



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

NICOLE SARAH CARVALHO PONTE

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA E USO DE SENSORIAMENTO
REMOTO PARA ESTIMAR AS CONCENTRAÇÕES DE VARIÁVEIS
LIMNOLÓGICAS EM RESERVATÓRIO SUPERFICIAL NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

FORTALEZA

2022

NICOLE SARAH CARVALHO PONTE

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA E USO DE SENSORIAMENTO REMOTO
PARA ESTIMAR AS CONCENTRAÇÕES DE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS EM
RESERVATÓRIO SUPERFICIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia do
Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Ceará, como
um dos requisitos à obtenção do título
de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bezerra
Lopes.

Coorientadora: Eng^a Agrônoma e
Mestranda Julyanne Braga Cruz
Amaral

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P857a Ponte, Nicole Sarah Carvalho.
Avaliação da qualidade de água e uso de sensoriamento remoto para estimar as concentrações de variáveis limnológicas em reservatório superficial no semiárido brasileiro / Nicole Sarah Carvalho Ponte. – 2022.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes.

Coorientação: Profa. Ma. Julyanne Braga Cruz Amaral.

1. Qualidade de água. 2. Atributos limnológicos. 3. Dados espectrais. I. Título.

CDD 630

NICOLE SARAH CARVALHO PONTE

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA E USO DE SENSORIAMENTO REMOTO
PARA ESTIMAR AS CONCENTRAÇÕES DE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS EM
RESERVATÓRIO SUPERFICIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia do
Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Ceará, como
um dos requisitos à obtenção do título
de Engenheira Agrônoma.

Aprovada em: 03/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr^o. Fernando Bezerra Lopes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng^a Agrônoma e Mestranda Julyanne Braga Cruz Amaral (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Doutorando M. Sc. Francisco Josivan de Oliveira Lima (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^o. Dr. Luiz Carlos Guerreiro Chaves (Conselheiro)
Faculdade Terra Nordeste (FATENE)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de pertencer a este mundo.

Aos meus pais Edy e João, por todo amor, apoio e ensinamentos ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos Fred, Nicolas, Jamille. Ao meu sobrinho Gustavo e aos demais familiares pelo incentivo e pelo carinho. Obrigada por me auxiliarem nesse passo tão importante e sonhado por mim.

Ao Jamison Moura, por todo incentivo, carinho, companherismo e por ter tornado mais fácil os momentos difíceis.

Aos amigos que apoiaram a mim nessa jornada, Leticia, Ingrid, Helen, Joelma, Sávio, Manoel e Ícaro, espero levá-los comigo por toda vida.

À Valéria Severo, por ter sido tão amiga e parceira na universidade, nesse projeto e na vida. Obrigada por toda ajuda, carinho, choros e risos. Amo você para sempre.

Ao Thales Queiroz, por toda ajuda, ensinamentos, apoio, paciência, calma e pelas tardes de café. Obrigada por ter sido tão presente.

À Julyanne, por ter dedicado o seu tempo para tornar possível esse trabalho e ao Josivan pelas contribuições.

Ao Professor Dr. Fernando Bezerra Lopes pela oportunidade, orientação e contribuições.

Ao Professor Dr. Luiz Carlos, por ter aceito o convite e pelas contribuições pertinentes.

À Universidade Federal do Ceará, pelo ensino de excelência, infraestrutura e a oportunidade de conhecer e aprender com grandes profissionais.

Ao Laboratório de Manejo do Solo (LMS/UFC), em especial à Deyse Maia, Departamento de Ciências do Solo, Departamento de Engenharia Agrícola (DENA/UFC) por ter tornado possível esse projeto.

Agradeço a todos os integrantes do grupo de pesquisa em Manejo de Água e Solo no Semiárido (MASSA) pela oportunidade, por todos os ensinamentos, experiências e vivências, dentro e fora do espaço acadêmico.

RESUMO

A avaliação da qualidade da água é uma ferramenta importante na gestão dos recursos hídricos, onde deve-se acompanhar as mudanças em função do tempo e espaço, possibilitando assim, a intervenção com medidas preventivas. Dessa forma, o uso do sensoriamento remoto, através das respostas espectrais de corpos hídricos, surge como uma ferramenta complementar aos programas de monitoramento usuais, no qual torna possível a avaliação de todo ambiente aquático, permitindo a estimativa de componentes orgânicos e inorgânicos responsáveis pela deterioração da qualidade da água. Portanto, objetivou-se avaliar o estado qualitativo das águas, quanto as concentrações de clorofila-*a*, sólidos suspensos totais - SST e transparência utilizando dados limnológicos e de sensoriamento remoto em reservatório da região semiárida no estado do Ceará. As campanhas de coletas foram realizadas no reservatório General Sampaio, no município de General Sampaio, CE, em quatro pontos amostrais, entre os anos de 2018 e 2019. Foram utilizados dados limnológicos obtidos *in situ*, em laboratório e os dados espectrais coletados com o espectrorradiômetro *in situ*. Foram avaliados os efeitos das variáveis limnológicas nas curvas espectrais. Para as análises e aplicação dos modelos para estimar as concentrações de clorofila-*a* e SST, foram quantificados em laboratório. Neste foram constatados os efeitos dos atributos limnológicos nas curvas espectrais. A distribuição dos valores das concentrações de clorofila-*a* no reservatório variaram espacialmente e ao longo dos anos de 2018 e 2019. Os menores valores para o atributo foram observados nas coletas realizadas nos meses de dezembro de 2018 e julho de 2019. Os resultados encontrados ultrapassam o limite de qualidade das águas de Classe II na maioria das coletas realizadas no período de 2018 e 2019. As menores concentrações de sólidos suspensos foram observadas em junho de 2018, alcançando valores próximos a $0,29 \text{ mg L}^{-1}$ para SST e SSV no ponto P02. Este fato pode estar relacionado à distribuição das precipitações pluviométricas, que durante os meses que antecederam a coleta, não foram registradas chuvas mais intensas. Para o mesmo período, o ponto P 01 apresentou a maior concentração, com valores próximos a $4,00 \text{ mg L}^{-1}$ de SST. A transparência observada teve uma variação de 0,32 m até 1,45 m. Os maiores valores foram observados no primeiro semestre de 2018, período correspondente ao fim do período chuvoso na região. A análise dos dados espectrais foi realizada utilizando a faixa do visível (entre 400 a 700 nm) e na faixa do infravermelho próximo (até 900 nm). O comportamento espectral da água quando ocorre a presença de clorofila-*a* apresentou picos de absorção e de reflectância que variam de acordo com as concentrações de clorofila-*a* e/ou de sólidos suspensos. Os coeficientes de correlação (*r*) obtidos foram 0,569 (clorofila-*a*), 0,875 (sedimentos suspensos) e 0,879 (transparência). Os modelos apresentados na etapa de calibração, apresentaram coeficiente de determinação (R^2) moderado e alto, 0,5629 (clorofila-*a*), 0,7623 (sedimentos suspensos) e 0,77 (transparência). Os bons desempenhos dos modelos, usando os dados espectrais mostram a viabilidade de se estimar remotamente as concentrações de SST e transparência em reservatórios superficiais do semiárido. O modelo desenvolvido para estimar a concentração de clorofila-*a* precisa ser melhorado. É necessária a validação dos modelos de regressão para estimativas das variáveis limnológicas.

Palavras-chave: Qualidade de água. Atributos limnológicos. Dados espectrais.

ABSTRACT

The assessment of water quality is an important tool in the management of water resources, where changes must be monitored as a function of time and space, thus enabling intervention with preventive measures. In this way, the use of remote sensing, through the spectral responses of water bodies, appears as a complementary tool to the usual monitoring programs, in which it makes possible the evaluation of the entire aquatic environment, allowing the estimation of organic and inorganic components responsible for the deterioration of the water. water quality. Therefore, the objective was to evaluate the qualitative state of the waters, regarding the concentrations of chlorophyll-*a*, total suspended solids - TSS and transparency using limnological and remote sensing data in a reservoir in the semi-arid region in the state of Ceará. The collection campaigns were carried out in the General Sampaio reservoir, in the municipality of General Sampaio, State of Ceará, Brazil at four sampling points, between the years 2018 and 2019. Limnological data obtained in situ, in the laboratory and spectral data collected with the spectroradiometer were used. in situ. The effects of limnological variables on spectral curves were evaluated. For the analysis and application of the models to estimate the concentrations of chlorophyll-*a* and TSS, they were quantified in the laboratory. In this study, the effects of the limnological attributes on the spectral curves were verified. The distribution of chlorophyll-*a* concentrations in the reservoir varied spatially and over the years 2018 and 2019. The lowest values for the attribute were observed in the collections carried out in December 2018 and July 2019. The results found exceed the Class II water quality limit in most of the collections carried out in the period 2018 and 2019. The lowest concentrations of suspended solids were observed in June 2018, reaching values close to 0.29 mg L⁻¹ for SST and SSV in the point P 02. This fact may be related to the distribution of precipitation, which during the months preceding the collection, was not registered more intense rains. For the same period, point P 01 had the highest concentration, with values close to 4.00 mg L⁻¹ of TSS. The observed transparency varied from 0.32 m to 1.45 m. The highest values were observed in the first half of 2018, the period corresponding to the end of the rainy season in the region. The analysis of spectral data was performed using the visible range (between 400 and 700 nm) and the near infrared range (up to 900 nm). The spectral behavior of water when there is the presence of chlorophyll-*a* showed absorption and reflectance peaks that vary according to the concentrations of chlorophyll-*a* and/or suspended solids. The correlation coefficients (*r*) obtained were 0.569 (chlorophyll-*a*), 0.875 (suspended sediments) and 0.879 (transparency). The models presented in the calibration stage showed moderate and high coefficients of determination (*R*²), 0.5629 (chlorophyll-*a*), 0.7623 (suspended sediments) and 0.77 (transparency). The good performance of the models, using the spectral data, show the feasibility of remotely estimating the concentrations of SST and transparency in superficial semi-arid reservoirs. The model developed to estimate the concentration of chlorophyll-*a* needs to be improved. It is necessary to validate regression models to estimate the limnological variables.

Keywords: Water quality. Limnological attributes. Spectral data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação da interação dos elementos essenciais para o SR.	18
Figura 2 - Localização geográfica da área de estudo com os pontos de coleta no reservatório General Sampaio, Ceará.	21
Figura 3 - Classes de Solos da Sub-bacia do Reservatório General Sampaio.	22
Figura 4 - Declividade da Sub-bacia do Reservatório General Sampaio.	23
Figura 5 - Fluxograma das atividades realizadas.	26
Figura 6 - Precipitação pluviométrica e volume do reservatório General Sampaio de 2014 a 2019.	28
Figura 7 - Concentração de clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$ para o reservatório General Sampaio, entre os anos de 2018 e 2019.	30
Figura 8 - Concentrações de sólidos suspensos para o reservatório General Sampaio de 2014 a 2019.	32
Figura 9 - Transparência da água do reservatório General Sampaio, nos anos de 2018 e 2019.	34
Figura 10 - Imagens orbitais do satélite Landsat 8, sensor OLI/TIRS, para as seguintes datas: (A) 13/06/2018; (B) 06/12/2018; (C) 18/07/2019; (D) 22/10/2019; (E) 09/12/2019.	35
Figura 11 - Resposta espectral do sistema aquático do reservatório General Sampaio, para as seguintes datas: 11/06/2018 (A); 18/07/2019 (B); 21/10/2019 (C); 10/12/2019.	38
Figura 12 - Correlograma simples do fator de reflectância e concentrações de clorofila-a.	39
Figura 13 - Correlograma simples do fator de reflectância e a concentrações de sedimentos suspensos.	40
Figura 14 - Correlograma simples do fator de reflectância e a transparência (m).	40
Figura 15 - Correlograma 2D entre o FRB e as concentrações de clorofila-a.	41
Figura 16 - Correlograma 2D entre o FRB e as concentrações de sedimentos suspensos.	42
Figura 17 - Correlograma 2D entre o FRB e a transparência.	42
Figura 18 - Modelo de estimativa da concentração de clorofila-a dos comprimentos de ondas 759 e 824 nm, para o reservatório General Sampaio.	43
Figura 19 - Modelo de estimativa da concentração de SST dos comprimentos de ondas 663 e 720 nm, para o reservatório General Sampaio.	44
Figura 20 - Modelo de estimativa da transparência no comprimento de onda 705 nm, para o reservatório General Sampaio.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDOM	Matéria orgânica dissolvida
cm	Centímetros
COAs	Constituintes Opticamente Ativos
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
d	Índice de Willmott
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EMA	Erro Médio Absoluto
FAO	Food And Agriculture Organization Of The United Nations
FRB	Fator de Reflectância Bidirecional
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
km ²	Quilômetro quadrado
L	Litro
LAQA	Laboratório de Química Ambiental
mg	Miligrama
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
NSE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
r	Coefficiente de correlação
R ²	Coefficiente de determinação
REM	Radiação eletromagnética
REMQ	Raiz do erro médio quadrático
SR	Sensoriamento remoto
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
SSF	Sólidos suspensos fixos
SST	Sólidos suspensos totais
SSV	Sólidos suspensos voláteis
UFC	Universidade Federal do Ceará
ug	Micrograma

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Águas superficiais	14
2.2 Qualidade de água	15
2.2.1 Eutrofização	16
2.3 Sensoriamento remoto	17
2.3.1 Comportamento espectral da água	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Localização geográfica e caracterização geral	21
3.2 Dados limnológicos e hidrometeorológicos	24
3.3 Dados de sensoriamento remoto	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Avaliação das variáveis limnológicas	27
4.2 Clorofila-<i>a</i>	29
4.3 Sólidos suspensos	30
4.4 Transparência	32
4.5 Sensoriamento remoto	34
4.6 Análise dos dados espectrais	36
4.7 Correlação e análise dos modelos	38
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a sobrevivência dos seres vivos, a manutenção e a conservação dos ecossistemas (WOLKMER; PIMMEL, 2013) e, apesar de ser o principal constituinte da superfície terrestre, sua distribuição irregular a torna um recurso escasso em várias regiões do planeta (OLIVO; ISHIKI, 2014).

Segundo Tucci (2021), a demanda por água aumentou seis vezes no último século devido ao crescimento populacional. Com o desenvolvimento econômico das cidades e o aumento da urbanização, a demanda por abastecimento de água se torna cada vez maior. No setor agrícola ocorre a necessidade de produzir mais alimentos e para isso, mais água tende a ser destinada à irrigação e à alimentação animal. Como consequência dessa expansão, fontes de água são deterioradas, ocasionando problemas com a oferta e com a disponibilidade para o consumo humano.

No semiárido brasileiro, este recurso é ainda mais afetado devido as características climáticas intrínsecas da região, como o baixo índice pluviométrico e a sua má distribuição (LOPES *et al.*, 2014). Além dessa peculiaridade, as ações antrópicas, como o uso e ocupação irregular do solo e das margens dos corpos hídricos, ausência de rede de tratamento da água e esgoto e a ineficiência da gestão e monitoramento dos recursos hídricos, reduzem ainda mais a sua disponibilidade para a população (MENDONÇA, 2018).

Nesse contexto, é fundamental que ocorra a preservação e a avaliação da qualidade das águas superficiais, principalmente para o consumo humano, sendo necessários programas de monitoramento das suas características químicas, físicas e biológicas. Logo, o uso de técnicas que avaliem a sua modificação no tempo e no espaço, bem como os problemas emergentes, auxiliam na definição de planos de gerenciamento e na projeção de cenários futuros que garantam o uso sustentável dos recursos hídricos (CUNHA *et al.*, 2013; MACHADO; BAPTISTA, 2016).

Dessa forma, o uso do sensoriamento remoto, através das respostas espectrais de corpos hídricos continentais ou marinhos, surge como uma ferramenta complementar aos programas de monitoramento usuais, no qual torna possível a avaliação do ambiente aquático, permitindo a estimativa de componentes orgânicos e inorgânicos responsáveis pela deterioração da qualidade da água (BARBOSA *et al.*, 2019)

Portanto, objetivou-se avaliar o estado qualitativo das águas, quanto às concentrações de clorofila-*a*, sólidos suspensos e transparência, utilizando dados limnológicos e de sensoriamento remoto em reservatório da região semiárida no estado do Ceará.

Objetivos específicos:

- Analisar os dados limnológicos, medidos *in situ* e laboratório, e os dados espectrais da água;
- Desenvolver modelos espectrais para estimativa das concentrações de clorofila-*a* e sedimentos suspensos na água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Águas superficiais

A água é o recurso natural mais abundante na Terra. Entretanto, apesar de 70% da superfície terrestre serem cobertas por água, menos de 1% desta é doce. Cerca de 98% da água concentram-se nos oceanos, aproximadamente 109 mil km³ (TUNDISI, 2020). Devido ao crescimento populacional associado a expansão da agricultura a partir da década de 1960, Gleick (2003) afirma que o ciclo hidrológico já se encontra no limite da renovação.

Segundo Souza Neto (2019), dentre aproximadamente 1,4 milhões de km³ de água disponível, apenas 0,8% são de água doce. Desse percentual, somente 3% encontram-se na forma superficial, como os rios, os lagos, os reservatórios e as lagoas, sendo o restante correspondente a águas subterrâneas. Apesar desse imenso volume, este recurso é um bem limitado e a sua exploração precisa ser racional para garantir o abastecimento humano e o equilíbrio ecológico.

O crescimento da urbanização sem infraestrutura sanitária adequada corrobora para o lançamento de efluentes não tratados nos corpos d'água, sendo responsável pela contaminação dos recursos hídricos. As ações antrópicas não se limitam apenas a este fato, a retirada das matas ciliares e o lançamento de poluentes (dejetos de animais, insumos agrícolas, etc.) oriundos do setor agrícola e industrial são exemplos de ações nocivas à qualidade da água e à sua disponibilidade (ANDRADE *et al.*, 2007). Da água doce disponível no planeta utilizada pela população, cerca de 85% são destinadas à agricultura, principalmente para a irrigação, 10% para a indústria e seus processos. Apenas 5% da água doce disponível são voltados para o abastecimento doméstico (BRAGA *et al.*, 2014).

A pouca disponibilidade de água de boa qualidade faz com que a população utilize água de baixa qualidade. Os impactos sociais provocados pela ingestão de água imprópria são inúmeros. Para a Organização Mundial de Saúde (OMS), cerca de 80% das doenças no mundo são causadas pelo consumo de água contaminada. Doenças como hepatite, cólera, diarreias e esquistossomose afetam grande parte da população em condições de vulnerabilidade (MENDONÇA; MOTTA, 2007).

As condições climáticas também afetam quantitativa e qualitativamente os recursos hídricos. Apesar do Brasil encontrar-se entre os países mais ricos em água doce do mundo, o semiárido brasileiro sofre com a variabilidade temporal e espacial da precipitação

pluviométrica, além de possuir elevadas taxas de evaporação e baixa eficiência de armazenamento, agravando o cenário de escassez hídrica (LIMA, 2020). Vale salientar que o semiárido brasileiro é a região seca do globo de maior densidade demográfica, com 27 milhões de habitantes, aproximadamente (ANDRADE, 2017).

A distribuição de água doce não ocorre de forma equitativa no país, tendo em vista que a região Nordeste concentra apenas 3% da água e cerca de 30% da população brasileira (MENDONÇA, 2018), enquanto que a região Norte detém cerca de 70% da água disponível do país e possui menor densidade populacional (OLIVO; ISHIKI, 2014). Devido às características inerentes ao clima da região citadas anteriormente, foi criado pelo Governo Federal do Brasil uma política de obras para garantir o abastecimento da população, como a criação de reservatórios artificiais.

No Ceará, os reservatórios são as principais reservas hídricas que permitem o abastecimento da população e o desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais. Entretanto, o despejo de esgotos e insumos agrícolas/industriais, sedimentos carreados devido à falta da mata ciliar, dentre outros afetam essas reservas, provocando variações no estado trófico da água, resultando na eutrofização. Este processo gera o aumento da biomassa vegetal, na qual reduz a qualidade da água dos reservatórios. Logo, o custo com o tratamento da água para o consumo se eleva, agravando os problemas sociais (LOPES, 2013).

Segundo Lopes *et al.* (2014), a avaliação da qualidade da água é uma ferramenta importante na gestão dos recursos hídricos, onde deve-se acompanhar as mudanças em função do tempo, possibilitando assim, a intervenção com medidas preventivas e a avaliação das medidas adotadas pelos órgãos competentes. Assim, o monitoramento dos reservatórios quanto a disponibilidade e qualidade do recurso fornece informações para uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

2.2 Qualidade de água

A qualidade da água é dependente dos fatores naturais (como as características de solo, relevo e clima) e das ações antrópicas (ex. atividades agrícolas, industriais, mineração, dentre outras) que ocorrem no ambiente e são responsáveis pela sua deterioração. De acordo com a Norma Brasileira (NBR) nº 9896 de 1993, a qualidade do recurso é resultado de características organolépticas, físicas, químicas e biológicas. Logo, a sua avaliação permite identificar alterações em suas propriedades, sendo possível destinar o recurso em função do uso (agricultura, geração de energia, consumo humano, dentre outros) (ABNT, 1993).

Nesse sentido, a Resolução nº 357 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe sobre as classificações dos corpos d'água, diretrizes ambientais, padrões de lançamento de efluentes e os limites aceitáveis (BRASIL, 2005). A partir dessas instruções, torna-se possível o monitoramento e classificação da qualidade da água e a viabilidade do tratamento para atender as necessidades da população (GUTIERREZ, 2016).

De acordo com Machado (2016), o monitoramento da qualidade da água deve ser realizado para promover a preservação e recuperação do ambiente aquático, em especial os que possuem finalidade de abastecimento à população. No estado do Ceará, essa atividade é realizada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH e as informações sobre as bacias hidrográficas e os reservatórios estão disponíveis no Portal Hidrológico.

Os estudos voltados para a avaliação da qualidade de água têm se intensificado nos últimos anos. Em um estudo realizado por Cunha *et al.* (2019) nos reservatórios do semiárido, os autores concluíram que as atividades antrópicas foram responsáveis pela degradação do recurso, devido aos teores excessivos de carga orgânica e de nutrientes. Além disso, os parâmetros analisados não estavam em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para as águas Classe II.

As modificações das características morfológicas das bacias hidrográficas ocorrem devido as atividades antrópicas, pois são responsáveis pela alteração na dinâmica e no equilíbrio dos corpos d'água. Deste modo, a disponibilidade da água para a realização das atividades antrópicas ou industriais são reduzidas, afetando diversos setores econômicos e sociais (MIRANDA *et al.*, 2015).

Como resultado dessas alterações, o processo de eutrofização se torna presente nos ambientes aquáticos, afetando negativamente a qualidade da água. Logo, o monitoramento é importante para a avaliação da influência antrópica e do funcionamento ecológico de rios, lagos e reservatórios (CUNHA; CALIJURI; LAMPARELLI, 2013).

2.2.1 Eutrofização

O processo de eutrofização encontra-se cada vez mais evidente em mananciais superficiais, sendo considerado um grande problema para o gerenciamento dos corpos hídricos. Este processo ocorre a partir do excesso e enriquecimento de nutrientes, em destaque o nitrogênio (nitrito, nitrato e amoniacal) e o fósforo (fosfatos e fósforo orgânico), oriundos de atividades antrópicas ou de fontes naturais, que afluem por cargas pontuais ou difusa, acarretando no crescimento excessivo de fitoplânctons (FERREIRA, 2012).

Como consequência da alteração da eutrofização, decorrem desequilíbrios que comprometem o ecossistema aquático e a sua sustentabilidade. Segundo Watanabe et al. (2015), algumas espécies de cianobactérias produzem toxinas que podem provocar doenças no sistema nervoso e no fígado. Ademais, ocorre também distúrbios com mosquitos e insetos, a redução do oxigênio dissolvido, morte dos peixes, maus odores e redução da capacidade de navegação (SPERLING, 2005). Os custos de tratamento se elevam devido aos usos de produtos químicos, ocasionando maior dificuldade de abastecimento à população.

Para caracterizar os estágios da eutrofização de um reservatório, por exemplo, utiliza-se os graus de trofia: ultraoligotrófico, oligotrófico, oligomesotrófico, mesotrófico, mesoeutrófico, eutrófico, eupolitrófico, hipereutrófico (listados em ordem crescente). Com o objetivo de identificar a similaridade limnológica entre pontos de coletas *in situ* no açude Orós, Ceará, Batista *et al.* (2013), classificaram a parte sudoeste do reservatório como mesotrófico e os demais pontos como eutróficos, possibilitando que as autoridades competentes se pronunciem para a adequação do recurso para o consumo humano.

A avaliação da biomassa vegetal pode ser mensurada por meio da concentração de clorofila-*a*, que sofre influência da temperatura, transparência e dos nutrientes (BATISTA *et al.* 2014). Para que sejam tomadas as medidas cabíveis pelas autoridades, a identificação e o monitoramento devem ser frequentes; no entanto, as ferramentas para tal são onerosas e demandam tempo. Logo, o monitoramento remoto pode ser utilizado como alternativa para avaliação destes organismos, por ser uma ferramenta de baixo custo e por oferecer uma visão sinóptica do ambiente.

Como medidas mitigadoras da poluição e contaminação hídrica, o monitoramento da qualidade de água se torna indispensável e o sensoriamento remoto como ferramenta complementar ao monitoramento "*in situ*", pode ser uma alternativa viável para melhorar o seu gerenciamento pelos órgãos competentes.

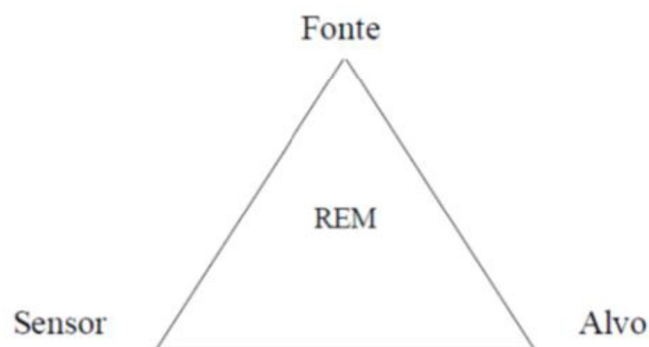
2.3 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto (SR) é descrito por Novo (2010) como uma técnica para a obtenção e transmissão de dados à distância, onde não há contato físico com o alvo (vegetação, solo, água etc.). Essa técnica é empregada de forma complementar aos estudos de monitoramento em escalas temporais e espaciais, fornecendo uma visão sinóptica dos ambientes aquáticos (LOPES *et al.*, 2014). Com o objetivo de identificar as fontes que ocasionavam o aumento da turbidez da água do Reservatório da Usina de Três Marias, Sausen

(1980) encetou as primeiras pesquisas em SR no INPE, indicando potencial da ferramenta para demonstrar mudanças qualitativas na água do reservatório.

A aquisição de dados se torna possível devido à presença de sensores e equipamentos instalados em aeronaves, satélites e outras plataformas, onde ocorrem os registros e as análises da interação entre o alvo estudado e a radiação eletromagnética (REM). O Sol é principal fonte natural de energia dos sensores passivos em forma de REM que ilumina o alvo e os sensores são responsáveis pela coleta e pelo registro da REM refletida ou emitida (BARBOSA *et al.*, 2019). Além das fontes naturais de radiação, existem as fontes artificiais dos sensores ativos, como radares, lasers e lâmpada. A partir da Figura 1, é possível compreender essa interação.

Figura 1 – Representação da interação dos elementos essenciais para o SR



Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

O comprimento de onda (λ) é um parâmetro da REM que está associado à velocidade de propagação da onda e sua frequência (ν), e é formado pela distância entre dois pontos semelhantes, expresso em micrometro (μm) (BARBOSA *et al.*, 2019). Já a frequência representa as vezes em que a radiação atinge um ponto em um determinado tempo (JENSESN, 2009). Quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda.

A REM pode ser entendida como a energia que varia em magnitude, em forma de um campo eletromagnético perpendicular a um campo elétrico, na qual propaga-se pelo vácuo à velocidade da luz ($299.702.458 \text{ m s}^{-1}$) (JACHINTO, 2003). A interação dessa radiação com o meio é explicada pelos modelos ondulatório e quântico. Ao atingir a coluna de água, a radiação sofre alterações em sua intensidade e na sua composição espectral devido a sua interação com o meio (alvo) (NOVO; PONZONI, 2001). Logo, torna-se possível a obtenção de informações qualitativas do corpo d'água por meio da assinatura espectral dos componentes opticamente

ativos (COAs) devido a interação entre a energia e esses elementos (WATANABE *et al.*, 2010).

Dentre os objetivos dessa técnica em ambientes aquáticos, destaca-se a determinação quantitativa e a realização do mapeamento da variabilidade espacial dos COAs que alteram a qualidade do recurso. Os principais componentes opticamente ativos na água são: pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica, sedimentos em suspensão, dentre outros (RUDORFF *et al.*, 2007; JENSEN, 2009). A partir da quantificação desses elementos é possível determinar o estado trófico e as condições biofísicas do sistema.

Em estudo para avaliar os COAs presentes na água em reservatório da região semiárida, Lopes *et al.* (2018) utilizou dados de sensoriamento remoto hiperespectrais *in situ* e os quantificou, concluindo que é possível a avaliação da água em sistemas aquáticos por meio de dados espectrais. Outros autores corroboram com a utilização da ferramenta no monitoramento: Mendocça (2018); Machado; Baptista, (2016). Ponte *et al.* (2020), estimou em seu trabalho as concentrações de clorofila-*a* e de sedimentos suspensos em reservatório do semiárido brasileiro, utilizando imagens orbitais do satélite Landsat 8.

2.3.1 Comportamento espectral da água

Todos os elementos da superfície terrestre refletem e absorvem energia eletromagnética de forma particular nas faixas do espectro da luz incidente, pois cada alvo possui uma composição molecular que o difere. Assim, compreende-se que cada alvo possui uma assinatura espectral única, tanto a água como o solo, por exemplo, possibilitando a aquisição de informações. De acordo com Ferreira (2012), o comportamento espectral é a mensuração da sua reflectância em faixas espectrais adjacentes e estreitas ao longo da região reflexiva do espectro eletromagnético. Além da composição molecular, outros fatores influenciam na interação e na variabilidade das respostas entre a radiação e o alvo, como as condições atmosféricas, textura e densidade.

O comportamento espectral da água varia de acordo com o seu estado físico e com a presença de substâncias particuladas e dissolvidas (NOVO, 2010). No seu estado de pureza, a água possui comprimentos de ondas mais curtos da radiação eletromagnética (REM), entre 380 nm e 700 nm, e apresentam coloração mais azulada por refletir mais energia na faixa do azul (BARBOSA *et al.*, 2019). Em ambientes aquáticos, a reflectância sofre modificações devido a presença dos Constituintes Opticamente Ativos (COAs), como os pigmentos fotossintetizantes em organismos fitoplactônicos (clorofila-*a*) e os sedimentos inorgânicos em

suspensão (silte e argila) (MOBLEY, 2004; KIRK, 2011).

A Clorofila-*a* (Cl-*a*) é um indicativo da presença da biomassa fitoplanctônica, na qual a reflectância da água varia da região do azul (400 a 500 nm) para o verde (500 a 578 nm) e um aumento da energia refletida na região do vermelho (600 a 700 nm). Logo, as altas concentrações deste pigmento apresentam coloração esverdeada. (BARBOSA, 2005).

A quantidade de sólidos suspensos possui relação direta no comportamento espectral da água devido à diminuição de sua transparência, onde observa-se uma redução na reflectância nos comprimentos de onda mais longos (FERREIRA, 2009). À medida em que a concentração de sedimentos cresce, a energia refletida na região do visível aumenta, sofrendo uma redução na faixa entre 700 e 750 nm e em seguida ocorre uma elevação na faixa de 800 nm (LOPES, 2013).

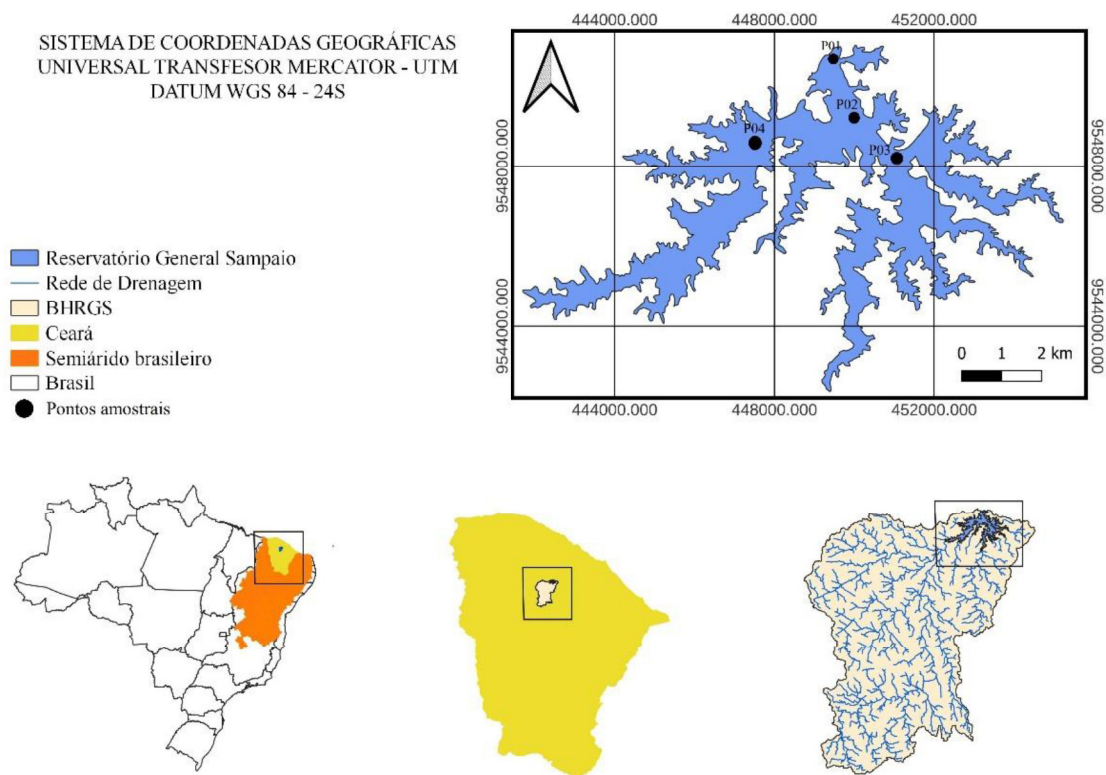
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização geográfica e caracterização geral

A área do estudo compreende o Reservatório General Sampaio, pertencente a bacia hidrográfica do Rio Curu, localizada ao noroeste do Ceará, no município de General Sampaio, Brasil (Figura 2), nas coordenadas geográficas 4° 03' 10" Sul e 39° 27' 16" Oeste.

O reservatório é considerado o 9º maior do Estado, com capacidade de 322,2 hm³, com área de aproximadamente 1.593 km² e perímetro de 312,06 km. A área de drenagem da bacia é de 8.534 km², cerca de 5,76% do território cearense, tendo como o principal afluente o rio Canindé. A barragem foi projetada e construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS, durante os anos de 1950 e 1957.

Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo com os pontos de coleta no reservatório General Sampaio, Ceará



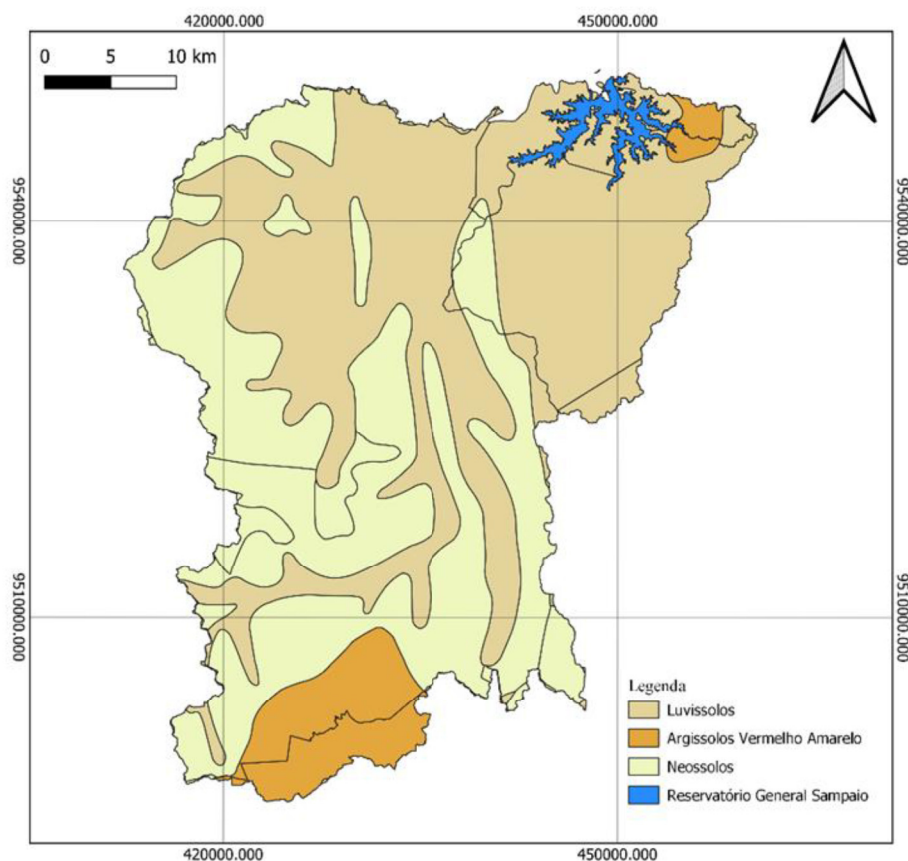
Fonte: Autor.

De acordo com o Inventário Ambiental da Companhia de Gestão dos Recursos

Hídricos – COGERH (2011), o clima do município de General Sampaio é descrito como BSh'w', na classificação de Köppen, ou seja, semiárido quente, com chuvas predominantes no outono, com temperaturas médias acima de 18 °C, sendo considerado semiárido quente. O período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro e junho e o seco entre os meses de julho a dezembro. Além disso, a região que possui irregularidade no regime pluviométrico e baixa nebulosidade. A média histórica da precipitação pluviométrica anual é de 750 mm.ano⁻¹. Os índices de evaporação são elevados, em torno de 1.899 mm anuais (ANDRADE, 2017).

As classes de solos predominantes na BHRGS são os Luvisolos Crômicos, os Neossolos Litólicos e os Argissolos Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2018), representados na Figura 3. Os luvisolos são caracterizados pela elevada saturação por bases e pequena profundidade, enquanto que os Argissolos Vermelho-Amarelo apresentam baixa fertilidade e alta susceptibilidade à erosão. Os Neossolos Litólicos, assim como os luvisolos, são rasos e possuem declives acentuados e rochas. (EMBRAPA, 2018).

Figura 3 – Classes de Solos da Sub-bacia do Reservatório General Sampaio



Fonte: Embrapa (2021), adaptado por Ponte (2021).

A região possui vegetação de caatinga arbustiva, em manchas mais ou menos

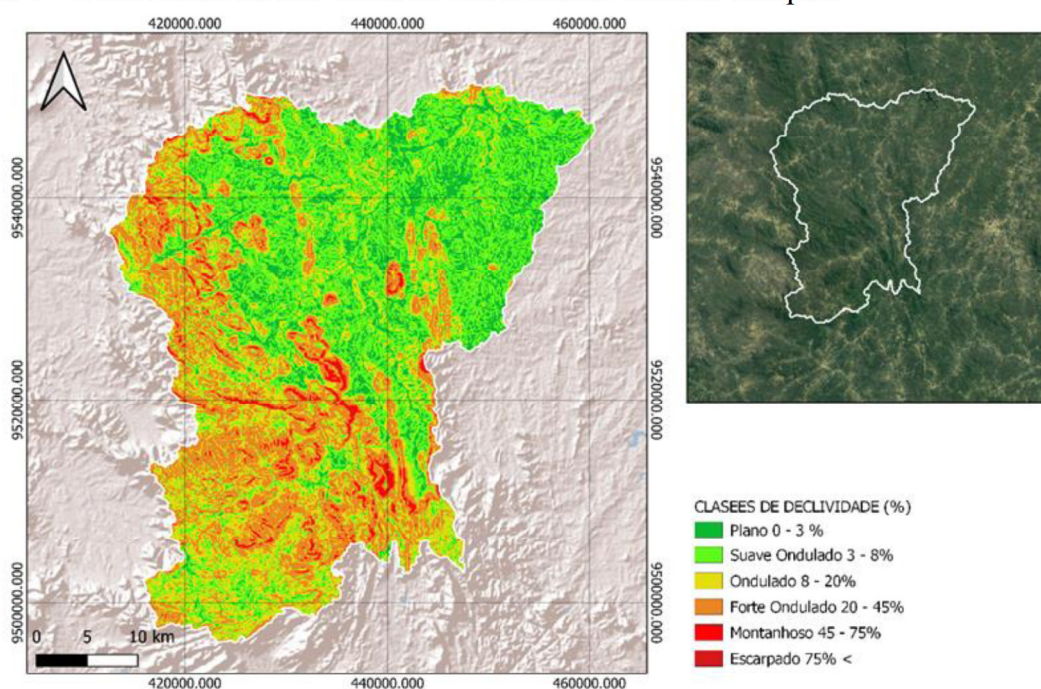
densas. A cobertura vegetal da área da bacia encontra-se pouco preservada, com cerca de 16,17% sem cobertura vegetal (COGERH, 2011). Contudo, o desmatamento prevalece devido as atividades agrícolas de subsistência, pecuária, retirada da vegetação para a obtenção de lenha ou para urbanização, sendo estas atividades observadas no entorno do reservatório e no município de General Sampaio (COGERH, 2011).

As atividades agrícolas praticadas na área da bacia, de acordo com Souza *et al.* (2012), são: pecuária extensiva, agro-extrativismo e agropecuária diversificada. Em relação a agricultura de subsistência predominam o milho, o feijão, a mandioca, a cana-de-açúcar, a banana e o caju (IBGE, 2009).

A região sudoeste da bacia possui um relevo montanhoso, com declividade maior ou igual a 45% e compartimentação representada principalmente por: planícies fluviais, depressão sertaneja e maciços residuais. Enquanto na porção norte/nordeste predominam os relevos planos e suave ondulado, como demonstrado na Figura 4. Existe ainda uma ampla variação das altitudes, nas quais variam entre 10 m até aproximadamente 1050,0 m de altitude, destacando-se os maciços residuais, monólitos de dimensões variadas.

As rochas de embasamento cristalino, compostos por gnaisses migmatíticos e granitos estão associadas aos restos de supracrustais em faixas preenchidas por xistos, quartzitos, metacalcários e anfíbolitos. Ademais, existem áreas de coberturas constituídas por sedimentos detríticos conglomeráticos, arenosos a argilosos (COGERH, 2011).

Figura 4 – Declividade da Sub-bacia do Reservatório General Sampaio



Fonte: Autor.

3.2 Dados limnológicos e hidrometeorológicos

Foram avaliados os atributos Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Fixos (SSF) e Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) em mg L^{-1} e Clorofila-*a* (mg L^{-1}) referentes ao período compreendido entre 2014 e 2019. As campanhas de coletas em campo foram realizadas pelos integrantes do Grupo de pesquisa e extensão Manejo de Água e Solo no Semiárido – MASSA, em quatro pontos amostrais: P01 (tomada d'água), P02 (próximo a piscicultura), P03 (riacho Salvação) e o P04 (rio Curu).

A transparência da água foi determinada *in situ* por meio do disco de Secchi e as amostras de água foram coletadas com 30 cm de profundidade da superfície em garrafas plásticas de 1L higienizadas e posteriormente armazenadas em caixas isotérmicas com gelo para preservação do material. Em seguida, foi realizado a quantificação dos atributos: SST, SSF e SSV, no Laboratório de Manejo de Solos, pertencente ao Departamento de Ciências do Solo (UFC), a partir da metodologia proposta por APHA *et al.* (2005). As coletas de água foram realizadas juntamente às coletas dos dados espectrais.

Os sólidos suspensos são divididos em: Sólidos Suspensos Fixos (SSF), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) e Sólidos Suspensos Totais (SST), somatório das duas frações (SSF e SSV). Os SST são os materiais particulados não dissolvido na água, composto por partículas inorgânicas e orgânicas, inclusive os organismos planctônicos, resultando na diminuição da transparência da água (PARANÁ, 2008).

As análises de Clorofila-*a* foram realizadas no Laboratório de Química Ambiental (LAQA/UFC), por meio da Extração a quente com Metanol – Espectrofotométrica (JONES, 1979).

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos no site da FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, e o volume do açude no site da Companhia Gestão de Recursos Hídricos – COGERH.

3.3 Dados de sensoriamento remoto

As medidas espectrais foram realizadas *in situ* a partir da radiância espectral da água do reservatório utilizando o espectrorradiômetro ASD FieldSpec®3 Hi-Res, que possui resolução espectral de 1,4 nm, com faixa espectral entre os intervalos de 350 a 2500 nm. Além disso, foi utilizada a placa de referência de Spectralon, que representa a superfície lambertiana para realização da calibração do equipamento. As medições da radiancia foram realiadas entre

10 e 14 horas, período correspondente ao menor ângulo de inclinação solar e um maior fluxo de energia no campo de irradiação, além de apresentar condições ambientais favoráveis.

Todos os dados espectrais foram coletados de acordo com a metodologia proposta por Milton (1987), onde é necessário preservar as mesmas condições de iluminação e da superfície de água. O espectrorradiômetro foi posicionado com eixo de visada de 45° de inclinação em relação à vertical, nos pontos onde foram realizadas as coletas e de 90° de azimute, tendo a posição do sol como referência.

Em cada ponto amostral foram realizadas 10 medições de radiância da água, para evitar e eliminar as não representativas e, posteriormente calcular a média para as restantes. Os valores de radiância espectral foram convertidos em fator de reflectância bidirecional conforme a Equação 1:

$$FBR\lambda = La,\lambda / Lr,\lambda \quad (1)$$

Em que:

FRB λ - fator de reflectância bidirecional (adimensional)

La, λ - radiância espectral do alvo (W cm⁻² sr⁻¹ μ m⁻¹)

Lr, λ - radiância espectral da placa de referência (W cm⁻² sr⁻¹ μ m⁻¹).

Para avaliar estatisticamente a intensidade da relação linear dos modelos desenvolvidos, foram calculados os indicadores estatísticos utilizados nessa avaliação foram: coeficiente de correlação (r); coeficiente de determinação (R²).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, na qual o coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 (zero) significa que não existe uma relação linear, já o valor 1 indica que existe uma relação linear perfeita e o valor -1 também indica que existe uma relação linear perfeita inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui.

O coeficiente de determinação (R²), é definido como a porcentagem da variação de uma variável dependente explicada pela variável independente, como demonstrado na equação 2.

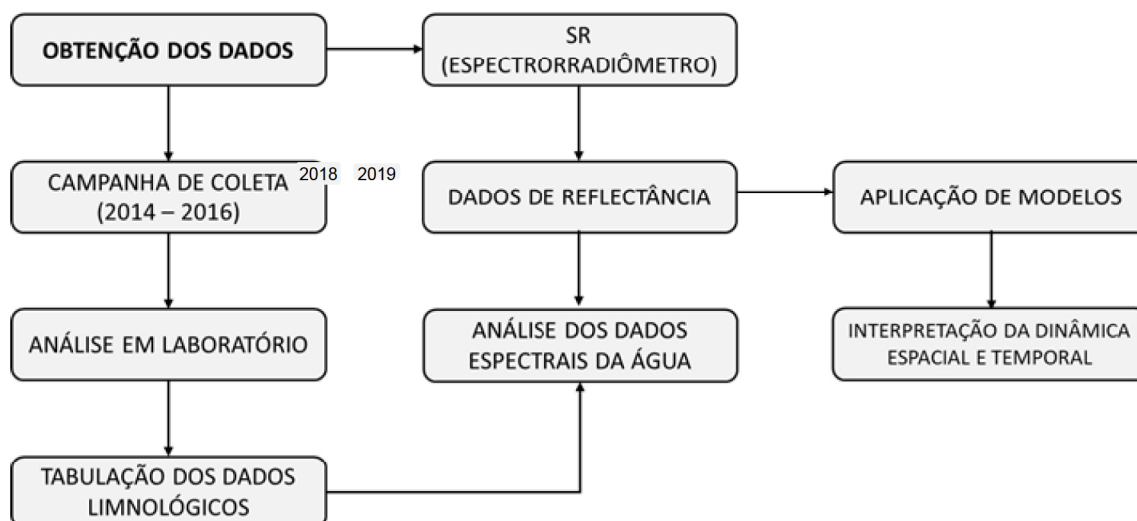
$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2) \cdot (\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}} \right]^2 \quad (2)$$

Os gráficos de correlação bidimensional para a análise de correlação de uma variável dependente sobre as variáveis independentes, foram realizados a partir da ferramenta apresentada no artigo “Interactive Correlation Environment (ICE) – a *statistical web tool for data collinearity analysis*, proposto por Ogashawara *et al.* (2014). Essa técnica pode ser utilizada na estimativa de parâmetros biogeoquímicos por meio de dados espectrais.

A aquisição de imagens foi realizada com base em imagens orbitais captadas pelo sensor OLI, instalado a bordo do satélite Landsat-8 e disponibilizadas na página da United States Geological Survey (USGS).

A Figura 5 representa o resumo da metodologia geral.

Figura 5 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das variáveis limnológicas

Os resultados qualitativos e quantitativos observados no reservatório, advieram de fatores externos e internos, como a sazonalidade climática, o regime pluviométrico, o uso e ocupação do solo na bacia, dentre outros fatores (LOPES, 2018). Portanto, a dinâmica observada em um sistema aquático encontra-se correlacionada aos sistemas climáticos e terrestres.

O modelo mensal e intra-anual da distribuição pluviométrica no semiárido brasileiro varia no tempo e no espaço geográfico. Existe uma predominância de chuvas durante os primeiros meses do ano, enquanto que os demais encontram-se abaixo da média climatológica. Atribuído a este fato, por vezes, algumas regiões podem receber chuvas mais intensas, enquanto na sua circunvizinhança as chuvas se apresentem mais fracas (ALMEIDA *et al.*, 2013).

O semiárido brasileiro apresenta duas estações bem definidas, o período chuvoso, correspondente aos meses de janeiro a junho, onde a máxima precipitação pluviométrica geralmente ocorre entre os meses de fevereiro a abril e o período seco (MARENGO *et al.*, 2011). A partir da Figura 6, é possível observar essa variação. Nota-se que as precipitações ocorrem durante os primeiros meses do ano no período estudado.

Em 2018, a precipitação total observada foi de aproximadamente 510 mm, cerca de 32% a menos que a média histórica da região semiárida, de acordo com Andrade (2017). Os eventos com maior altura pluviométrica ocorreram no início da estação chuvosa, porém o maior evento registrado ocorreu no mês de maio, cerca de 42 mm. Durante o período, o volume do reservatório já se encontrava reduzido, com aproximadamente 18% da sua capacidade de armazenamento. Após o período chuvoso, o seu volume atingiu 22%, uma elevação de 4%.

Já em 2019, a frequência da precipitação foi mais irregular em comparação ao mesmo período de 2018, entretanto as alturas pluviométricas observadas foram maiores, principalmente em janeiro, onde a pluviometria diária atingiu 71 mm.

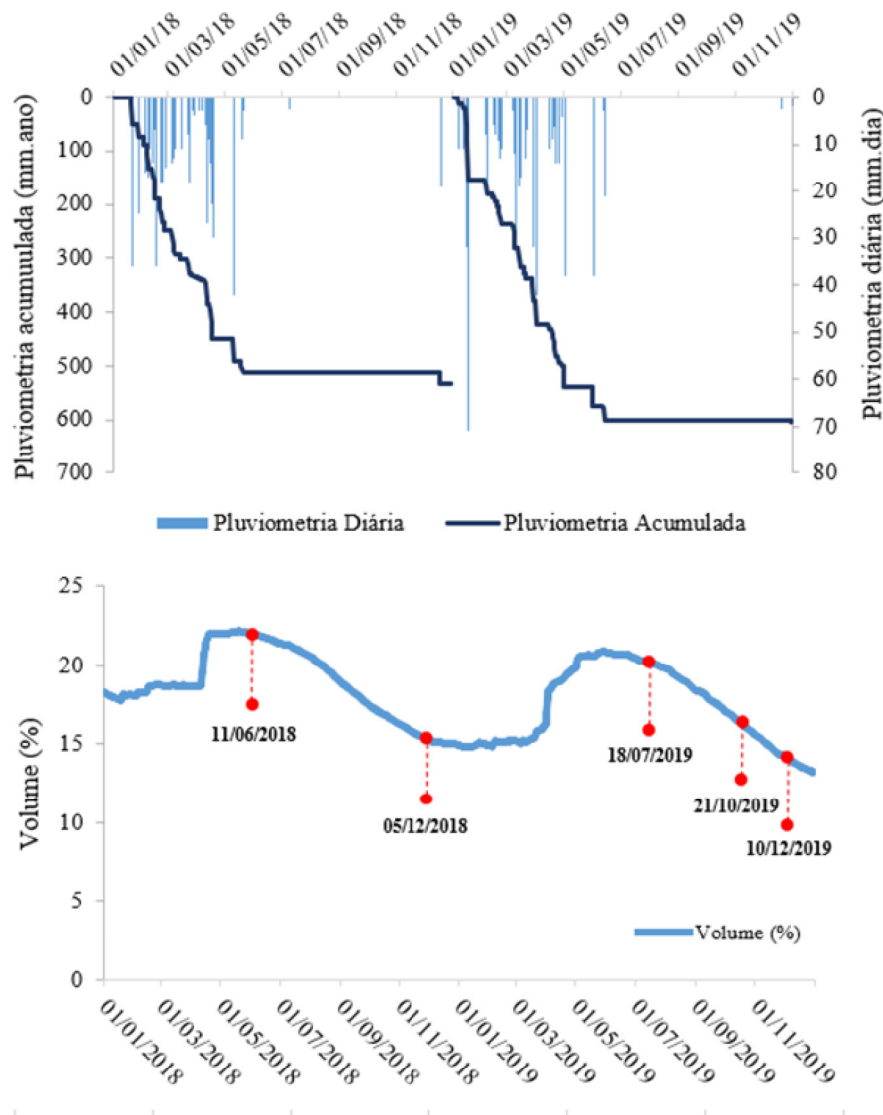
As precipitações do nordeste brasileiro são caracterizadas como muito intensas, durante um curto período de tempo, sem apresentar uma periodicidade de ocorrência bem definida, ou seja, possui uma alta variação da distribuição temporal e espacial (ANDRADE *et al.*, 2010).

Apesar de 2019 apresentar uma pluviometria anual acumulada de 600 mm, cerca de 20% a menos que a média histórica e 17% a mais que o ano anterior, o volume do reservatório

não atingiu o volume de 2018, possuindo valor máximo de 21%. Ao final do ano, o volume do General Sampaio encontrava-se em 13,5%, sendo esse menor volume observado entre 2018 e 2019.

De acordo com Andrade *et al.* (2016), a região semiárida é caracterizada pela ocorrência consecutiva de dias secos durante a estação chuvosa (veranicos) o que pode provocar uma redução no volume de água acumulada nos reservatórios, como observado no ano de 2019. Associado a este fato, tem-se que as taxas de evaporação são mais elevadas, ocasionando um déficit hídrico na região.

Figura 6 – Precipitação pluviométrica e volume do reservatório General Sampaio de 2018 a 2019



Fonte: Autor.

4.2 Clorofila-*a*

A clorofila-*a* é um dos principais pigmentos responsáveis pela fotossíntese, e a determinação da sua concentração é um indicativo da presença da biomassa de fitoplânctons e da produtividade primária (ESTEVEZ *et al.* 1998).

A concentração de clorofila-*a* é uma variável limnológica que merece destaque devido a sua importância para avaliar o estado dos corpos hídricos (MATSUSHITA *et al.*, 2015), onde os valores devem se apresentar dentro do limite padrão para qualidade das águas de Classe II, de acordo com a Resolução CONAMA Nº 357/2005, no qual este valor limite é de até 30 µg L⁻¹.

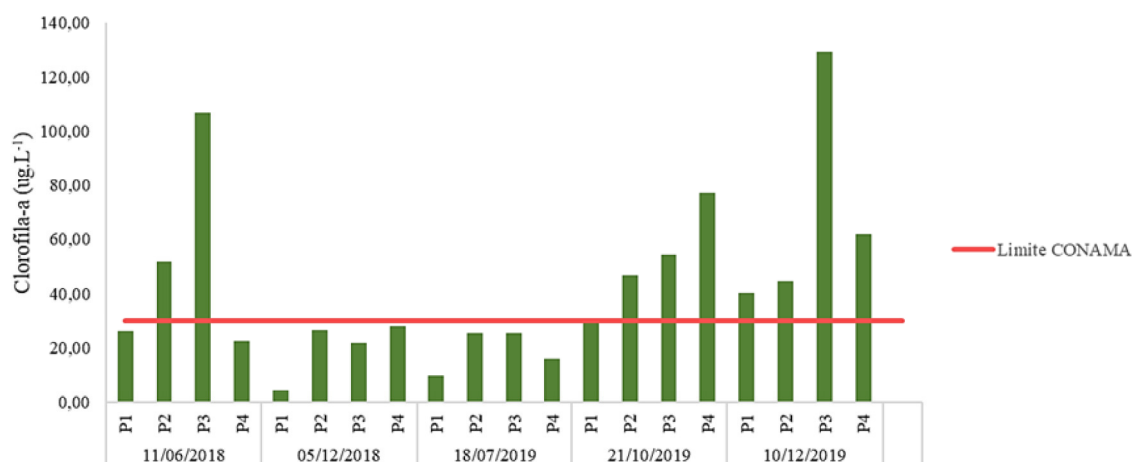
Para se determinar o estado trófico de um reservatório, utiliza-se a variável clorofila-*a*, no qual está diretamente relacionado ao processo de eutrofização, sendo possível mensurar a biomassa das espécies algáceas. Logo, o seu monitoramento deve ser realizado periodicamente, pois a partir da avaliação da concentração deste pigmento, determina-se as condições tróficas e a presença de fontes de poluição (MENDONÇA, 2018). Vale ressaltar que as concentrações do atributo variam de acordo com o período do ano estudado, no qual sofre influência de alguns aspectos, como: atividades agrícolas e seus resíduos, condições de relevo, densidade populacional, precipitação pluviométrica e outros fatores (KAISER *et al.*, 2015).

A distribuição dos valores das concentrações de clorofila-*a* no reservatório é apresentada na Figura 7, onde nota-se que os valores variaram espacialmente e ao longo dos anos de 2018 e 2019. Os menores valores para o atributo foram observados nas coletas realizadas nos meses de dezembro de 2018 e julho de 2019.

Os resultados encontrados (Figura 7), ultrapassam o limite de qualidade das águas de Classe II na maioria das coletas realizadas no período de 2018 e 2019, principalmente em dezembro de 2019, atingindo o valor máximo de aproximadamente 130 µg L⁻¹ no ponto P3. Em junho de 2018, o mesmo ponto apresentou valor de 106 µg L⁻¹. Portanto, é possível afirmar que a água do reservatório estava inadequada para o consumo humano devido aos valores apresentados acima do permitido, a partir dos parâmetros estipulados pela legislação.

Para Chaves *et al.* (2019), a elevada concentração de clorofila-*a* nos reservatórios cearenses pode ser explicada pelas variações que ocorrem no nível da água, sendo influenciado pelos períodos de seca e de chuvas intensas, onde a maior concentração do pigmento foi observada durante o período seco.

Figura 7 - Concentração de clorofila-*a* em $\mu\text{g L}^{-1}$ para o reservatório General Sampaio, entre os anos de 2018 e 2019



Fonte: Autor.

Segundo Lopes (2013) e Santos *et al.* (2014), ambos em estudos avaliativos da qualidade da água em reservatório no semiárido, observaram que as maiores concentrações de clorofila-*a* ocorrem durante o período seco, devido à maior transparência da coluna d'água observada, resultado da maior incidência da radiação para a realização das atividades fotossintéticas do sistema. O mesmo foi comprovado na primeira coleta realizada neste trabalho. Na coleta de junho de 2018, os valores mais elevados de clorofila-*a* foram observados nos pontos P02 e P04, onde a transparência estava mais elevada e os sólidos suspensos voláteis reduzidos. Na coleta realizada em dezembro de 2019, não foi observada a mesma dinâmica nos pontos P01, P02 e P03 devido aos valores mais elevados de sólidos suspensos fixos. Já no ponto P04, os maiores valores de clorofila-*a* podem estar associados à maior concentração de sólidos suspensos voláteis.

Entretanto, Thomaz (2000) demonstrou que esse comportamento não é necessariamente uma regra. Em estudo da qualidade da água em reservatório de Corumbá, Mato Grosso, o referido autor concluiu que os valores de clorofila-*a* podem não apresentar uma relação linear com a transparência.

4.3 Sólidos suspensos

As menores concentrações de sólidos suspensos foram observadas em junho de 2018 (Figura 8), alcançando valores próximos a $0,29 \text{ mg L}^{-1}$ para SST e SSV no ponto P02. Este fato pode estar relacionado às precipitações pluviométricas ocorridas nos meses anteriores, no qual diluiu os componentes presentes na água com o aumento do volume. Para o mesmo

período, o ponto P01 apresentou a maior concentração, com valores próximos a 4,00 mg L⁻¹ de SST. Já no mês de dezembro de 2019, os valores de SST (12,50 mg L⁻¹) e SSV (9,0 mg L⁻¹) encontraram-se mais elevados do que os demais, possivelmente devido a elevada concentração de fitoplâncton.

Os menores valores de sólidos suspensos fixos ocorreram no ano de 2018, onde posteriormente apresentaram um aumento, com valores máximos nos pontos P02 e P03, no mês de dezembro de 2019. Os sedimentos fixos são a porção dos sólidos que resta após a ignição ou calcinação, constituído principalmente por argila (PIVELI, 2006).

A precipitação pluviométrica é um dos fatores que promove o aporte de sedimentos aos corpos hídricos (FRAGA *et al.*, 2012), e a ausência da mata ciliar ocasiona o maior desprendimento do solo devido a energia cinética dessa precipitação, acarretando no desprendimento e deposição de sedimentos na água, que contribui para o processo de eutrofização (PONTE *et al.*, 2019). Em estudo para avaliar a dinâmica dos sedimentos suspensos ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte, Amaral *et al.* (2021), concluíram que as diferenças na precipitação foram um dos fatores que mais contribuíram para a disponibilidade de sedimentos no sistema, no qual encontram-se intrinsecamente associados à sazonalidade, que apresentou uma maior competência e capacidade para o transporte de sedimentos devido erosividade das chuvas.

Segundo o Inventário Ambiental do reservatório General Sampaio (2011), os solos que predominam na região são os Neossolos Litólicos e os Luvisolos Crômicos, ambos os solos predominantes na bacia são susceptíveis à erosão. De acordo com a EMBRAPA (2018), os Luvisolos Crômicos são solos mais rasos com a presença de argila de alta atividade, denominadas argilas 2:1. Além da matéria orgânica, as argilas são responsáveis pela adsorção de cargas (ex. fósforo). Os Neossolos Litólicos também possuem menor profundidade, sendo o principal fator limitante do desenvolvimento da vegetação, principalmente espécies arbóreas com maior sistema radicular.

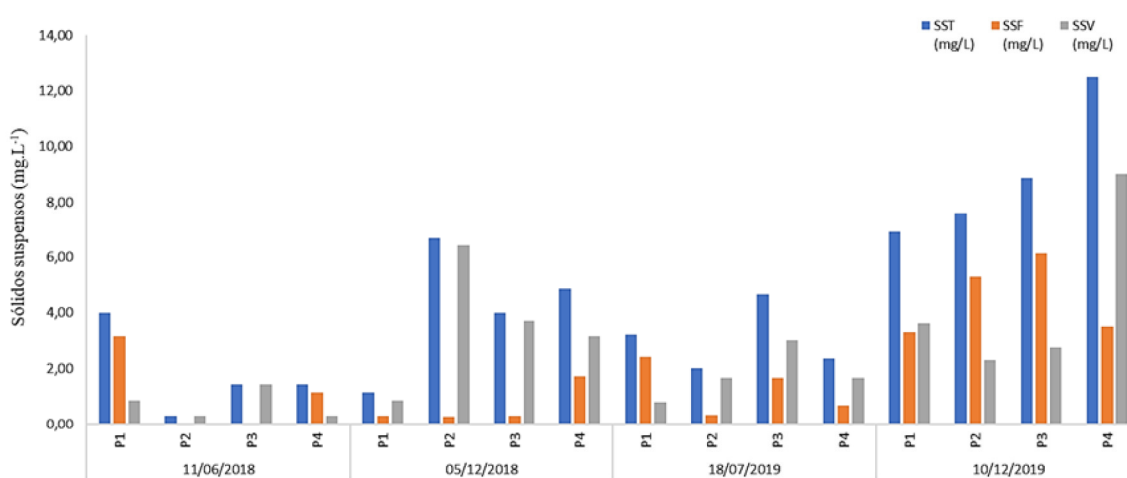
O desmatamento da área no entorno do reservatório favorece o carreamento de nutrientes e a poluição dos mananciais, devido a introdução dos principais responsáveis pelo processo de eutrofização, como o nitrogênio por meio da matéria orgânica ou dos resíduos agrícolas.

As maiores concentrações de clorofila-*a* presentes no reservatório coincidiram com as maiores concentrações de sedimentos suspensos voláteis, com exceção do mês de junho de 2018. Apesar da pluviometria ser o principal responsável pelo carreamento de sedimentos e nutrientes para o reservatório, nota-se um aumento da concentração dentro do período seco,

onde não há registros de chuvas. Este fato pode estar associado aos ventos mais intensos que provocam turbulência em toda a coluna d'água, sendo responsáveis pela ressuspensão do sedimento de fundo. Esse processo possui grande influência para o aumento da produtividade da cadeia primária neste período e para a redução da transparência (ESTEVES *et al.*, 1998), como observado na Figura 9. Durante os anos estudados, o volume do reservatório General Sampaio decresceu cerca de 10%.

Para Barbosa *et al.* (2019), as águas dos reservatórios, lagos e rios encontram-se frequentemente em movimento, ocasionando variações na presença de sólidos particulados e dissolvidos. Essa característica do movimento da água é resultado de processos físicos, que possui enorme influência sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do ambiente aquático. Nos reservatórios, o movimento dos constituintes da água ocorre por meio dos processos convectivos (movimento vertical da água) e dispersivos, principalmente.

Figura 8 - Concentrações de sólidos suspensos para o reservatório General Sampaio de 2014 a 2019



Fonte: Autor.

4.4 Transparência

A transparência observada no General Sampaio é demonstrada na Figura 9, onde nota-se uma variação de 0,32 m até 1,45 m. Os maiores valores foram observados em junho de 2018, período correspondente ao fim do período chuvoso na região. No período chuvoso ocorre o aumento do volume de água no reservatório, no qual ocasionara uma maior diluição dos componentes presentes.

No mês de junho de 2018, a pluviometria diária máxima observada foi de

aproximadamente 40 mm. Já no mês de dezembro de 2018, a transparência da água reduziu, atingindo valores aproximado de 0,60 m. Durante esse período, a pluviometria acumulada foi de 600 mm. ano⁻¹.

Os maiores valores de transparência correspondem ao período onde os valores de clorofila-*a* estavam mais elevados, com exceção do mês de junho de 2018, onde o volume do reservatório encontrava-se mais elevado em relação às outras datas de coleta. Vale salientar que, além dos eventos chuvosos, o volume do reservatório também influencia na transparência da água devido à ressuspensão das partículas provocadas pelos ventos (LOPES, 2013).

O disco de Secchi é uma ferramenta utilizada para medir a transparência da coluna d'água e para avaliar a profundidade da zona fótica, região da água que recebe radiação. Logo, pode-se afirmar que a transparência mensurada com o disco é um indicador do efeito conjunto do coeficiente de atenuação da água e do coeficiente de atenuação difusa (vertical), no qual está associado à claridade da água (BARBOSA *et al.*, 2019). Além disso, a determinação da transparência pode ser utilizada para definir o limite da zona eufótica, região na qual é possível a realização da fotossíntese.

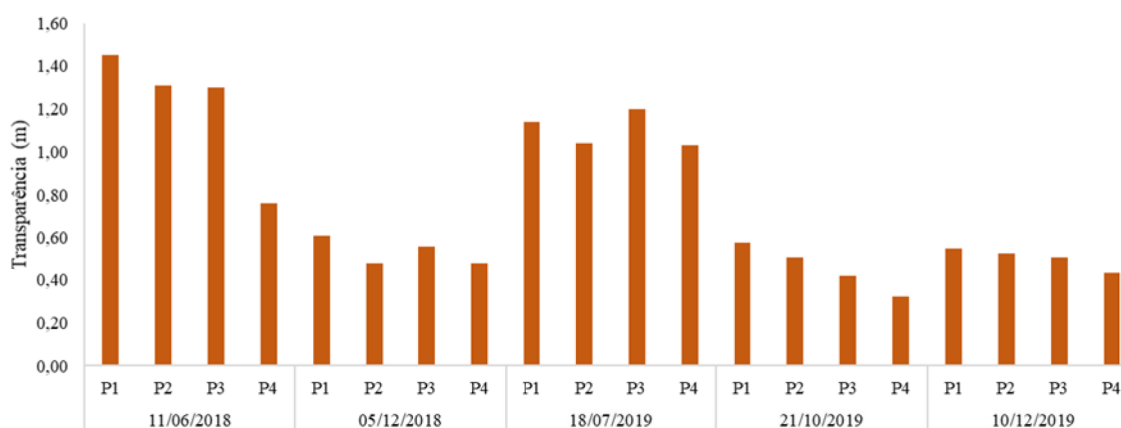
A disponibilidade dos nutrientes associada à radiação solar e a presença de materiais em suspensão ou dissolvidos influenciam na atividade planctônica na zona eufótica do reservatório, no qual ocorrerá um aumento da densidade (LAMPARELLI, 2004), que impacta diretamente na qualidade da água oferecida para o consumo. A transparência pode auxiliar na identificação dessa problemática, sendo este atributo adotado como indicador de estado trófico.

Este atributo pode ser influenciado pela a água em si e pelos constituintes opticamente ativos presentes, suspensos e/ou dissolvidos, e a sua avaliação pode ser utilizada como indicativo da presença de materiais na água (SANTOS; PEREIRA FILHO; TONIOLO, 2015).

Uma elevada turbidez ocasiona uma baixa transparência, na qual promove a redução da fotossíntese e, conseqüentemente, uma queda da taxa primária do ecossistema, que influencia negativamente toda cadeia alimentar, inclusive na presença de gases como oxigênio e gás carbônico (ROSADO, 2010).

Outro fator que pode alterar a transparência da água é a presença de matéria orgânica dissolvida, sendo esta o produto de organismos aquáticos e por meio dos processos de decomposição, liberam material orgânico dissolvido. Esse material é responsável pela coloração marrom-amarelado presente na água (MANTOVANI, 1993).

Figura 9 - Transparência da água do reservatório General Sampaio, nos anos de 2018 e 2019



Fonte: Autor.

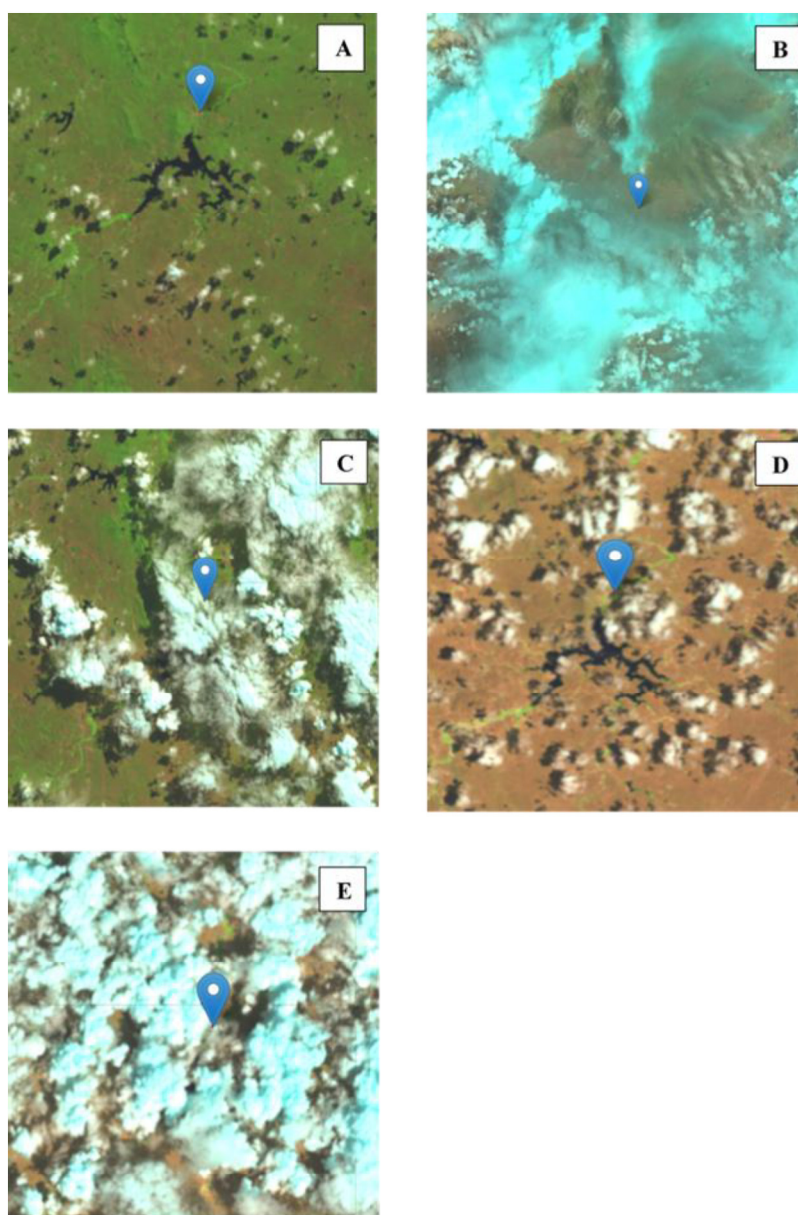
A diminuição da velocidade da água no reservatório propicia o processo de sedimentação das partículas suspensas, favorecendo a sua transparência (LAMPARELLI, 2004). Logo, observa-se que as maiores transparências correspondem ao período de menores valores de sedimentos suspensos, assim como o inverso.

4.5 Sensoriamento remoto

As imagens disponibilizadas equivalentes às datas das coletas, estão disponíveis na Figura 10, onde foram escolhidas imagens com diferença de até 5 dias. A avaliação foi realizada de forma qualitativa. Nota-se que as imagens (B), (C) e (E) estão com a visibilidade comprometida, interferindo na identificação do reservatório. Apenas nas imagens (A) e (D) é possível identificá-lo. Logo, 60% das imagens não foram aproveitadas para o presente estudo.

Alguns autores relatam dificuldades na obtenção de imagens por apresentarem nuvens sobre a superfície terrestre estudada. Ao avaliar a viabilidade de uso das imagens Landsat 5 na Bacia Hidrográfica do Rio Curu, Viana *et al.* (2018) identificaram que 82% das imagens do açude Caxitoré estavam com a visibilidade comprometida, bem como as do açude Pentecoste (75%) e açude General Sampaio (79%). Logo, os eventos climáticos são inevitáveis e prejudicam a aquisição das imagens para avaliação de ambientes, inviabilizando o uso em estudos.

Figura 10 – Imagens orbitais do satélite Landsat 8, sensor OLI/TIRS, para as seguintes datas: (A) 13/06/2018; (B) 06/12/2018; (C) 18/07/2019; (D) 22/10/2019; (E) 09/12/2019



Fonte: Autor.

Os dados disponibilizados pelo Landsat, lançado em 1972, são utilizados em diversos estudos devido à sua boa resolução espacial multiespectral (30 metros) e temporal (16 dias), calibração radiométrica precisa e um longo banco de imagens. Além disso, a aquisição das imagens ocorre de forma gratuita pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS (VIANA *et al.*, 2018).

Apesar das diversas vantagens, existem contratempos que podem prejudicar o mapeamento, por exemplo a presença de neblina, de nuvens e das sombras de nuvens, além de fumaça e poeira. Esses obstáculos interferem nas pesquisas que envolvem a radiação

eletromagnética nas regiões do visível e infravermelho próximo, pois reduzem a visibilidade das feições e a área útil da imagem ou degradam a resposta radiométrica (POLIDORIO *et al.*, 2006).

4.6 Análise dos dados espectrais

A análise dos dados espectrais foi realizada utilizando a faixa do visível (entre 400 a 700 nm) e na faixa do infravermelho próximo (até 900 nm), devido a menor quantidade de ruídos e por corresponder à faixa de resposta espectral na identificação dos COA's da água (BARBOSA *et al.*, 2019). Os dados apresentados a seguir correspondem ao comportamento espectral da água do reservatório General Sampaio, durante o período das coletas, nos anos de 2018 e 2019.

Em todas as coletas, os picos de absorção encontram-se compreendidos na região do espectro correspondente ao azul (entre 400 e 480 nm) e na região de transição para o vermelho, em torno de 580 e 640 nm e entre 660 a 680 nm. Este fato pode estar relacionado à presença de componentes orgânicos, como os pigmentos responsáveis pela fotossíntese (ex. clorofila-*a*, ficocianina) e material orgânico em suspensão (LOPES, 2013). Em (A), esse comportamento foi mais sutil em relação aos demais, onde a água do reservatório se encontrava com maior transparência.

Em (A), nota-se que os dados coletados em junho de 2018, apresentaram um fator de reflectância máximo próximo a 0,015, correspondente aos pontos P03 e o P04. A resposta espectral da água nessa coleta não apresentou oscilações tão evidentes como as demais. Entretanto, também ocorre a presença de SST e SSV, porém de forma atenuada, onde observa-se que em (A), um dos picos da resposta espectral se desloca em direção a 580 nm. No ponto P01, apesar dos valores de SSF serem mais elevados nas coletas, o ponto apresentou menor reflectância.

Para a coleta de julho de 2019, Figura 11 (B), os fatores de reflectância dos pontos amostrados foram mais elevados em relação a coleta anterior, com fator de reflectância acima de 0,03 no ponto P02, sendo indicativo da presença de sedimentos suspensos.

As Figuras (B), (C) e (D), apresentaram comportamentos semelhantes, onde é possível afirmar que as concentrações de clorofila-*a* e materiais orgânicos dissolvidos foram ainda mais elevadas em comparação com a coleta de junho de 2018. Nota-se que ocorre a presença de sedimentos suspensos fixos e sedimentos suspensos voláteis, com destaque para (D), onde é possível observar a presença acentuada a partir da Figura 8. Em ambas, os picos de

reflectância apresentados foram mais acentuados do que a coleta realizada em julho de 2018, principalmente na região entre 550 nm. A cor verde é indicativa da presença de clorofila-*a*, devido a sua reflectância na região do verde.

Em (A), (B), (C) e (D), os fatores de reflectância encontram-se compreendidos entre 0,01 até 0,06. De acordo com Lopes (2013), a água líquida exibe uma reflectância inferior a 10% nos comprimentos de onda no visível.

No dia 05 de dezembro de 2018, data correspondente à segunda coleta, não foi realizada a aquisição de dados espectrais devido o equipamento encontrar-se em manutenção.

A interação da luz com a coluna d'água é influenciada pelos processos absorção (transmitância e absorbância) e espalhamento, produzidos por materiais dissolvidos em suspensão. Os processos de absorção da REM no meio aquático, alteram a composição e a intensidade do campo de luz, podendo ser identificados e quantificados por meio das grandezas radiométricas. Logo, as medidas radiométricas podem ser utilizadas para quantificar as alterações ocorridas na coluna d'água e para determinar as propriedades ópticas do ambiente (BARBOSA *et al.*, 2019).

O comportamento espectral da água, quando ocorre a presença de clorofila-*a*, apresenta picos de absorção que variam de acordo com as concentrações do pigmento e/ou de sólidos suspensos. Os picos de absorção da clorofila estão compreendidos na região do azul, aproximadamente em 438 nm e outro na região do vermelho, em torno de 650 nm, associados às clorofilas *a* e *b* (LOPES, 2013). Os valores elevados de clorofila-*a* no reservatório podem ser justificados pelas inconstâncias no volume do reservatório durante o período, além da presença de SSV observado anteriormente.

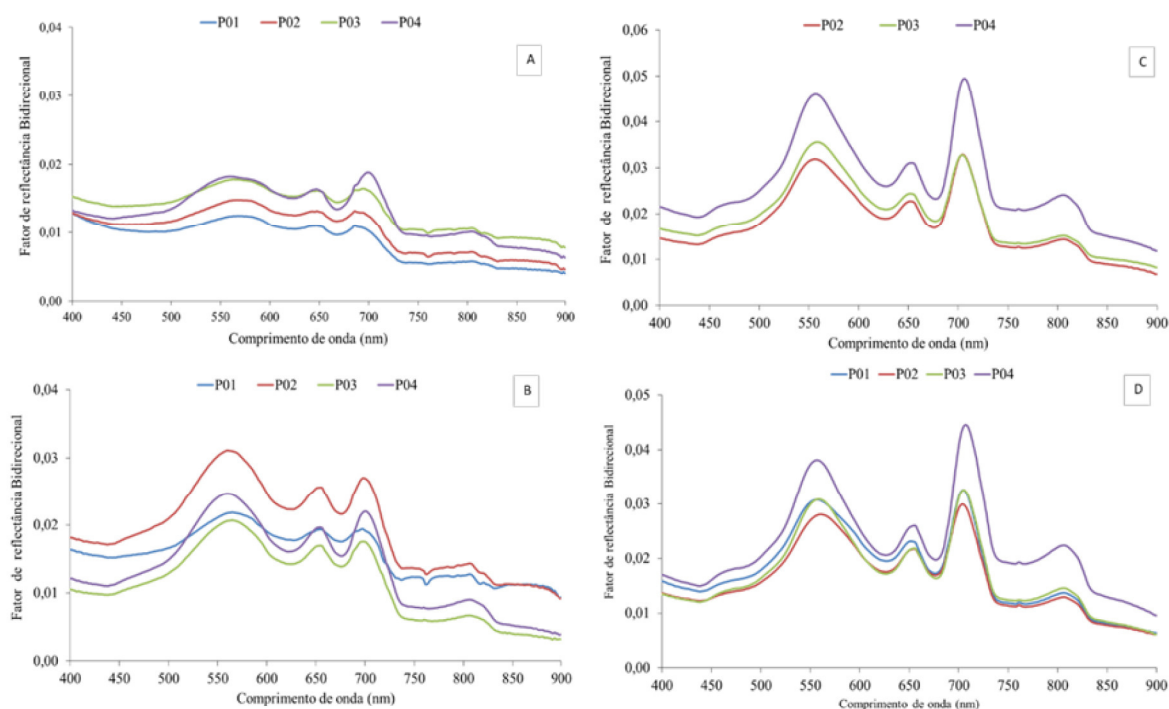
A clorofila-*a* é um pigmento mais importante para a fotossíntese e está presente em todos os grupos de organismos: *Cyanophyta*, *Prochlorophyta*, *Rhodophyta*, *Fucophyceae*, *Bacillariophyceae*, *Dinophyta*, *Chlorophyta*, *Euglenophyta*. Logo, a sua presença em ambientes aquáticos é indicativa da biomassa fitoplanctônica e cianobactérias nos corpos hídricos (LONDE *et al.*, 2008). Além desse pigmento, ocorre também a presença de ficocianina, principalmente nas três últimas coletas realizadas. A ficocianina é um pigmento acessório que auxilia no processo da fotossíntese das cianobactérias. Esse pigmento apresenta absorção da luz visível em torno de 600 nm – 630 nm (SILVA, 2018; LONDE *et al.*, 2008).

Em (D), não é possível comparar a resposta espectral dos sólidos suspensos totais com os valores obtidos em laboratório, devido a uma falha técnica do equipamento utilizado na obtenção da concentração de sedimentos, o forno Mufla. Porém, é possível afirmar que os valores de SST obtidos foram mais elevados em comparação à coleta realizada em junho de

2018. Os valores elevados de reflectância entre as regiões de 680 a 740 nm e 800 nm, demonstram maiores concentrações de sólidos suspensos na água.

A estimativa das concentrações de sedimentos suspensos em água baseia-se na relação entre essas concentrações e os valores de reflectância, onde ocorre uma alta correlação (PEIXOTO *et al.*, 2018). Portanto, os maiores valores de reflectância também podem estar associados à presença de sedimentos em água e a diminuição da sua intensidade pode estar relacionada com a redução da fração areia e a presença de material orgânico no meio.

Figura 11 – Resposta espectral do sistema aquático do reservatório General Sampaio, para as seguintes datas: 11/06/2018 (A); 18/07/2019 (B); 21/10/2019 (C); 10/12/2019 (D)



Fonte: Autor.

Para Santos *et al.* (2021), a presença de elementos (ex. matéria orgânica, tamanho das partículas presentes na matriz do solo e teor de umidade da amostra), afetam diretamente na resposta espectral dos alvos, podendo mascarar as características de absorção dos alvos, no qual prejudica a interpretação sobre os atributos presentes nas amostras do solo.

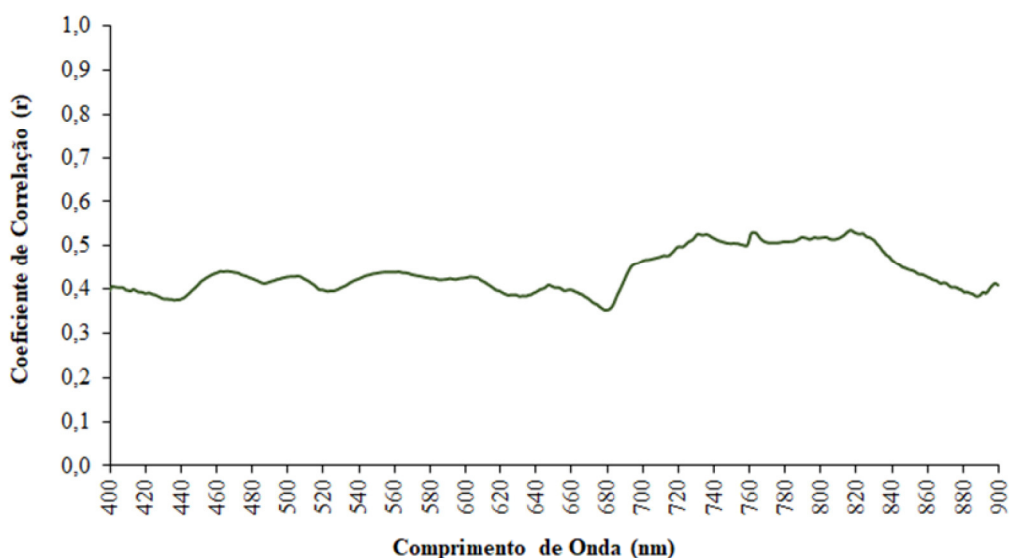
4.7 Correlação e análise dos modelos

Como forma de identificação das posições espectrais de maior correlação com os atributos limnológicos avaliados durante os anos de 2018 e 2019, foram elaborados correlogramas que expressam

a correlação entre o fator de reflectância bidirecional – FRB e as variáveis clorofila-*a* ($\mu\text{g L}^{-1}$), sedimentos suspensos (mg L^{-1}) e transparência (m) no reservatório General Sampaio, para modelos de apenas uma banda.

As bandas espectrais cujos valores do fator de reflectância apresentaram os melhores resultados de correlação para o atributo clorofila-*a*, estão dispostos na Figura 12. Nota-se que os coeficientes de correlação (*r*) foram positivos na região do visível e no infravermelho. Logo, os maiores valores de correlação (0,5254), correspondentes à média das correlações entre os comprimentos de onda 700 nm e 830 nm, na região do infravermelho.

Figura 12 - Correlograma simples do fator de reflectância e concentrações de clorofila-*a*

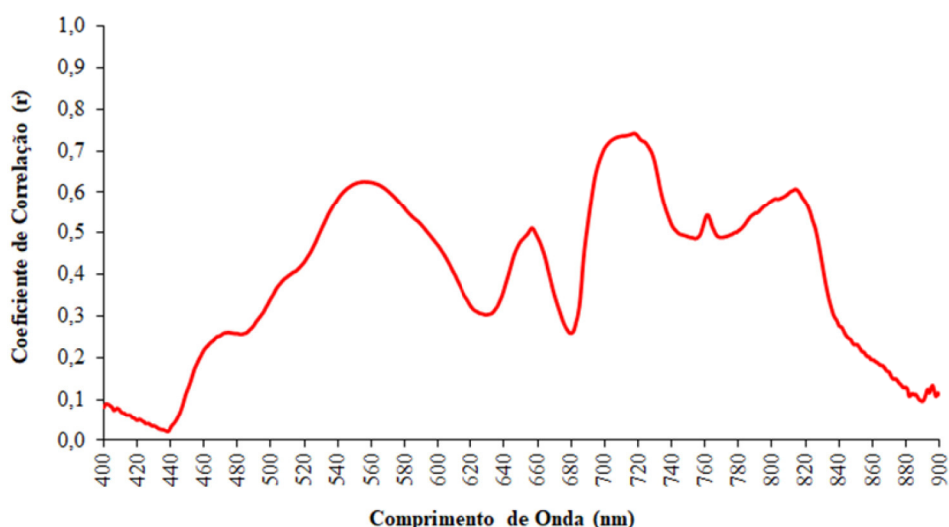


Fonte: Autor.

Com o objetivo de avaliar a relação entre clorofila-*a* em diferentes profundidades e a reflectância espectral, Pereira Filho *et al.* (2019) encontraram uma correlação baixa em todos os comprimentos de onda, quando foram utilizados dados de clorofila-*a* coletados em subsuperfície. Os maiores coeficientes foram registrados para as coletas realizadas na profundidade do disco de Secchi. Mendonça (2018) também encontrou valores de correlação simples baixos em todos os comprimentos de onda.

Assim como o correlograma anterior, os coeficientes de correlação para estimar os SS também foram positivos (Figura 13) e presentes na região do visível e, principalmente, na região do infravermelho. A maior correlação avaliada, valor acima de 0,7, encontra-se na região do infravermelho. Outros autores obtiveram resultados semelhantes; Paula (2015) obteve os maiores coeficientes de correlação para as faixas a partir do vermelho em direção aos maiores comprimentos de onda. Lopes (2013) encontrou resultados semelhantes.

Figura 13 – Correlograma simples do fator de reflectância e a concentrações de sedimentos suspensos

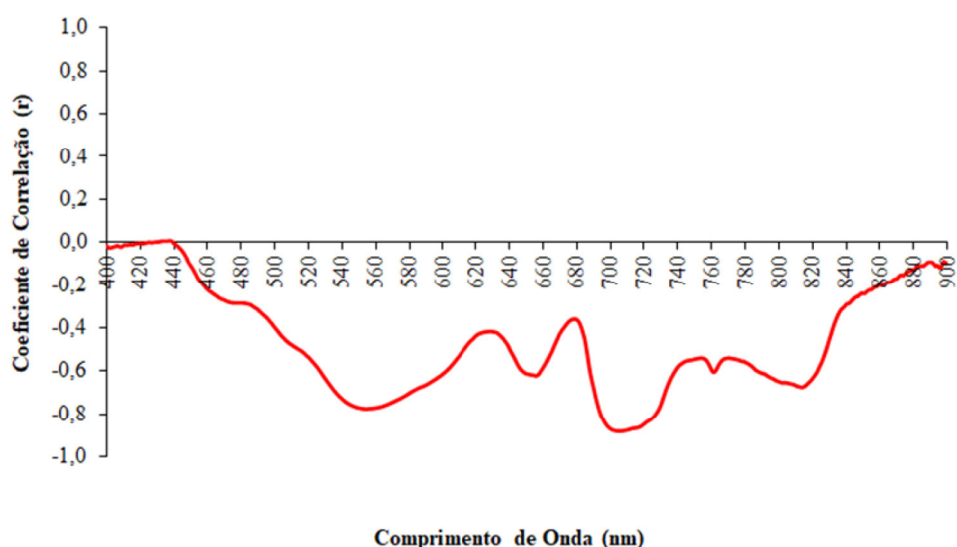


Fonte: Autor.

Na Figura 14, observa-se uma correlação negativa entre a transparência e a faixa espectral, principalmente na região do infravermelho. A maior correlação avaliada, $(r) = 0,879$, encontra-se em na região da faixa espectral de 700 nm. É possível identificar que, nos comprimentos correspondentes à faixa do azul, a correlação encontra-se próxima a zero. Lopes (2013) também encontrou resultados negativos de correlação em toda faixa do espectro.

Segundo Rudorff (2006), a profundidade de Secchi (transparência) é influenciada negativamente pela presença de sedimentos suspensos e pigmentos em água. Logo, existe uma correlação negativa entre a reflectância e a transparência da água.

Figura 14 – Correlograma simples do fator de reflectância e a transparência (m)



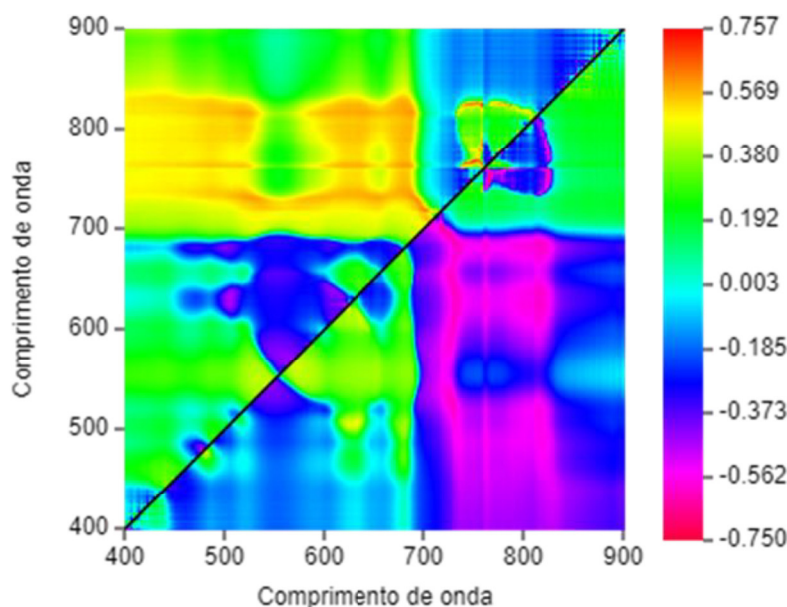
Fonte: Autor.

A correlação em duas dimensões é um método estatístico que permite a quantificação da correlação entre uma variável dependente e outras independentes. De acordo com Ogashawara *et al.* (2014), essa metodologia é aplicada para estimar parâmetros a partir de dados espectrais, no qual utilizam-se gráficos de correlação para a seleção de bandas, sendo reforçados pelo uso de sensores hiperespectrais.

Nas Figura 15, 16 e 17 são apresentados os gráficos de correlação 2D, onde foram selecionados dois comprimentos de onda a partir dos melhores valores de coeficiente de correlação. Com base nesses valores, foi desenvolvido o modelo de estimativa da concentração de clorofila-*a*, sedimentos suspensos e transparência.

No correlograma é possível identificar que as maiores correlações foram observadas quando foi utilizada a razão de bandas e a concentração de chl-*a* (Figura 15). A correlação mais forte apresentada ocorreu nos comprimentos de onda na região do vermelho (710 a 830 nm), apresentando um coeficiente de correlação positiva de 0,569. Em estudo de Mendonça (2018), a correlação mais forte encontrada foi nos comprimentos de onda na região do vermelho (665 a 710 nm).

Figura 15 - Correlograma 2D entre o FRB e as concentrações de clorofila-*a*

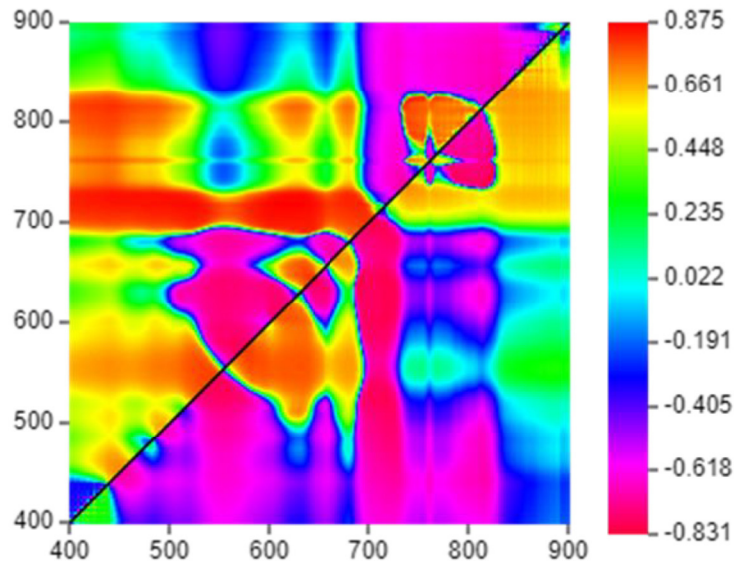


Fonte: Autor.

A partir da Figura 16, é possível afirmar que a correlação entre o FRB e as concentrações de sedimentos foram mais elevadas em comparação às concentrações de clorofila. Os valores mais elevados de FRB (0,875) foram apresentados na região dos comprimentos de onda entre 700 e 730 nm. Segundo Bernardo *et al.* (2016) e Tarrant *et al.*

(2010), o melhor modelo para estimar SST a partir das bandas entre 654 nm e 859 nm, onde foi observada uma forte correlação.

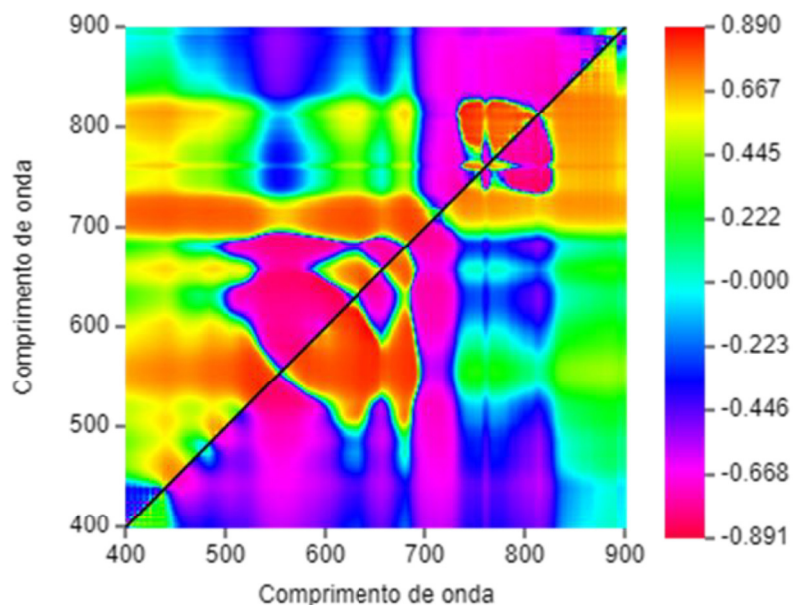
Figura 16 - Correlograma 2D entre o FRB e as concentrações de sedimentos suspensos



Fonte: Autor.

Já na Figura 17, observa-se que a correlação entre o FRB e a transparência da água foi mais elevada na região do infravermelho. Os valores mais elevados de FRB (0,89) foi apresentado na região dos comprimentos de onda entre 700 e 710 nm.

Figura 17 - Correlograma 2D entre o FRB e a transparência

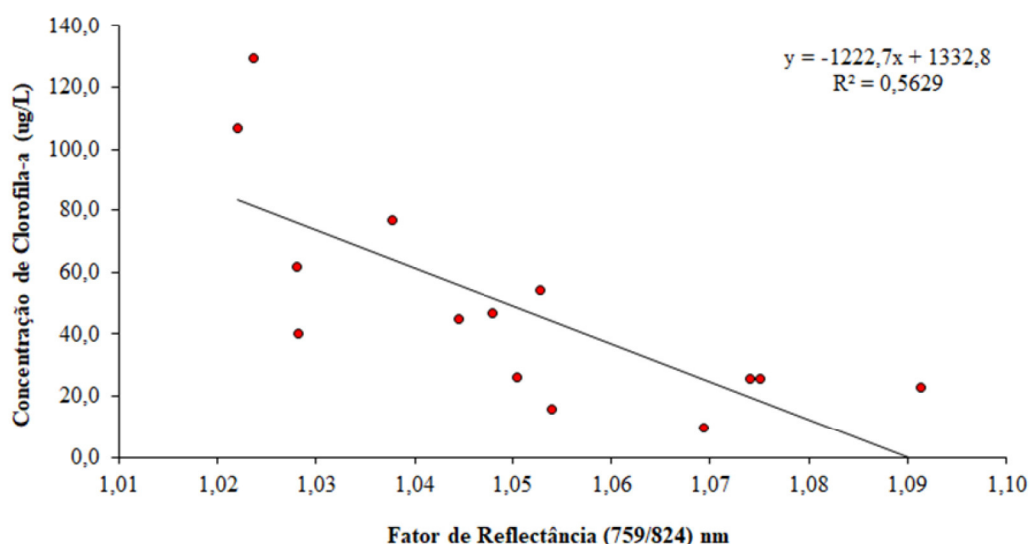


Fonte: Autor.

A partir das correlações, foram selecionados os comprimentos de onda para os modelos de duas bandas, tanto para clorofila-*a* quanto para SST e transparência. Em ambos os modelos, as bandas encontravam-se na região do vermelho e infravermelho próximo. O modelo para clorofila-*a* (Figura 18) corresponde à razão dos comprimentos de ondas 759 e 824 nm. Observa-se que o modelo teve um desempenho linear negativo, com $R^2 = 0,5629$, no qual indica que à medida em que concentração de clorofila-*a* aumenta, o fator de reflectância decresce. Para Lopes *et al.* (2014), as águas continentais da região semiárida brasileira apresentam uma grande complexidade óptica.

O melhor modelo obtido por Mendonça (2018) se deu a partir da razão das bandas 665, 709,37 e 754,75 nm, onde foram considerados bons coeficientes de determinação ($R^2 = 0,82$).

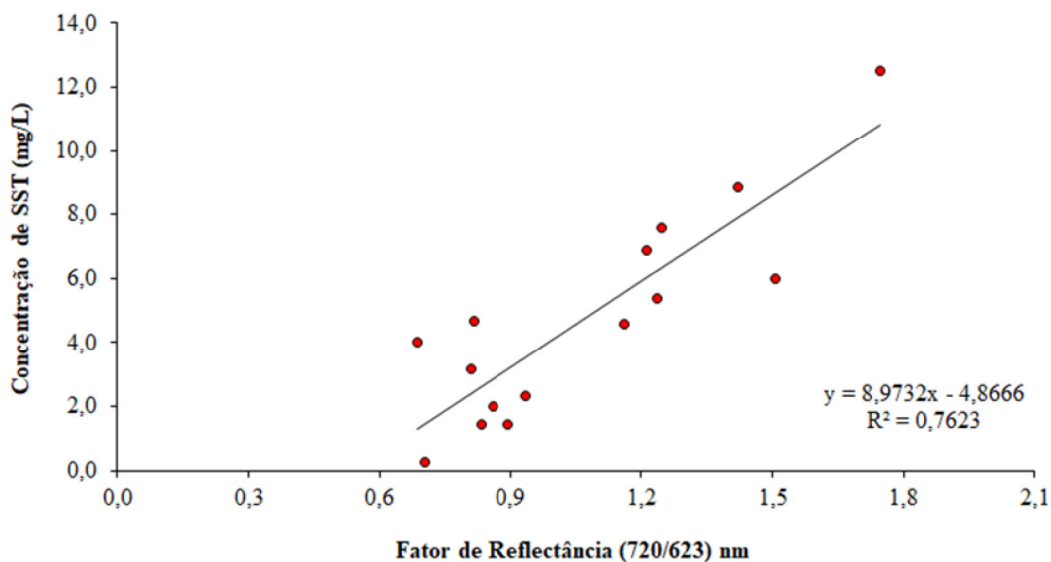
Figura 18 – Modelo de estimativa da concentração de clorofila-*a* dos comprimentos de ondas 759 e 824 nm, para o reservatório General Sampaio



Fonte: Autor.

O modelo de estimativa da concentração de sedimentos suspensos totais em água (Figura 19) corresponde aos comprimentos de ondas 623 e 720 nm. Este modelo apresenta um bom coeficiente de determinação (R^2) de 0,7623. De acordo com os resultados observados na Figura 19, afirma-se que à medida em que concentrações de SST se elevam, o fator de reflectância aumenta. Lopes *et al.* (2014) obtiveram como resultados de sua pesquisa que o comprimento de onda de 720 nm apresentou correlação positiva com a variável sólidos suspenso, apresentando o melhor modelo potência.

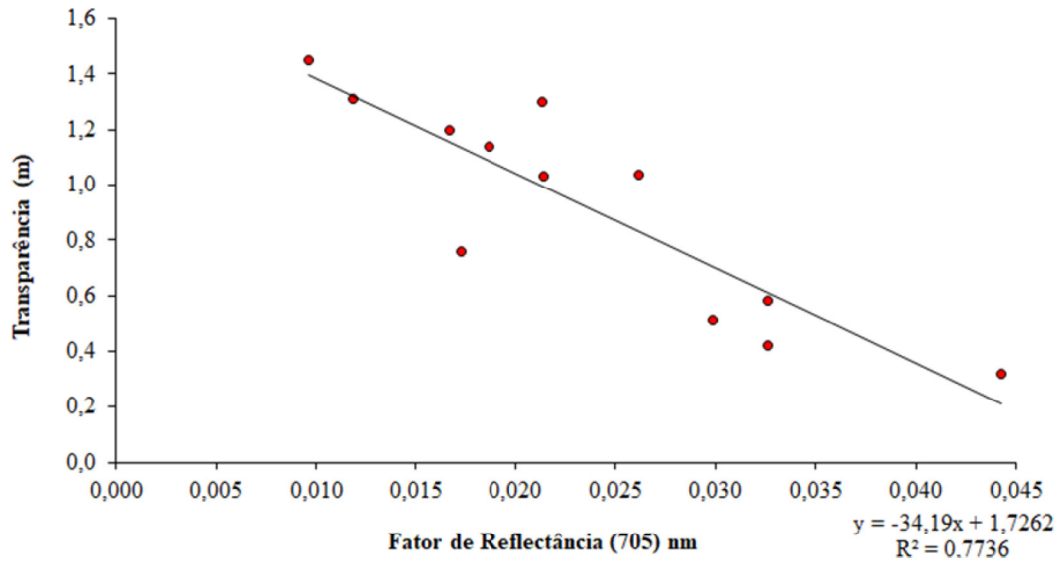
Figura 19 - Modelo de estimativa da concentração de SST dos comprimentos de ondas 663 e 720 nm, para o reservatório General Sampaio



Fonte: Autor.

O modelo de estimativa da transparência em água (Figura 20) corresponde ao comprimento de onda 705 nm. Este modelo apresenta um bom coeficiente de determinação (R^2) linear negativo de 0,7736, no qual indica que à medida em que a transparência diminui, o fator de reflectância aumenta. Toniolo (2016), em seu trabalho para identificar os constituintes opticamente ativos na água do lago Guaíba, constatou uma correlação linear (R^2) negativa em todos os comprimentos de onda, assim como observado na Figura 20, entretanto os valores obtidos pelo referido autor foram menores ($R^2 = 0,32$).

Figura 20 – Modelo de estimativa da transparência no comprimento de onda 705 nm, para o reservatório General Sampaio



Fonte: Autor.

]

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados limnológicos coletados, constatou-se que a qualidade da água do reservatório General Sampaio estava comprometida para o consumo humano, por apresentar concentrações de clorofila-*a* acima do permitido pela Resolução CONAMA N° 357/2005 para a Classe II. Além disso, as ações antrópicas e os fatores climáticos influenciaram a qualidade da água.

Os dados de sensoriamento remoto permitiram avaliar as respostas espectrais das águas do reservatório, auxiliando na interpretação dos dados obtidos em laboratório.

Os modelos desenvolvidos para estimar as concentrações de SST e para a transparência mostraram-se confiáveis. Entretanto, o modelo desenvolvido para estimar a concentração de clorofila-*a* precisa ser melhor avaliado posteriormente. É necessária a validação dos modelos de regressão.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR nº 9896 de 1993: Glossário de Poluição das Águas.** 94 p.
- ALMEIDA, H. A.; FREITAS, R. C.; SILVA, L. Determinação de períodos secos e chuvosos em duas microrregiões da Paraíba através da técnica dos quantis. **Revista de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 217-232, 2013.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Variáveis e Parâmetros de Qualidade de Água em Rios e Reservatórios. Curso de Monitoramento da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios.** Disponível em :<https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/76/6/Unidade_3.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- ANA (Brasil). **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012/** Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA, 2012. 264 p.; il. ISBN: 978-85-8210-007-3.
- ANDRADE, C. M.; MARQUES, L. de S. Semiárido brasileiro: alguns desafios. **Diversitas Journal**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 279–283, 2017. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v2i2.567. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/567. Acesso em: 11 fev. 2022.
- ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, p. 1791-1797, 2007.
- ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; PALÁCIO, H. A. Q.; AQUINO, D. N.; ALEXANDRE, D. M. B. Land use and groundwater quality: the case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n.2, p. 208-215, 2010.
- ANDRADE, E. M.; SENA, M. G. T.; SILVA, A. G. R.; PEREIRA, F. J. S.; LOPES, F. B. Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 88-95, 2016.
- APHA. **Standard Methods for the examination of Water and Wastewater.** Edition American Public Helth Association/American Water Works Association/Water Enverinmont Federation, Washington DC, e. 21, p. 128, 2005.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos.** 1. ed. São José dos Campos, SP: INPE, 2019.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água no sistema planície de Curuai/Rio Amazonas.** 281f, Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 2005.
- BATISTA, A. A.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E.M.; IZÍDIO, N. S. C.; LOPES, F. B. Seasonal and spatial variation of the trophic state index of the Orós reservoir, Ceará, Brazil. **Revista Agroambiente On-line**, v. 8, p. 39–48, 2014.

BERNARDO, N.; WATANABE, F.; RODRIGUES, T.; ALCÂNTARA, E. Evaluation of the suitability of MODIS, OLCI and OLI for mapping the distribution of total suspended matter in the Barra Bonita Reservoir (Tietê River, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 4, p. 68-82, 2016.

BRAGA, M. B.; LIMA, C. E. P. **Reuso de água na agricultura**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Resolução CONAMA nº 357/05**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/po t/conama/res/res05/res 35705.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo**. 2012, 2014. São Paulo, SP: CETESB, 2014. 434 p.

CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B.; MAIA, A. R. S.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M. Qualidade da água e impactos antrópicos em bacias hidrográficas de açudes no semiárido brasileiro. **Ciência Agrônômica**, v. 50, n. 2, p. 223-233, 2019.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Inventário Ambiental do Açude General Sampaio**. 2011. Acessado em: 08 de janeiro de 2022, Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br/publicacoes-inventarios/>.

CUNHA, A. M S. CASÉ, M., LOPES, D. V. Qualidade da água como reflexo de atividades antrópicas em bacias hidrográficas do Nordeste, Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 34 , n. 72, p. 102 - 123, mai./ago. 2019. <http://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n72p102>.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; LAMPARELLI, M. C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSIts). **Ecological Engineering**, v. 60, p. 126-134, 2013.

DE ANDRADE, E. M. A floresta tropical seca, caatinga: As certezas e incertezas das águas. **TRIM: revista de investigación multidisciplinar**, n. 12, p. 11-20, 2017.

DE ANDRADE, E. M. *et al.* Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. **Revista agro@ mbiente on-line**, v. 10, n. 2, p. 88-95, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 355p.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3ªed., Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p

FERREIRA, A. B.; PEREIRA FILHO, W. Avaliação da Reflectância Espectral de Corpos d'água em Santa Maria - Rs por meio de Espectrorradiometria de Campo. **Revista Geoambiente, On-line**. 2009.

FERREIRA, R. D. **Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na Planície de Curuai / Rio Amazonas**. 105f. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

FRAGA, R. S.; TAVARES, V. E. Q.; TIMM, L. C.; ESTRELA, C. C.; BARTELS, G. K. Influência da precipitação sobre parâmetros de qualidade da água utilizada para irrigação do morangueiro no município de Turuçu-RS. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 18, n. 1-4, p. 81-94, 2012.

PEREIRA FILHO, W.; ROSA, C. N.; KRAMER, G. DEZORDI, R. Clorofila-*a* na coluna de água e reflectância espectral. IN: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. INPE. **Anais...** Santos, SP. 2019.

GLEICK, P.H. Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. **Science**, 302 (5650): 1524-1528, 2003.

GUTIERREZ, C. B. B. **Monitoramento multitemporal da qualidade das águas dos mananciais de Belém-PA: evidências de impactos antrópicos no seu entorno**. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado do Pará, Belém, 2016.

IBGE. –Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. **Censo agropecuário**. Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Brasília/Rio de Janeiro: MDA/MPOG, 2009.

JACHINTO, L. R. C. **Geoprocessamento e Sensoriamento remoto como Ferramentas na Gestão Ambiental de Unidades de Conservação: O caso da área de proteção ambiental (APA) do Capivari-Monos, São Paulo - SP**. 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais. **Parêntese**. SP, São José dos Campos, 2009.

KAISER, E. A.; DOS SANTOS, C. F.; PEREIRA FILHO, W. Influência da precipitação pluviométrica e uso da terra em variáveis limnológicas do reservatório da usina Hidrelétrica Ernestina, RS. **GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n. 16, p. 3-22, 2015.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

LIMA, T. B. R. **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos**. 2020. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2020.

LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

LOPES, F.B.; SENA, M.G.T.; OLIVEIRA, C.M.B.; LIMA, F.J.O.; ANDRADE, E.M.; BECKER, H. Eutrofização em reservatórios da região semiárida. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI/INCT-EI, 2015. p. 3569-3579.

LOPES, F. B. **Uso de sensoriamento remoto como suporte ao monitoramento da qualidade das águas superficiais da região semiárida do Brasil.** 2013 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.

LOPES, F. B. *et al.* Modelagem de variáveis limnológicas a partir de dados de sensoriamento remoto de campo. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2., 2014. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, Ceará, 2014.

LOPES, F. B. *et al.* Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 437-445, 2014.

MACHADO, M. T. S. BAPTISTA, G. M. M. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. 2016, v. 21, n. 2, pp. 357-365.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; YU, G.; OYAMA, Y.; YOSHIMURA, K.; FUKUSHIMA, T. A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-a concentration across different trophic states in Asian inland waters. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.** v. 102, p. 28–37, 2015.

MANTOVANI, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inorgânica particulada.** São José dos Campos: INPE, 1993.

MARENCO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido.** Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. v. 1, p. 385-422, 2011.

MENDONÇA, M. J. C.; SEROA DA MOTTA, R. Saúde e saneamento no Brasil. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 30, 2009.

MENDONÇA, J. C. **Análise de modelos de estimativa da concentração de clorofila-a, utilizando dados de sensoriamento remoto.** 2016. Trabalho de conclusão de curso (Agronomia) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

MENDONÇA, J. C. **Dinâmica de atributos limnológicos e uso de sensoriamento remoto para estimar as concentrações de clorofila-a em reservatório no semiárido.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.

MILTON, E. J. Principles of Field Spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p.1807-1827, 1987.

MIRANDA, M. V. T.; SANTOS, M. L. S.; PEREIRA, J. A. R.; MESQUITA, K. F. C. Índices de qualidade da água da Ilha de Mosqueiro-PA. **Revista DAE**. 2016 v. 64, p. 74-81, 10.4322/dae.2015.

MOBLEY, C. D. **Light and water Radiative transfer in natural waters**. Academic Press. 2004, 593p.

NOVO, E. M. L. M. **Comportamento Espectral da Água**. In: MENESES, P. R.; MADEIRA

NOVO, E.M.L. de M.; PONZONI, F.J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos, 2001. 68p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2010. p. 387.

OGASHAWARA, I.; CURTARELLI, M. P; SOUZA, A. F.; AUGUSTO-SILVA, P. B.; ALCANTARA, E. H.; STECH, J. L. Interactive Correlation Environment (ICE) - a statistical web tool for data collinearity analysis. **Remote Sensing** 6(4), 3059-3074, 2014. doi:10.3390/rs6043059

OLIVO, A. DE M.; ISHIKI, H. M. Brasil frente à escassez de água. **Colloquium Humanarum**, Presidente Prudente, v. 11, n. 3, p.41-48, set/dez 2014. DOI: 10.5747/ch.2014.v11.n3.h170. Acesso em: 18 nov. 2021.

PARANÁ. Instituto Ambiental do Paraná. **Uso e Qualidade da água**. 2008. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1074.html>. Acesso em: 11 fev. 2022.

PEIXOTO, D. W. B.; GUASSELLI, L. A.; PEREIRA FILHO, W. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão a partir de imagens Landsat 8 em pchs no Rio Avaí – RS. **Geociências**, v. 37, n. 1, p.147-154. 2018.

PIVELI, R.P.; KATO, M.T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2006. 285p.

PONTE, N. S. C. *et al.* Estimativa das concentrações de clorofila-a e sedimentos suspensos em um ecossistema aquático continental utilizando sensoriamento remoto. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 14, 2020.

ROSADO, V. B. **Characterization of sediments, soils, and water and impacts of the San Francisco dam rupture: the case of Mirai, Minas Gerais**. 2010. Tese (Doutorado em Plantas daninhas, Alelopatia, Herbicidas e Resíduos; Fisiologia de culturas; Manejo pós-colheita de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

RUDORFF, C. M; *et al.* Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 279-290, 2007.

DOS SANTOS, E. P. *et al.* Espectrorradiometria de Campo e Dados Sentinel-2 Aplicado ao Estudo da Clorofila-a em Corpos Hídricos de Reservatórios. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44. 2017.

SANTOS, F. C. DOS; PEREIRA FILHO, W.; TONIOLO, G. R. Transparência associada à reflectância da água do reservatório Passo Real. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa, INPE. 2015.

SOUZA NETO, S. E. A água na terra, produto em extinção. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2019. DOI: 10.14295/ras.v0i0.29621. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29621>. Acesso em: 2 jan. 2022.

SOUZA, J. R. *et al.* A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 8, n. 1, abr. 2014. ISSN 1982-5528. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/217>>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SAUSEN, T. M. (1980). **Estudo da dinamica do alto rio Sao Francisco e reservatorio de tres Marias, atraves de imagens MSS/LANDSAT**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE. Sao Jose dos Campos, 1981. 231 p. 12.

SILVA, T. T. **Estudo sobre as variáveis responsáveis pela eutrofização das águas dos reservatórios do semiárido cearense**. 2018. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Química. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. v. 1.

TARRANT, P. E, *et al.* Assessing the potential of Medium-Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data for monitoring total suspended matter in small and intermediate sized lakes and reservoirs. **Water resources research**, v. 46, p. 9532-9539, 2010.

THOMAZ, S. M. Considerações sobre monitoramento da qualidade da água em reservatórios. IN Workshop sobre Gestão de reservatórios Hidrelétricos: Monitoramento e Avaliação da Qualidade ambiental das águas em reservatórios. 1998. Salto Grande, S. Paulo: CESP. **Anais [...]** São Paulo. 2000.

TONIOLO, G. R. **Identificação de constituintes opticamente ativos na água do lago guaíba, a partir de dados de sensores orbitais e espectrorradiometria de campo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) - Centro Estadual De Pesquisas Em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.

TUCCI, C.E.M. **Existe crise da água no Brasil?** Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/EXISTECRISEDAAgua.pdf>. Acesso em 18 de novembro de 2021.

TUNDISI, J. G. **Recursos Hídricos. Instituto Internacional de Ecologia**, São Carlos, 2003. Disponível em: http://www.multiciencia.unicamp.br/artigos_01/A3_Tundisi_port.PDF. Acesso em: 17 nov. 2021.

VIANA, A. K. O. ; LEDO, E. R. F. ; PEREIRA, E. C. B. ; LOPES, F. B. Viabilidade de uso do histórico de imagens landsat 5 na Bacia Hidrográfica do Rio Curu. IN: V WORKSHOP

INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO - WINOTEC, 2018, Sobral. **Anais [...]**. Sobral. 2018.

WATANABE, F. S. Y.; IMAI, N. N.; BARBOSA, C. C. F.; ARAÚJO, A. P. de. Avaliação do comportamento espectral da água: estudo de caso do alto curso do Rio Paraná (Presidente Epitácio SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLÓGICAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. **Anais[...]** Recife: A informação Geoesoacial: Inovação Tecnológica, Ocupação e Monitoramento, p. 1-8. 2010.

WATANABE, F. S. Y.; ALCÂNTARA, E.; RODRIGUES, T. W. P.; IMAI, N. N.; BARBOSA, C. C. F. e ROTTA, L. H. S. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, p. 10391-10417, 2015.

WOLKMER, M. F. S.; PIMMEL, N. F. Política nacional de recursos hídricos: governança água e cidadania ambiental. **Revista Sequência**, Florianópolis, v. 34, n. 67, Dez. 2013. Acesso em: 17 nov. 2021.