (níveis de cinza) e os marcadores correspondem aos valores obtidos na análise amostral do parâmetro em questão.

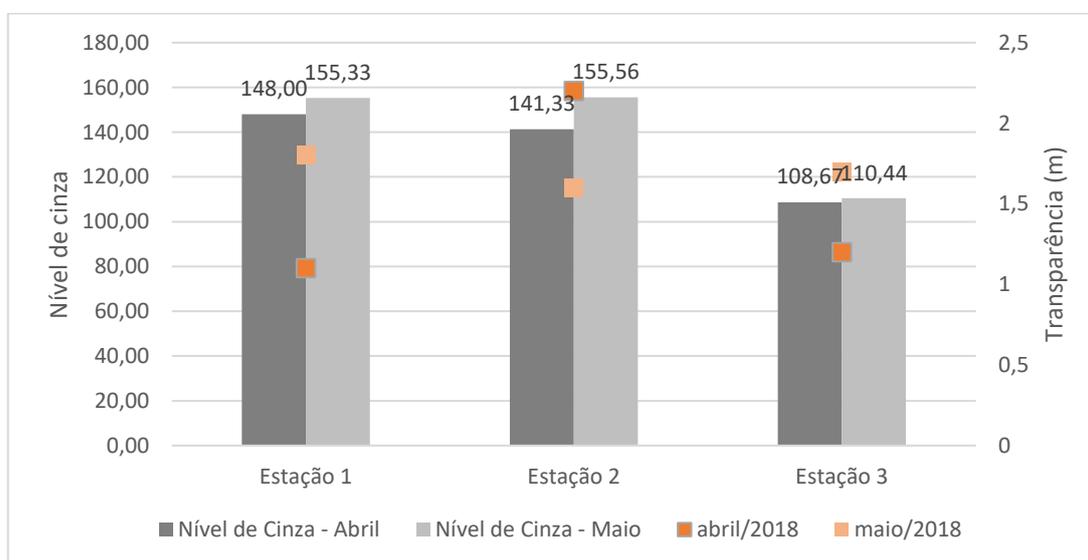


Figura 20 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 2 e o parâmetro transparência monitorado.

Salienta-se que as imagens analisadas não são da mesma data das análises de campo, justificando possíveis discrepâncias entre os valores.

De acordo com as faixas de nível de cinza, o modelo foi aplicado em imagens do reservatório, na banda 2 que, nesse caso, foi utilizada para a estimativa da transparência da água. O objetivo era de analisar espacialmente o corpo hídrico a fim de, caso houvesse variância entre os valores de transparência, esses fossem demonstrados por meio de geoprocessamento das imagens.

Aplicando a escala de absorção de Radiação Eletromagnética, as áreas que indicam maior absorção de REM são possivelmente locais em que a água está mais limpa, mais isenta de sólidos suspensos e, portanto, com maior transparência. No caso do reservatório do Descoberto, todos os pontos nos dois meses de análise foram enquadrados na mesma classificação, definida no intervalo de 0 a 12800 níveis de cinza, como as regiões com máxima transparência na água, como ilustrado na Figura 21 e 22.

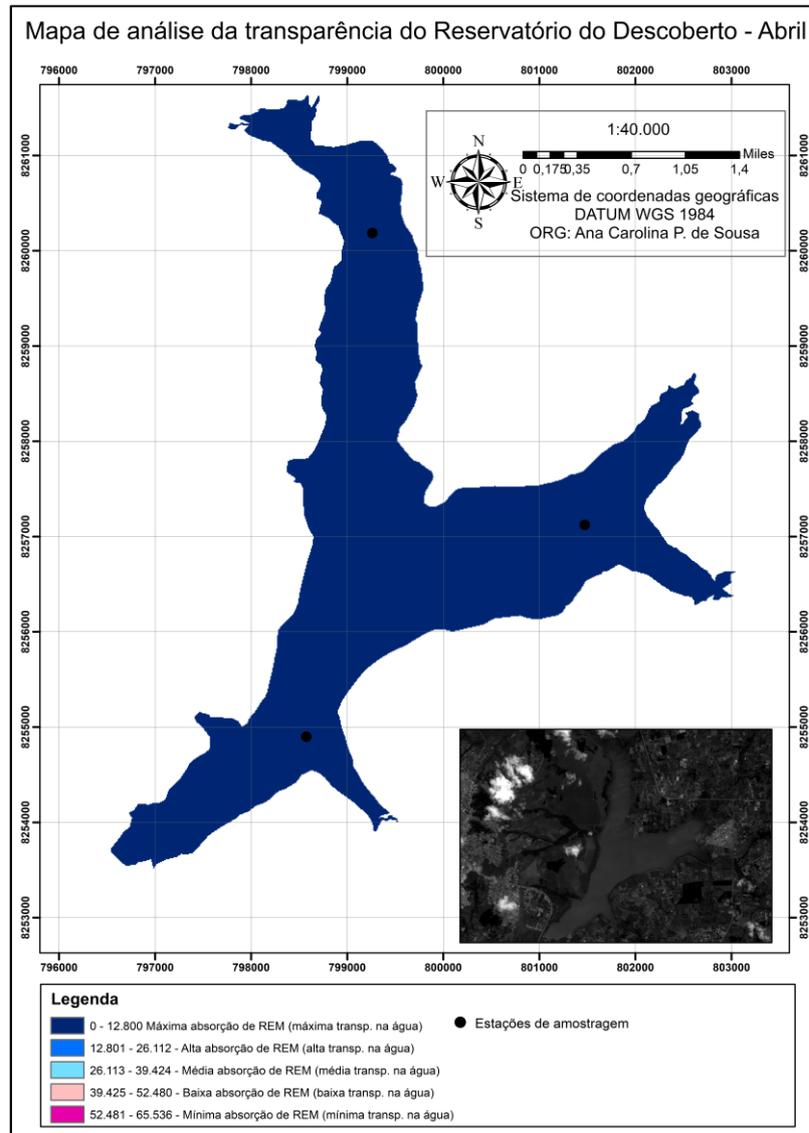


Figura 21 - Absorção de REM na banda 2 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.
Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

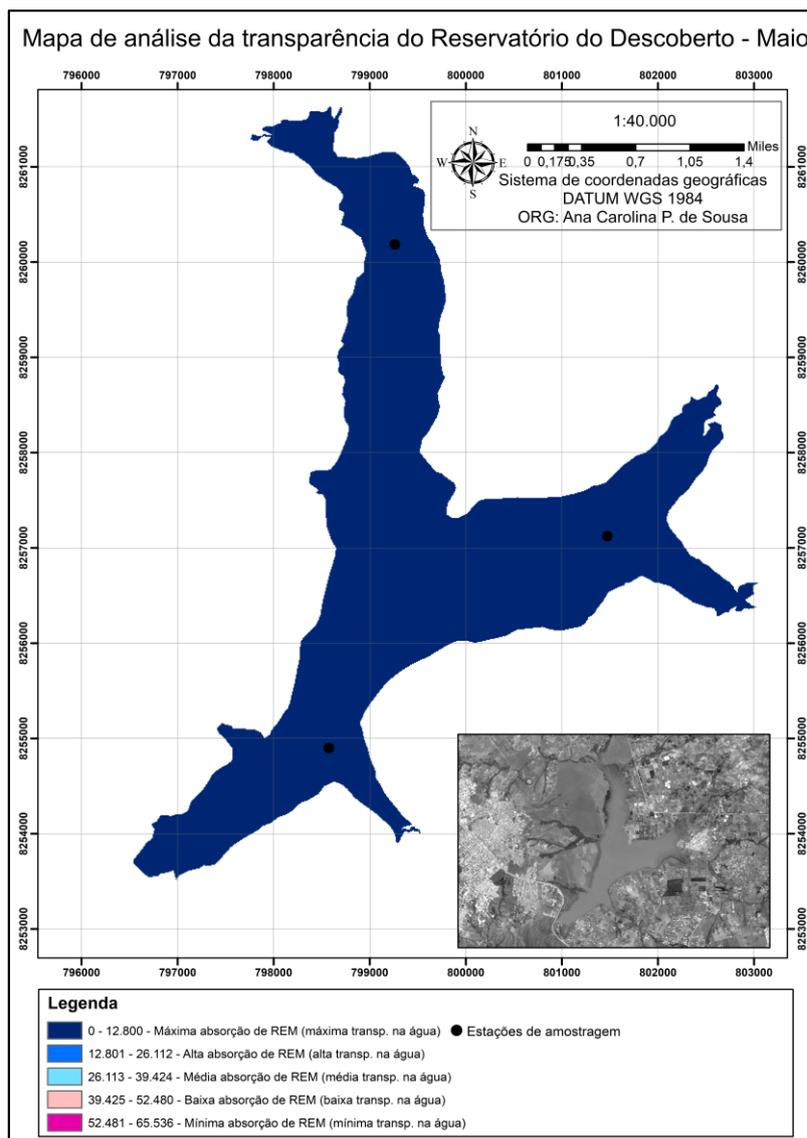


Figura 22 - Absorção de REM na banda 2 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.

Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

- Clorofila-a

A clorofila-a é um pigmento encontrado em todos os grupos de vegetais e outros organismos autótrofos e é frequentemente utilizada como indicadora da biomassa fitoplanctônica em ambientes aquáticos, ou seja, um indicador do crescimento de algas e cianobactérias devido ao enriquecimento por nutrientes. Sua quantificação é importante em termos de qualidade da água para avaliar o grau de eutrofização de um ambiente, sendo a presença de algas indiretamente medida pela concentração de clorofila, em microgramas por litro, da amostra de água.

A banda 3 do sensor Sentinel-2, corresponde à faixa espectral da cor verde e apresenta boa penetração em corpos de água, sendo refletida onde há presença de pigmentos de tons esverdeados, o que a torna viável para detectar a presença de algas e organismos vegetais em ambientes aquáticos. Assim, elevada reflexão equivale a uma concentração elevada de clorofila em determinado setor do reservatório.

Os resultados encontrados nas campanhas de amostragem foram relacionados com o valor dos níveis de cinza das imagens que correspondem às datas das coletas. No entanto, para a clorofila-a somente uma análise amostral foi realizada no mês de maio, com dois pontos de coleta.

Os resultados para concentração de clorofila-a foram realizados com acidificação, pois esses desconsideram o pigmento em processo de degradação no momento da coleta e análise. Os valores encontrados no mês de maio para as Estações 1 e 3 não tiveram variações para concentração de clorofila, detectando baixas concentrações, com valores nulos ou bem próximos de zero. A Figura 23 ilustra a relação entre níveis de cinza para a banda 3 e o parâmetro concentração de clorofila.

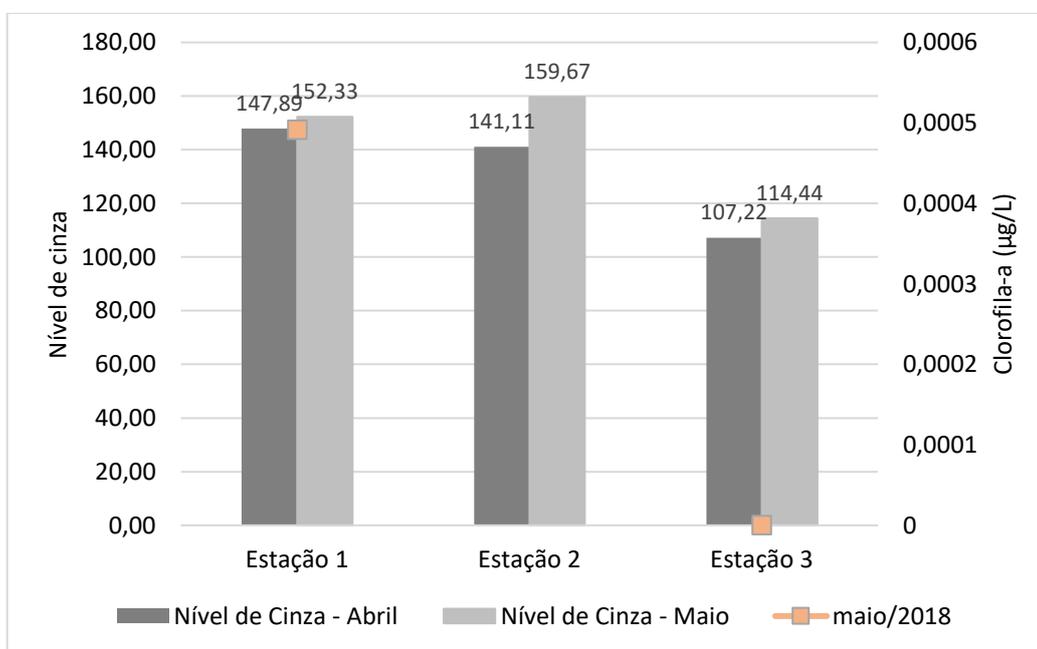


Figura 23 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 3 e o parâmetro clorofila-a monitorado.

Tendo em conta que no momento em que a concentração de clorofila aumenta, a reflexão nesta faixa espectral também aumenta, ou seja, há um aumento dos níveis de cinza. Nos dois

meses analisados, os menores níveis de cinza foram encontrados na Estação 3 e o resultado amostral de maio corrobora a subjeção de que está estação possui menor concentração de clorofila-a, no período analisado. Já as Estações 1 e 2 apresentam resultados similares em relação a análise por sensoriamento remoto, com valores mais altos, mas ainda representando baixas taxas de reflexão e por conseguintes baixas concentrações de clorofila-a.

Com base nas faixas de níveis de cinza de absorção de Radiação Eletromagnética, o modelo foi aplicado nas imagens dos meses de abril e maio na banda 3, que atua como indicadora de pigmentos de clorofila presentes na água, como ilustrado nas Figuras 24 e 25.

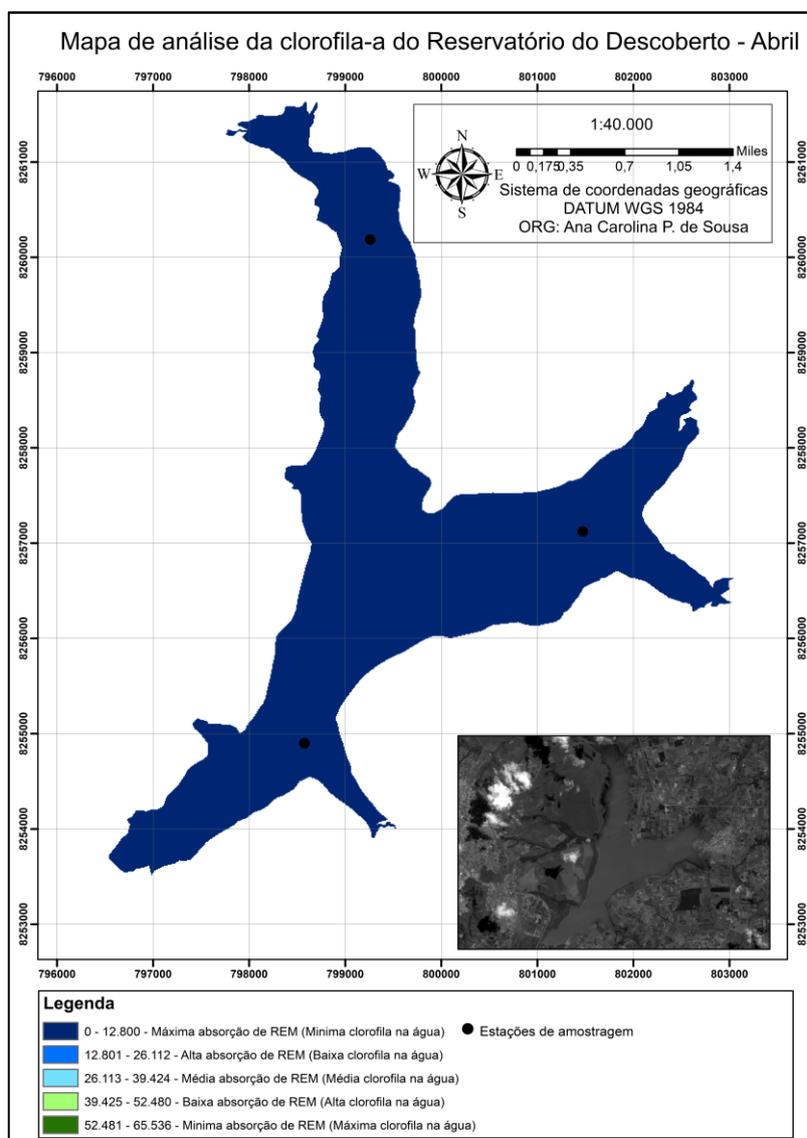


Figura 24 - Absorção de REM na banda 3 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.

Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

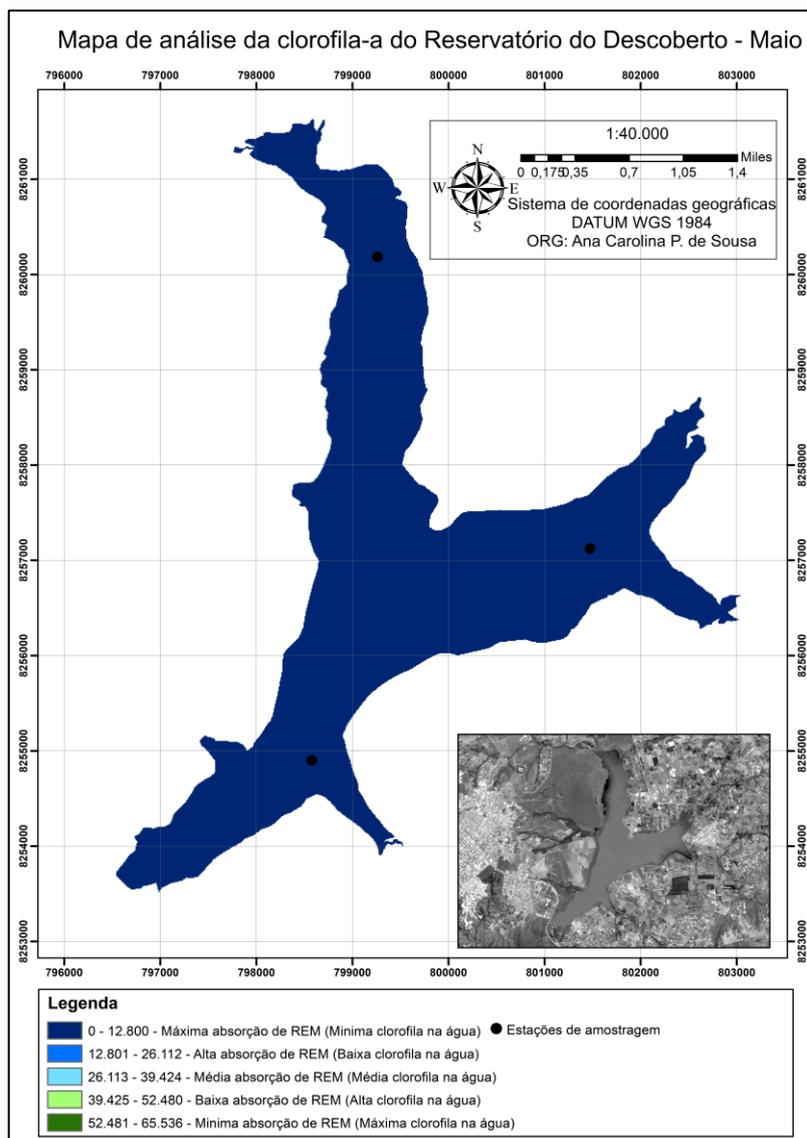


Figura 25 - Absorção de REM na banda 3 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.

Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

O reservatório do Descoberto apresentou nos dois meses de análise enquadramento na mesma classificação, definida no intervalo de 0 a 12800 níveis de cinza, como as regiões com mínima concentração de clorofila-a na água. Os resultados demonstram que nesse período ocorreu máxima absorção de REM, que indica pouca presença de pigmentos de clorofila.

- Turbidez

A turbidez da água, que em campo foi medida por sonda multiparamétrica, é um parâmetro que indica a presença de sedimentos, sólidos e outras substâncias em suspensão na água. A banda 4 do sensor Sentinel-2 corresponde à faixa espectral da cor vermelha. Nessa faixa ocorre reflectância de alvos com as cores em tons entre o amarelo e o vermelho, o que a torna mais indicada para medidas de turbidez, pois os sedimentos e os sólidos em suspensão, presentes em ambientes aquáticos, apresentam, na maioria das vezes, esses tons de coloração. Nesse sentido, quanto maior for a absorção de REM, menor será a turbidez.

Assim como ocorreu com os outros parâmetros, os resultados encontrados nas duas campanhas de amostragem foram relacionados com o valor dos níveis de cinza das imagens que correspondem às datas das coletas.

Com exceção do resultado da Estação 1 no mês de abril, os resultados tiveram comportamento uniforme, com a turbidez aumentando em direção ao braço do Descoberto. Próximo a essa estação ocorrem floração de macrófitas, fator que pode acarretar aumento na turbidez.

Os índices de turbidez em todas as campanhas foram baixos. Esse resultado deve-se a análise ter sido realizada fora do período chuvoso, no qual ocorre maior transporte de sedimentos que elevam os valores de turbidez. Os resultados comentados estão apresentados na Figura 26.

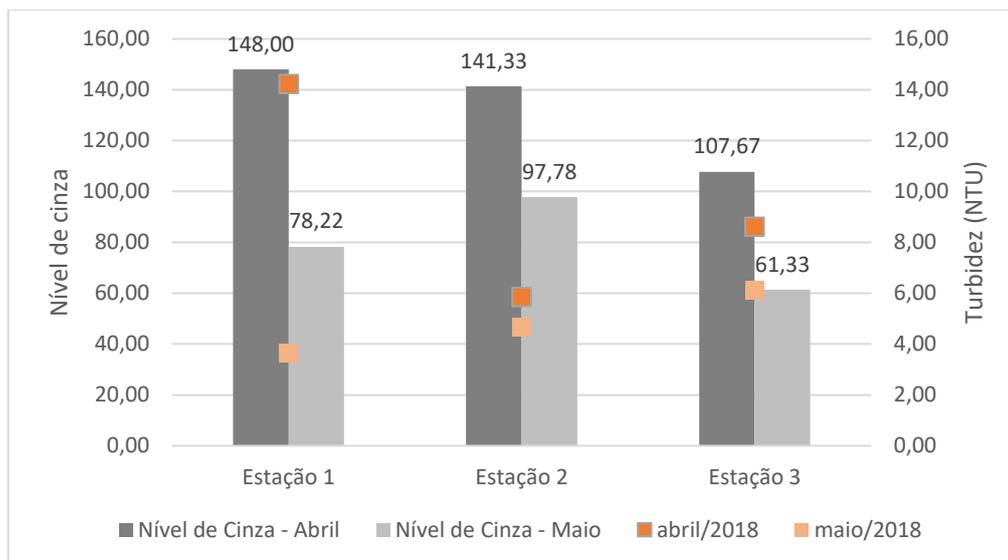


Figura 26 - Relação entre os níveis de cinza para a banda 4 e o parâmetro turbidez.

As taxas de reflexão (aumento dos níveis de cinza) acompanham o aumento da turbidez e a radiação eletromagnética é absorvida em locais sem a presença de sedimentos e sólidos em suspensão. Nas imagens analisadas, a variação de níveis de cinza foi alta entre os meses, apresentando maior turbidez no mês de abril, já nos resultados, amostrais a discrepância entre os resultados foi pequena, mas os valores mais elevados de turbidez se encontram também no mês de abril.

Aplicando a escala de absorção de Radiação Eletromagnética na classificação das imagens na banda 4, ilustrado na Figura 27 e 28, demonstram-se que nesse período ocorreu intensa absorção de REM, o que comprova uma boa qualidade da água, indicando a baixa concentração de sedimentos em suspensão. Assim como para os outros parâmetros, o reservatório do Descoberto apresentou nos dois meses de análise enquadramento na mesma classificação, definida no intervalo de 0 a 12800 níveis de cinza, com a mínima turbidez na água.

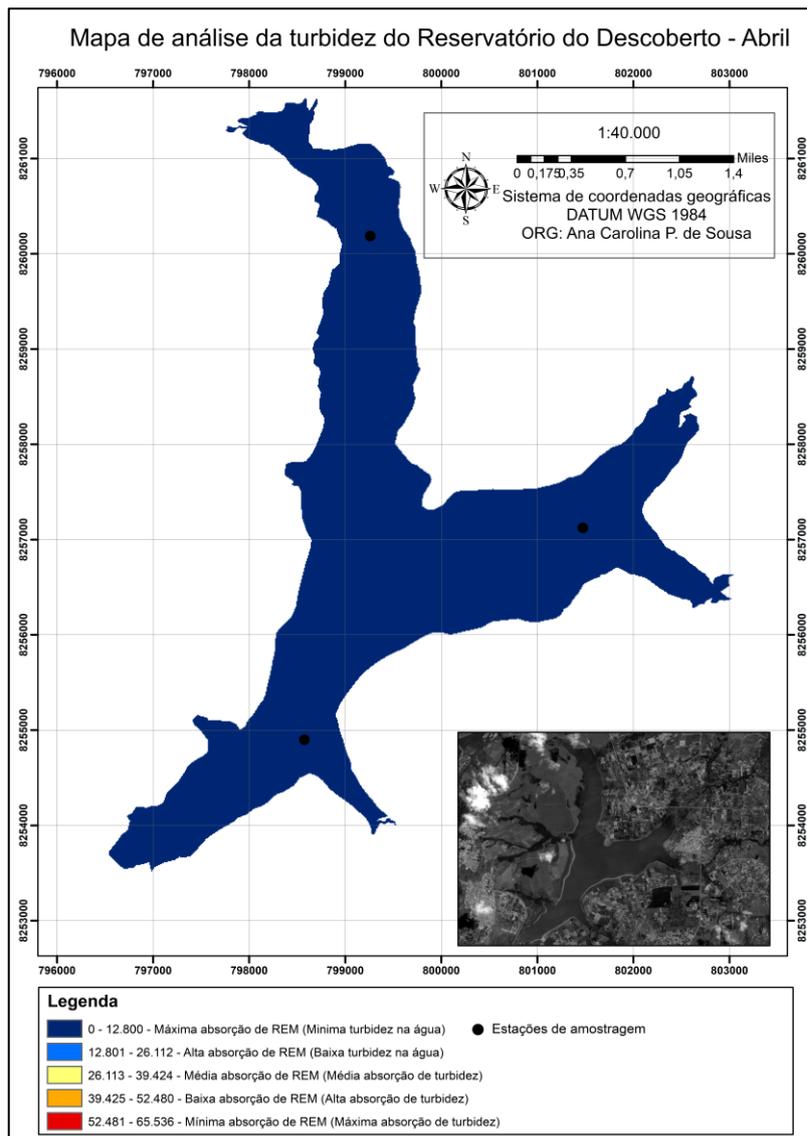


Figura 27 - Absorção de REM na banda 4 em na imagem Sentinel-2 de 23/04/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.
Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

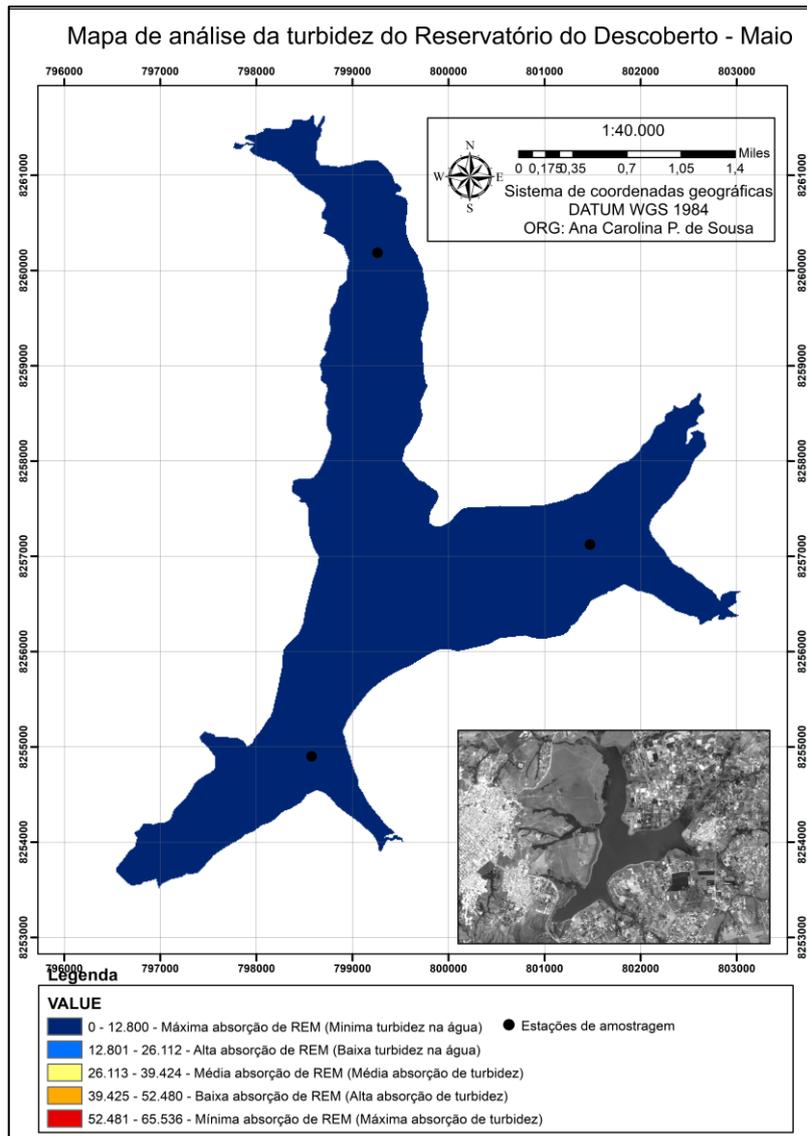


Figura 28 - Absorção de REM na banda 4 em na imagem Sentinel-2 de 23/05/2018 no Reservatório do Descoberto DF/GO.
Fonte de dados: COPERNICUS (2018).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Tendo como premissa o objetivo inicial do trabalho de promover o entendimento da dinâmica do ambiente aquático do lago Descoberto por meio do monitoramento e análise de parâmetros abióticos e biótico de qualidade da água, pode-se concluir:

A variação do perfil de temperatura para as três estações analisadas não foi expressiva e de forma geral, os valores amostrais foram próximos quando comparados as diferentes profundidades para as diferentes estações, nos dois meses do período seco analisados, demonstrando que o corpo hídrico não apresentava estratificação térmica, com exceção da Estação 3 no mês de maio.

As três estações diagnosticadas, tanto para o mês de abril quanto para maio, apresentaram perfil de concentração de OD com comportamento similar, sem apresentar variações bruscas de concentração e intervalo amostral similar. Por meio dos dados, observa-se que no período analisado o corpo hídrico não apresentava estratificação química.

Em relação a condutividade, os maiores valores foram obtidos nas profundidades mais superficiais, as estações apresentaram comportamento similar para o parâmetro. Os valores encontrados de pH variaram entre pH neutro e levemente alcalino para as estações os menores valores foram obtidos no mês de maio, para todas as profundidades. Para as concentrações de nitrato e nitrogênio amoniacal não foram observadas variações expressivas na concentração em função da profundidade ou entre o período analisado. Da mesma forma, a concentração de fósforo total. Os valores da turbidez não apresentaram uma tendência de variação com o aumento da profundidade. A concentração de clorofila obtida alcançou valores nulos ou bem próximos de zero.

Por meio da utilização do IQAR, os dados demonstram uma leve tendência de degradação na qualidade da água do reservatório do Descoberto, sendo que o principal parâmetro para a classificação encontrada foi a concentração de fósforo.

Para a aplicação dos IETs para os dados monitorados pela CAESB, em todos os anos analisados tanto o IETToledo como o IETModificado obtiveram resultados de boa qualidade

ambiental. O IETToledo foi classificado no estado trófico oligotrófico e, o IETModificado como ultraoligotrófico. Os dois graus de trofia são característicos de corpos d'água limpos, de baixa produtividade.

Também foi avaliado o grau de limitação da produtividade do fitoplâncton para o reservatório. Para os dois IETs foi identificado que o grau de limitação do reservatório pode ser considerado como alto, indicando a existência de condições desfavoráveis para a produtividade primária, considerando os nutrientes disponíveis.

Em relação a aplicação de sensoriamento remoto para auxílio no monitoramento da qualidade da água, houve uma correspondência entre os parâmetros e os níveis de cinza das bandas analisadas foi coerente, demonstrando o potencial de aplicação da metodologia para o reservatório em estudo. Além disso, todas as imagens referentes ao mês de abril e maio mostraram-se uniformes para os parâmetros analisados, devido à boa qualidade da água, com valores de nível de cinza próximos nos meses amostrados para os diferentes pontos.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da metodologia utilizada no sensoriamento remoto para corpos hídricos comprovadamente eutrofizados, a fim de acompanhar de forma espacial e temporal a qualidade do corpo hídrico, assim como, identificar a aplicabilidade do método junto ao favorecimento de informações acerca dos pontos em que a coleta amostral é mais necessária.

A aplicação de índices de qualidade da água também pode ser objeto de estudo em relação ao período em que o reservatório do Descoberto se encontrava em plena crise hídrica, com o intuito de correlacionar os parâmetros utilizados com a possível diminuição da qualidade da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA (2017a) – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Disponível em: < <http://gis.adasa.df.gov.br/portal/home/>>. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

ADASA (2017b) – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Disponível em: < <http://www.adasa.df.gov.br/>>. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

ANA (2017) – Agência Nacional de Águas. Disponível em: < <http://portalpnqa.ana.gov.br/default.aspx>>. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21th ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

ARTIGAS, F.; MARTI, A.; YAO, N.; PECHMANN, I. (2008). Chlorophyll Detection and Mapping of Shallow Water Impoundments Using Image Spectrometry. Research Letters in Ecology, p. 1-4.

BARNEZ, A. S. (2004). Análise da influência do intervalo de tempo de registro de dados linígrafos e pluviógrafos em estudos hidrológicos de pequenas bacias hidrográficas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 118p.

BOLLMANN, H.A.; C. CARNEIRO & E.S. PEGORINI. (2005). Qualidade da água e dinâmica de nutrientes, p. 213-270. In: C.V. ANDREOLI & C. CARNEIRO, C. eds. Gestão integrada de mananciais de abastecimento eutrofizados. Curitiba, Editora Grafica Capital. 500p.

BRANDIMARTE, A. L.; SHIMIZU, G. Y.; ANAYA, M.; KUHLMANN, M. L. (2004). Amostragem de invertebrados bentônicos. In: BICUDO, C. E. M.; BICUDO, D. C. (Ed.). Amostragem em limnologia. Rio de Janeiro, p.213-230.

BRASIL. Decreto nº 88.940, de 7 de novembro de 1983. Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção Ambiental das Bacias dos Rios São Bartolomeu e Descoberto, e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, DF, 9 de novembro de 1983.

CAESB (2016) - Companhia de Saneamento do Distrito Federal. “Relatório da Qualidade da Água Distribuída pela CAESB em 2015”. Disponível em: https://www.caesb.df.gov.br/images/arquivos_pdf/Tabloide_Relatorio_Qualidadedeagua_2015.pdf. Acesso em 28 de outubro de 2017.

CAESB (2017a) - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Disponível em < <https://www.caesb.df.gov.br/> >. Acesso em 01 de novembro de 2017.

CAESB (2017b) - Companhia de Saneamento do Distrito Federal. “Relatório da Qualidade da Água Distribuída pela CAESB em 2016”. Disponível em: https://www.caesb.df.gov.br/images/arquivos_pdf/Tabloide_Relatorio_Qualidadedeagua_2016.pdf. Acesso em 28 de outubro de 2017.

CAESB (2018) – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Produtos e Serviços - Água e Esgotos no Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em maio de 2018.

CAESB e CNEC – Consorcio Nacional de Engenheiros Consultores S.A. (1985). “Plano de proteção do lago Descoberto”. Relatório Final- Tomo 01. Brasília-DF.

CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Rev. Bras. Geoc., 2004. p.41- 48.

CARDOSO, E. T. S. (2011). Avaliação do grau de trofia e da qualidade da água de um braço do reservatório de Itaipu-Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do ABC. Centro de Engenharias, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Curso de Pós-Graduação em Energia. Santo André-SP, p.147.

CARLSON, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography, v. 22, n. 2, p. 261- 269.

CARMO, M.S. (2001). “Geoquímica de águas e sedimentos de correntes da bacia hidrográfica do rio Descoberto – Brasília-DF.” Dissertação de Mestrado Universidade de Brasília. Instituto de Geociências, Brasília- DF.

CETESB (2002) - COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, Proposta de Índices de Qualidade de Água para o Estado de São Paulo. Coletânea de Textos da Cetesb.

CETESB (2017) - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. “Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2016”. São Paulo: CETESB, 2017.

CHEN, S.; FANG, L.; LI, H.; CHEN, W.; HUANG, W. (2011) Evaluation of a three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in tidal reaches of the Pearl River Estuary, China. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 66, p. 356-364.

Comitê de bacias hidrográficas do Rio Paranoá, 2009. Disponível em <<http://www.cbhparanoa.df.gov.br/mapas.asp>>. Acesso em 22 de outubro de 2017.

CONAB. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.p df>. Acesso em: 05 jun. 2018.

COPERNICUS. Copernicus open access hub. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. Acesso em: 24 mai. 2018.

CÔRTE, D. A. A. Planejamento e gestão de APAs: enfoque institucional / Dione Angélica de Araújo Côrte. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1997. p.106.

CRÓSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto / Alvaro Penteadó Crósta. - ed. rev. - Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DONADIO, N.M.M.; GALBIATTI, J.A.; PAULA, R.C.de. Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do Córrego Rico, São Paulo, Brasil. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.115-125, 2005.

ERBERT M. Estudo das técnicas de classificação de imagens hiperespectrais utilizando análise discriminante regularizada - Dissertação de Mestrado. RDA. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

ESA (2018) - European Space Agency. Disponível em <https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2>. Acesso em 17 de maio de 2018.

ESTEVEES, Francisco de Assis. Fundamentos de Limnologia. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

ESTEVEES, Francisco de Assis. Fundamentos de Limnologia. 3. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FALCOMER, J. 2001. Alterações do uso da terra na bacia do Ribeirão Rodeador: área de proteção ambiental (APA) da bacia do rio Descoberto - DF - GO, no período de 1965 a 1991. Brasília: IBAMA. vol. 40, p.54.

HENRY, R. Heart budgets, thermal structure and dissolved oxygen in Brazilian reservoirs. In: J G Tundisi; M. Straskraba. (Org.). Theoretical reservoir ecology and its applications. Ed.: Backhuys Publishers, 1999, v. 1, p. 125-151.

IAP (2004) - Instituto Ambiental Do Paraná. Monitoramento da qualidade das águas dos reservatórios do estado do Paraná, no período de 1999 a 2004. Curitiba, 2004. p.13.

IBGE (2010) – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em 25 de novembro de 2017.

IBGE (2017) – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “População residente enviada ao Tribunal de Contas da União Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação - 2001-2015”. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2017/serie_2001_2017_tcu.shtm. Acesso em 25 de novembro de 2017.

ICMBio (2014) - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. “Plano de Manejo – APA Bacia do Rio Descoberto”. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/apa_bacia_do_rio_descoberto_pm_encartes_12_e_3.pdf>. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

KLOIBER, S. M.; BREZONIK, P.L.; BAUER, M.E. (2002) Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. Water Research, v. 36, p. 4330-4340.

KOIDE, Sérgio (coord.) (2006). “Projeto: Definição De Requerimentos De Resolução Espacial E Temporal Para Monitoramento Da Quantidade E Qualidade Da Água Em Bacias Hidrográficas” – Relatório Técnico Final, FNDCT/CT-Hidro, FINEP FINATEC, Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos-Universidade de Brasília/UnB, outubro, Brasília, Brasil.

LAMPARELLI, M.C. (2004) Grau de trofia em corpos d’água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. p.235.

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes. Caracterização espectro temporal florestal e da cana-de-açúcar no município de Itapemirim, ES / Ivo Augusto Lopes Magalhães. 2013. p.85.

- Martin, J. L. e McCutcheon, S. C. (1999). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. Lewis Publishers, EUA.
- MARKEWITZ, D. et al. (2006). Dissolved rainfall inputs and streamwater outputs in an undisturbed watershed on highly weathered soils in the Brazilian Cerrado. *Hydrological Process*, p.20.
- MARTINS, Éder de Souza et al. (2004). *Evolução geomorfológica do Distrito Federal*. Documentos, Planaltina, DF, n. 122, p.57.
- MMA e IBAMA (1998). *Plano de Gestão Ambiental – Área de Proteção Ambiental Federal da Bacia do Rio Descoberto DF/GO*. Brasília, Brasil.
- MOREIRA, Mauricio Alves. (2003). *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação; 2ºed.* – Viçosa: UFV.
- NOVO, E. M. L. M. *Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto*. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.
- PINTO, M. N.; NEVES, R. R. (1985). Geomorfologia da Bacia do Rio Alagado - Df/Go. *GEOCIENCIAS*, v. 4, p. 127-138.
- PONZONI, F. J. *Sensoriamento Remoto no estudo da Vegetação: Diagnosticando a Mata Atlântica*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2002. 28 p.
- PORTO, R.L.; Branco, S.M.; Cleary, R.W.; Coimbra, R.M.; Eiger, S.; Luca, S.J.; Nogueira, V.P.Q. & Porto, M.F.A. 1991. *Hidrologia ambiental*. São Paulo, Ed. da USP, ABRH. p.414.
- RIBEIRO, M. O. (2001). *Estudo da poluição e autodepuração nos rios Melchior e Descoberto, na bacia do Descoberto-DF/GO, com auxílio de modelos matemáticos de simulação de qualidade da água, para estudos de seu comportamento atual e futuro*. Dissertação de Mestrado. Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília. p.162.
- ROSA, Roberto. (2007). *Introdução ao Sensoriamento Remoto, 6º edição*, Uberlândia. Ed.EDUFU. p.264.
- RUDORFF, C. M. (2006). *Estudo da Composição das Águas da Planície Amazônica por Meio e Dados de Reflectância do Sensor Hyperion/EO-1 e de Espectrorradiômetro e Campo Visando a Compreensão da Variação Temporal dos seus Constituintes Opticamente Ativos*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE, São Jose dos Campos.
- SAWYER, C.N. & McCARTY, P.L., “*Chemistry for Environmental Engineers*”. 4th ed. New York. Mc Graw-Hill Book Company, 1994.
- SEGL, K. et al. An end-to-end modeling tool for the simulation of Sentinel-2 image products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 53, n. 10, p. 5560-5571, 2015.
- SILVA, Antônio Machado e. *Curso Processamento digital de imagens de satélite*. Disponível em: <www.cartografia.org.br>. Acesso em: 07 jun. 2018.

SILVA, L. M. A Imigração Japonesa como Fator de Influência para o Desenvolvimento da Agricultura Familiar: Estudo de Caso da Zona Rural de Brazlândia - DF. 2013. p.123.

SNIS (2016) - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.

STRASKRABA, M. e TUNDISI, J. G. Gerenciamento da qualidade da água de represas. In: TUNDISI, J. G. ed. Diretrizes para o gerenciamento de lagos. São Carlos, ILEC/IEE. 2000. v.9, 280p.

TOLEDO Jr., A.P.; TALARICO, M.; CHINEZ, S.J.; AGUDO, E.G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação e processo de eutrofização em lagos e reservatórios. In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. p. 1-34, 1983.

TOLEDO, L.G. de; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. Scientia Agrícola, Piracicaba, v.59, n.1, p.181-186, 2002.

TUNDISI, J. G. Água no século 21: enfrentando a escassez. RIMA/IEE, 2003. 247p.

TUNDISI, J.G. e MATSUMURA-TUNDISI, T. 2008. Limnologia. Oficina de Textos, 632p.

VILELA, M. A. M. A. (2010) . Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatório utilizando sensoriamento remoto / Marcos Augusto Macedo Araújo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 118p.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. v. 1, 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WACHHOLZ F., FILHO W.P. Características Liminológicas e a Reflectância da Água do Reservatório Costa e Silva – RS - 1º SIMPGEO/SP, Rio Claro, 2008 ISBN: 978-85-88454-15-6.

WANG, F.; HAN, L.; KUNG, H.T.; VAN ARSDALE, R.B. (2006) Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 23, p. 5269-5283.

ZHANG, Y.; LIN, S.; QIAN, X.; WANG, Q.; QIAN, Y.; LIU, J.; GE, Y. (2011) Temporal and spatial variability of chlorophyll a concentration in Lake Taihu using MODIS time-series data. Hydrobiologia v. 661, p. 235-250.