



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

EDUARDO COSTA DOS SANTOS

**SENTINEL-2 COMO FERRAMENTA DE DETECÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS EM
AÇUDE DE ABASTECIMENTO**

FORTALEZA

2021

EDUARDO COSTA DOS SANTOS

**SENTINEL-2 COMO FERRAMENTA DE DETECÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS EM
AÇUDE DE ABASTECIMENTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto.

FORTALEZA

2021

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

S234s Santos, Eduardo Costa dos.
Sentinel-2 como ferramenta de detecção de cianobactérias em açude de abastecimento / Eduardo Costa dos Santos. – 2020.
29 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. José Capelo Neto.

1. Sentinel-2. 2. Sensoriamento remoto. 3. Cianobactérias. 4. Qualidade da água. I. Título.

CDD 628

EDUARDO COSTA DOS SANTOS

**SENTINEL-2 COMO FERRAMENTA DE DETECÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS EM
AÇUDE DE ABASTECIMENTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Capelo Neto (Orientador)

MsC. Marianna Correia Aragão Goes (Co-Orientadora)

Dr. Mário Ubirajara Gonçalves Barros

RESUMO

Um dos principais problemas enfrentado atualmente nos corpos hídricos é a presença de cianobactérias e cianotoxinas. Ambientes ricos em nutrientes são propícios para o crescimento descontrolado desses organismos, em eventos conhecidos como florações. Com o aumento da frequência e intensidade das florações em corpos hídricos eutrofizados, a importância do acompanhamento e controle das cianobactérias se mostra cada vez mais evidente. Nesse contexto, o sensoriamento remoto, principalmente via satélite, se apresenta como forma rápida e barata de detecção desses eventos. O presente estudo tem o objetivo de analisar a eficácia e eficiência da implantação de um sistema de detecção e quantificação da presença de cianobactérias a partir do parâmetro Clorofila-a, determinação da densidade celular a partir de propriedades óticas e calibração de algoritmos de sensoriamento remoto por meio de dados in situ. O sistema, baseado nos satélites Sentinel-2, apresentou bons resultados para determinação de Clorofila-a, onde o modelo empírico Stepwise 3B obteve o coeficiente de determinação $R^2=0,71$. O modelo de determinação de densidade celular Ssa(665) apresentou baixa eficiência, explicado pela incompatibilidade tecnológica dos sensores instalados no satélite, mas que mesmo assim, permite uma análise categórica na formação de florações.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Cianobactérias. Sentinel-2

ABSTRACT

One of the main problems faced currently in water bodies is the presence of cyanobacteria and cyanotoxins. Nutrient-rich environments promotes uncontrolled growth of these organisms, in events known as blooms. With the increase in frequency and intensity of blooms in eutrophic water bodies, the importance of monitoring and controlling cyanobacteria is increasingly evident. In this context, remote sensing, mainly via satellite, presents itself as a fast and inexpensive way of detecting these bloom events. The present study aims to analyze the effectiveness and efficiency of the implantation of a system to detect and quantify the presence of cyanobacteria using the parameter Chlorophyll-a, to determine cell density from optical properties and calibration of remote sensing algorithms by in situ data. The system, based on the Sentinel-2 satellites, presents good results for the determination of Chlorophyll-a, whereby the empirical model Stepwise 3B achieved the determination coefficient $R^2 = 0,71$. The cell density determination model SSa(665) presented low efficiency, explained by the technological incompatibility of the sensors installed on the satellite, but which nonetheless, allows a categorical analysis of the formation of blooms.

Keywords: Remote Sensing. Cyanobacterias. Sentinel-2.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dados históricos de Clorofila-a (Cla).....	171
Gráfico 2 – Dados históricos de densidade celular.....	21
Gráfico 3 –Relação Densidade celular x Clorofila-a (Cla).....	172
Gráfico 4 – Correlação de Cla modelado em Stepwise 3B e Cla in situ.	253
Gráfico 5 – Correlação do Índice MCI e Cla in situ.....	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de bandas do Sentinel-2	16
Tabela 2 – Resultados estatísticos dos modelos.	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do açude Gavião.	17
Figura 2 – Resultados de modelagem de sensoriamento remoto.	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Cianobactérias	13
3.2 Sensoriamento remoto	13
3.2.1 Clorofila-a	15
3.2.2 Sentinel-2	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 Área de estudo	17
4.2 Dados de coletas	17
4.3 Dados de sensoriamento remoto e pré-processamento	18
4.4 Modelos de determinação de clorofila-a e cianobactérias	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1 Dados de sensoriamento remoto	20
5.2 Clorofila-a e densidade celular	20
5.3 Modelos de determinação de Cla	22
6. CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da poluição dos corpos hídricos e mudanças climáticas, eventos extremos de proliferação de cianobactérias, chamados de florações, são cada vez mais comuns (SVRCEK; SMITH, 2004). Essas florações de cianobactérias podem, no pior caso, produzir toxinas extremamente nocivas aos humanos e, geralmente, aumentam os custos do tratamento de água para o consumo, além de piorar as características estéticas dos corpos hídrico (PUGLIESE; FAVERO, 1998; VIANA, 2018).

Por conta desses problemas, o controle das cianobactérias e cianotoxinas é de suma importância para as companhias e gestores da água. Esse controle é feito normalmente por acompanhamento e medições *in situ*, práticas essas que são geralmente laboriosas e dispendiosas. Sendo assim, novas tecnologias que ajudem na detecção e medição de florações são vistas como forma de tornar esse processo mais eficiente. Dentre as tecnologias recentes aplicadas à essas situações, destaca-se o sensoriamento remoto (PAPENFUS et al., 2020).

O sensoriamento remoto se apresenta como uma forma rápida, barata e precisa de determinação de parâmetros da qualidade da água (CHAWLA; KARTHIKEYAN; MISHRA, 2020). Muitas vezes apresentam custo baixo, geralmente permitem análises espaço-temporais praticamente impossíveis de serem feitas em campo e são, em sua grande maioria, de fácil aplicação. É por esse entre outros vários motivos que o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta preciosa e que sua implementação tornará indispensável no panorama desafiante que a gestão, tratamento e consumo de água ameaça se tornar.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar algoritmos de sensoriamento remoto na detecção de cianobactérias em açudes de abastecimento.

2.2 Objetivos Específicos

Analisar a formatação de dados in situ para aplicação de sensoriamento remoto.

Determinar rotina para processamento e análise de imagens de satélite.

Modelar Clorofila-a em açude por meio de sensoriamento remoto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cianobactérias

As cianobactérias são procariotos fotossintetizantes extremamente resistentes encontrados na maioria dos ambientes aquáticos (WHITTON, 2012). Elas são parte integral de muitos ecossistemas, mas, em condições propícias, como em ambientes ricos em nutrientes, eutrofizados, o número desses organismos cresce de forma descontrolada, formando as chamadas florações (CARMICHAEL, 2001). Cerca de 60 a 70% das florações observadas apresentam cepas produtoras de toxinas (cianotoxinas) (Fawell et al. 1993). Durante esses eventos extremos, durante a morte e lise das células, as cianotoxinas produzidas pelas cianobactérias são liberadas na água, o que pode ser fatal para pessoas e animais que consumam ou entre em contato com a água contaminada (PUGLIESE; FAVERO, 1998).

Além dos problemas direto à saúde do consumidor, as florações de cianobactérias causam prejuízos financeiros para as companhias de água. Efeitos deletérios no sabor e odor da água (WATSON, 2004), colmatação de filtros, aumento da demanda de produtos químicos, diminuição do tempo de operação (HO et al. 2012) são algumas das causas de preocupação do ponto de vista da operação de sistemas acometidos por florações.

Alguns estudos previram que a mudança climática associada a níveis crescentes de CO₂ atmosférico aumentará a ocorrência e intensidade de florações, além do aumento da dominância de cianobactérias nas comunidades fitoplanctônicas (VIANA, 2018 apud BEARDALL et al., 2009; PAERL & HUISMAN, 2009; PAUL, 2008; MOOIJ et al., 2005). Esse panorama expõe a importância que o controle de cianobactéria tem no futuro da gestão hídrica, onde a remoção de florações e cianotoxinas, sendo *in situ* ou em estações de tratamento de água, vem cada vez mais sendo usada (SVRCEK; SMITH, 2004).

3.2 Sensoriamento remoto

Segundo CAMPBELL et al. (2011) o sensoriamento remoto pode ser definido como a prática de derivar informações da superfície terrestre usando imagens de uma perspectiva superior, por meio da radiação eletromagnética refletida ou emitida pela terra. De maneira geral, o sensoriamento remoto extrai características físicas examinando respostas de diferentes comprimentos de ondas eletromagnéticas.

Com a exceção do zero absoluto, todos os objetos emitem radiação eletromagnética. Esses mesmos objetos também refletem a radiação emitida por outras fontes (CAMPBELL et al., 2011). De maneira algébrica, a radiância ($L_{e,\Omega,\lambda}$) terrestre detectada pelo sensor é o somatório da radiação refletida pela superfície, a radiação recebida diretamente do sol e a radiação difusa. Tomando como referência ondas eletromagnéticas, é possível definir a razão de irradiância e radiação emitida ou absorvida, chamada reflectância (R_{rs}). Essa característica é então utilizada para determinação de formato, tamanho e outras características físicas ou químicas do objeto observado pelo sensor (CAMPBELL et al., 2011 apud Parker and Wolff, 1965, p.21).

A grande disponibilidade de produtos de sensoriamento remoto se tornou uma fonte importante para pesquisadores e gestores da água. O sensoriamento remoto é um método eficiente e barato de analisar grandes corpos hídricos com boa cobertura temporal e acurácia razoável, o que é praticamente impossível com análises feitas *in situ*. Nesse contexto, satélites oferecem a oportunidade de monitorar eficientemente para determinar alguns parâmetros de qualidade da água, como clorofila-a, sedimentos suspensos, turbidez, fósforo total, matéria orgânica dissolvida, temperatura, profundidade de disco de Secchi, concentração de metais pesados, etc., em grande escala (CHAWLA; KARTHIKEYAN; MISHRA, 2020).

Para a determinação de variáveis de qualidade da água, as substâncias são divididas em Substâncias Óticamente Ativas (OAS) e Substâncias Não Óticamente Ativas (NOAS) (ANSFER; ALIKAS, 2019). Modelos de NOAS são gerados empiricamente, onde métodos estatísticos determinam coeficientes de bandas ou razão de bandas para determinação de concentrações (VAKILI; AMANOLLAHI, 2020). São exemplos de modelagem de NOAS pH, Oxigênio Dissolvido, Potencial de redução, Carbono Orgânico, Condutividade e Carbono Total (PIZANI et al., 2020).

A determinação de OAS como Clorofila-a, Turbidez e Transparência normalmente seguem uma modelagem Bio-Ótica onde parâmetros físicos e biológicos, como refração dispersão e fluorescência são equacionados (GOWER et al., 2005; GOWER; DOERFFER; BORSTAD, 1999). Além do método racional, modelos empíricos demonstram sua capacidade de adaptação para modelagem em águas das mais diversas características no mundo, onde respostas eletromagnéticas são ajustadas à dados *in situ*, gerando equações próprias para cada corpo hídrico (MATTHEWS, 2011; OUMA; NOOR; HERBERT, 2020; PAPENFUS et al., 2020).

Ademais, outra divisão feita nos modelos se deve à complexidade ótica do corpo hídrico. Água Caso-1 apresentam majoritariamente fitoplâncton como fonte de OAS,

enquanto águas Caso-2, também conhecidas com oticamente complexas, apresentam combinações de OAS, como Fitoplancton, matéria orgânica e sólidos suspensos.

3.2.1 Clorofila-a

Clorofila-a é um dos parâmetros mais utilizados no sensoriamento remoto por se tratar de um pigmento de fotossíntese presente em plantas, algas e cianobactérias. A sua presença em corpos d'água é ligada diretamente com a presença de floração de algas, de cianobactérias ou não, e é, portanto, um indicador do nível de eutrofização. No contexto do sensoriamento remoto, a clorofila-a apresenta absorção na banda azul ($\sim 0.4 \mu\text{m}$) e vermelha ($\sim 0.7 \mu\text{m}$) e refletância na banda verde ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) no espectro visível e refletância no infravermelho próximo ($\sim 0.8 \mu\text{m}$) (CHAWLA; KARTHIKEYAN; MISHRA, 2020). Portanto, para determinação de clorofila-a, grande parte da literatura sugere utilizar bandas entre 675nm e 700nm (Gholizadeh (GHOLIZADEH; MELESSE; REDDI, 2016).

3.2.2 Sentinel-2

O Sentinel-2 é um sistema formado por dois satélites em órbita diametralmente opostas, que oferece uma combinação de cobertura sistemática da superfície terrestre, baixo período de revisita (5 dias), alta resolução espacial e campo de visão largo para observações multiespectrais de 13 bandas nos espectros eletromagnéticos visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (DRUSCH et al., 2012). As resoluções espaciais e espectrais (Largura) de cada banda variam entre 10 e 60m e 15 e 115nm, respectivamente (Tabela 1).

A Agência Espacial Europeia (ESA), fornece três níveis de produtos do Sentinel-2, imagens nível 1B, 1C e 2A. O nível 1B apresenta produtos radiometricamente corrigidos em valores de radiância no Topo da Atmosfera (TOA), não georreferenciados, em grânulos de 23x25km. As imagens de nível 1C são apresentadas em cenas de 100km², projetadas em coordenadas geográficas. Os valores de radiância são expressos em refletância de TOA por pixel. Por fim, as imagens de nível 2A apresentam correções atmosféricas feitas sobre o produto 1C, entregando, portanto, valores de refletância de Fundo da Atmosfera (BOA). Em termos gerais, os níveis 1B e 1C representam valores de radiância e refletância, respectivamente, que chegam ao sensor do satélite, enquanto as imagens de nível 2A representam apenas os valores de refletância que saem da superfície observada, sem a interferência que a atmosfera terrestre apresenta.

Tabela 1 – Especificações de bandas do Sentinel-2

Banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura da banda (nm)	Resolução (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8A	865	20	20
9	945	20	60
10	1380	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20

Fonte: Autor

Lançado em 2015, o Sentinel-2 apresenta imagens de boa qualidade radiométrica e resolução espacial e temporal adequada, muito úteis nos estudos da qualidade da água principalmente em pequenos corpos hídricos continentais (DELEGIDO et al., 2019). Devido essas vantagens e a facilidade de acesso às imagens, nos últimos anos, a geração de modelos e algoritmos para determinação da qualidade da água vem crescendo de forma exponencial tanto no exterior (BONANSEA et al., 2019; BRESCIANI et al., 2019; CAO et al., 2020; CHAWLA; KARTHIKEYAN; MISHRA, 2020; CILLERO CASTRO et al., 2020; GUO et al., 2021; NASCIMENTO SILVA; PANELLA, 2018; OUMA; NOOR; HERBERT, 2020; YANG et al., 2020) quanto no Brasil (CAIRO et al., 2020; COELHO et al., 2017; PIZANI et al., 2020; RODRIGUES et al., 2018; ROTTA et al., 2021; SANTOS et al., 2020; WATANABE et al., 2018, 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O açude gavião (figura 1) localiza-se no nordeste brasileiro nos municípios cearenses de Pacatuba e Itaitinga, possui capacidade de armazenamento de 32,9 hm³ e área da bacia hidráulica e hidrográfica de 07 e 97 Km², respectivamente (Vidal, 2011). É responsável conjuntamente com os açudes Pacajus, Pacoti e Riachão pelo abastecimento de mais de 3 milhões de habitantes da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

Figura 1 – Localização do açude Gavião.



Fonte: Autor

4.2 Dados de coletas

Os dados in-situ do ponto GAV-05 (Lat:9568200, Long: 549215) de Clorofila-a (Cla) e densidade celular de cianobactérias entre 2008 e 2020 foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). A importância desse ponto se deve pela proximidade da área de tomada de água da Estação de Tratamento de Água, ETA-Gavião, que abastece a RMF. Análises estatísticas e formatação de dados foram feitas com o uso do R (R Core Team, 2014).

4.3 Dados de sensoriamento remoto e pré-processamento

Imagens nível 1C do período entre 2015 e 2020 do Sentinel 2 foram obtidas no Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). As imagens foram filtradas para que contenham apenas resultados com menos de 25% do produto encoberto por nuvens, ± 7 dias de diferença entre a passagem do satélite e as medições in situ além das coordenadas do ponto GAV-05 livres de obstáculos atmosféricos. As imagens foram então pré-processadas no software SNAP (v8.0), desenvolvido por Brockmann Consult, Array Systems Computing and Communication and Systèmes (C-S). As bandas com resolução de 60m e 20m foram transformadas em bandas com resolução de 10m usando a ferramenta Resampling disponível no software.

Finalmente, as refletâncias de topo da atmosfera (TOA) foram transformadas em refletância de fundo da atmosfera (BOA), utilizando o processador Sen2Cor (UWE et al., 2013), assumindo modelo de correção atmosférica, de terreno e cirrus com aerossol rural. Os valores de BOA das bandas B1-B8 foram então extraídos de um pixel 10x10m com coordenadas referentes ao ponto GAV-05.

4.4 Modelos de determinação de clorofila-a e cianobactérias

Avaliando os trabalhos de (WATANABE et al., 2019), (ANSPER; ALIKAS, 2019), (PIZANI et al., 2020), (CAIRO et al., 2020), (ROTTA et al., 2021), cinco modelos de determinação de clorofila-a (Cla) foram selecionados tendo em base as características físico-químicas do açude Gavião. Os dois modelos com maior performance propostos por DALL'OLMO (2005), Dall'Olmo 3B (1) e Dall'Olmo 2B (2), utilizaram as refletâncias (Rrs) das bandas B4, B5 e B6 para o cálculo.

$$\text{Índice} = (Rrs(B4)^{-1}Rrs(B5)^{-1}) \times Rrs(B6) \quad (1)$$

$$\text{Índice} = \frac{Rrs(B5)}{Rrs(B4)} \quad (2)$$

Maximum Chlorophyl Index (MCI) proposto por GOWER et al. (2005) também utiliza as bandas B4, B5 e B6, levando em consideração, no entanto, a razão da distância dos comprimentos de cada banda (3).

$$MCI = Rrs(B5) - Rrs(B4) - 0,53 \times (B6 - B4) \quad (3)$$

Modelos de regressão múltipla foram criados utilizando o intervalo de bandas B1-B8 (PIZANI et al., 2020), B3/B2 e B4/B2. Para a determinação dos fatores dos preditores, um modelo híbrido bidirecional stepwise foi aplicado resultando no modelo Stepwise 3B (4) e Stepwise B/B (5).

$$Cla = 35,005 + 1116,672 \times B3 - 2058,195 \times B4 + 1228,562 \times B6 \quad (4)$$

$$Cla = 102,12 - 84,68 \times \left(\frac{B3}{B2}\right) + 32,05 \times \left(\frac{B4}{B2}\right) \quad (5)$$

O Cyanobacteria Index (CI), descrito por WYNNE et al. (2008) e CI-multi, descrito por LUNETTA et al. (2015) foi adaptado para inclusão de bandas do Sentinel 2. Levando em consideração que CI é uma análise de Spectral Shape(SS), qualquer discrepância entre os intervalos e resolução de banda podem tornar o modelo não efetivo. Como o Sentinel 2 não possui banda em 620nm, própria para detecção de cianobactérias (Ficocianina), e resolução maior de 10nm, o modelo SS(681) (6) foi adaptado para SSa(665) (7), utilizando as bandas B3(560nm), B4(665nm) e B5(705nm), contendo os picos de fluorescência e absorção da Clorofila (COFFER et al., 2020).

$$SS(681) = Rrs(681) - Rrs(665) + (Rrs(665) - Rrs(709)) \times \left(\frac{\lambda(681) - \lambda(665)}{\lambda(709) - \lambda(665)}\right) \quad (6)$$

$$SSa(665) = (B4 - B5) \times \left(\frac{\lambda(B4) - \lambda(B3)}{\lambda(B5) - \lambda(B3)}\right) \quad (7)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

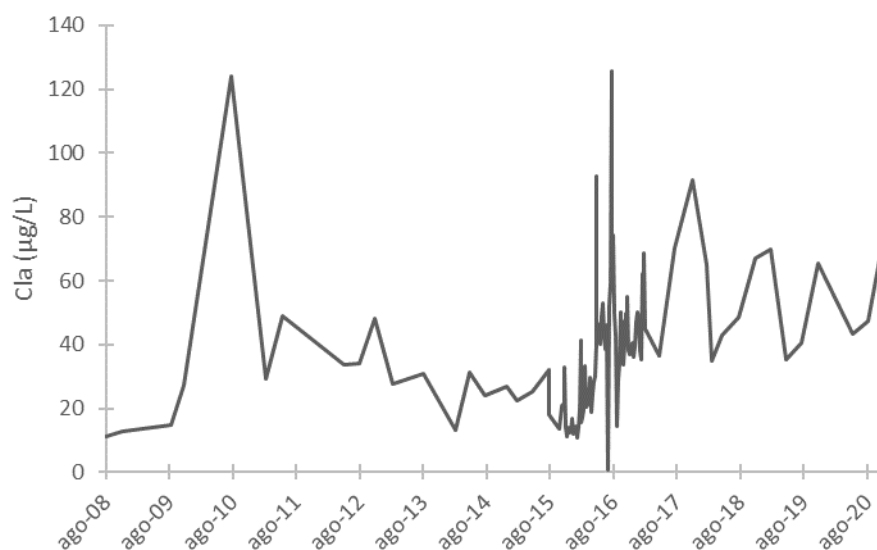
5.1 Dados de sensoriamento remoto

Seguindo os parâmetros de exclusão, das 414 imagens produzidas pelo satélite entre 2015 e 2020, 127 apresentaram cobertura de nuvens menor que 25% e, dessas, 20 foram selecionados por possuírem o ponto GAV-05 também sem cobertura. Dentre esses pontos, apenas 8 apresentaram diferença menor ou igual a 7 dias entre a data de sensoriamento e a data de coleta in situ. Sendo assim, menos de 2% das imagens disponíveis foram utilizadas. Este problema é causado pela incompatibilidade entre os dados gerados e os requeridos. Campanhas de análises dos açudes seguem padrões da gestão tradicional, onde as datas, horários e condições das coletas não levam em consideração a geração de imagem dos satélites. Enquanto suficientes para geração de relatórios de qualidade trimestrais, estas práticas são extremamente prejudiciais na implantação de sistemas mais avançados. No caso estudado, muitas das imagens descartadas por ter o ponto de coleta encoberto por nuvens, teria esse problema resolvido caso a coleta fosse feita poucos minutos antes ou depois. Além disso, a compatibilização entre o sensoriamento e a coleta diminuiria o erro inerente do modelo quando as imagens estão defasadas em até 7 dias.

5.2 Clorofila-a e densidade celular

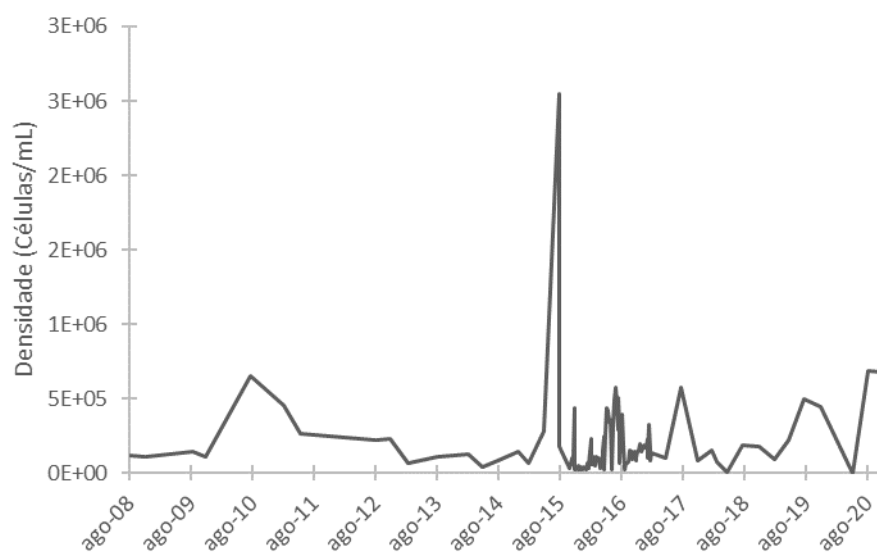
Dados de 2008 a 2020 (Gráfico 1) mostram que o ponto GAV-05 apresentou mediana de 36,33 ug/L de Cla com valores máximos e mínimos de 125,71 ug/L e 10,95 ug/L, respectivamente. Nesse mesmo período, a densidade de células de cianobactéria (Gráfico 2) variou entre 855 células/ml e 2.549.422 células/ml, com mediana de 130.524 células/mL. Quanto aos valores usados para determinação do modelo, a mediana, máximo e mínimo foram de 54,46 ug/L, 72,89 ug/L e 35,24 ug/L, respectivamente.

Gráfico 1 – Dados históricos de Clorofila-a (Cla).



Fonte: Autor

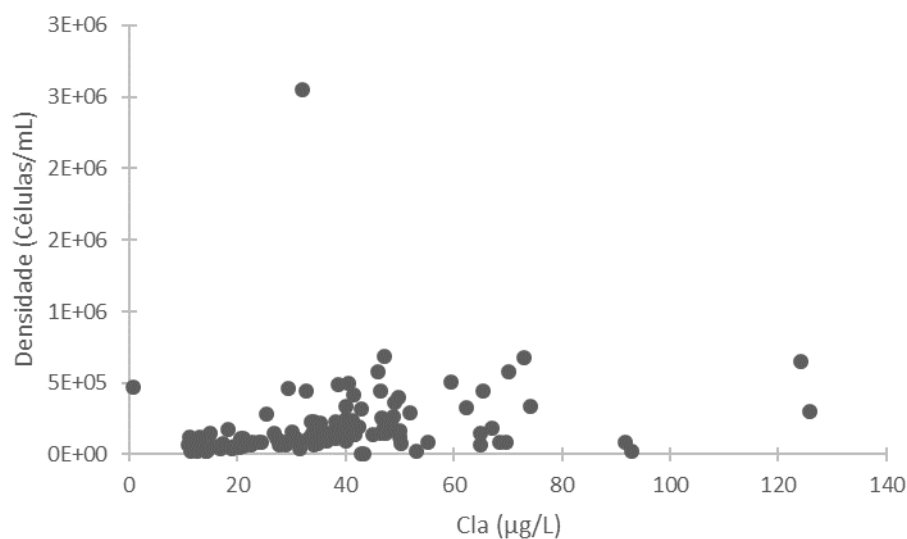
Gráfico 2 – Dados históricos de densidade celular.



Fonte: Autor

ISENSTEIN et al. (2014) afirma haver uma relação linear forte entre Cla e o biovolume de cianobactérias. Outrossim, WYNNE et al. (2008) demonstra que a densidade celular derivada do biovolume é também linearmente relacionada com a taxa espectral de refletância e fluorescência da clorofila a. No entanto, a relação entre Cla e densidade celular no ponto GAV-05 (Gráfico 3) foi extremamente baixa, apresentando um $R^2=0,05$.

Gráfico 3 – Relação Densidade celular x Clorofila-a (Cla).



Fonte: Autor

O SSa(665) quando aplicado ao banco de dados também apresentou performance extremamente baixa ($R^2=0,013$). Enquanto a independência entre Cla e a densidade celular possa ser explicada pelas dinâmicas da composição do fitoplâncton, a falha do SSa(665) está atrelada à incompatibilidade das bandas espectrais comparadas à do sistema do modelo original (MERIS). A baixa eficácia do SSa(665) traz à tona a importância de sistemas integrados onde mais de um satélite é utilizado para determinação de diferentes parâmetros.

5.3 Modelos de determinação de Cla

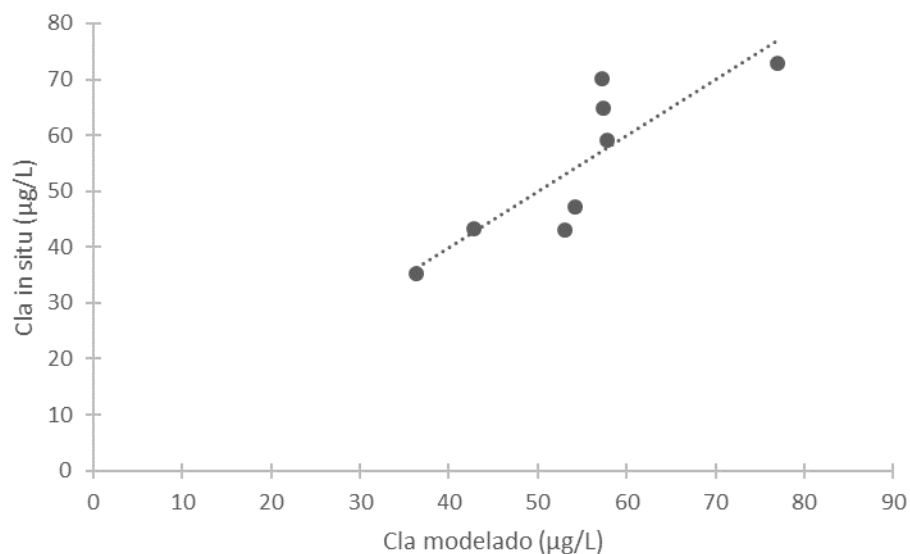
Para determinação de Cla, dos cinco modelos testados, apenas dois mostraram resultados satisfatórios. Em concordância com WYNNE et al. (2008), os modelos que utilizam as bandas azul e verde apresentam baixa eficácia devido à complexidade óptica da água do açude Gavião. Em contrapartida, os dois modelos que utilizaram a banda vermelha apresentaram valores de R^2 de 0,43 para MCI e 0,72 para o modelo de regressão linear Stepwise 3B. Os resultados estatísticos dos modelos testados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados estatísticos dos modelos.

Modelo	R ²	R ² ajustado	RMSE
Stepwise 3B	0,717867	0,506268	7,003215
MCI	0,432703	0,00723	9,930614
Dall’olmo 3B	0,195075	-0,40862	11,82901
Stepwise B/B	0,157159	-0,17998	32,72338
Dall’olmo 2B	0,096821	-0,26445	54,6236

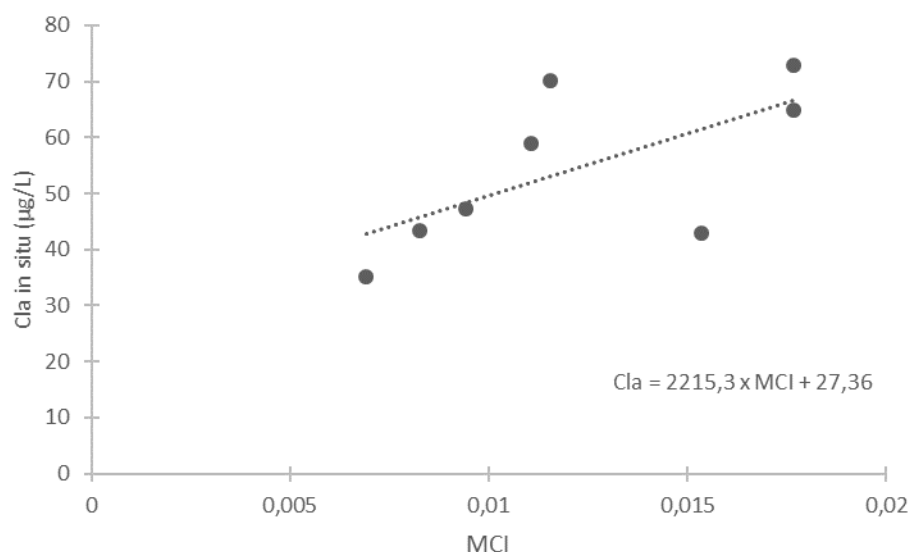
Fonte: Autor

O valor de R² encontrado para o modelo de regressão Stepwise 3B está em concordância com o trabalho de PIZANI et al. (2020) e o de MCI, o dobro do encontrado para imagens sem correção atmosférica, descrito por ANSPER e ALIKAS (2019). WATANABE et al. (2019) apresentou valores de de R² da ordem de 0,8 para os modelos de Dall’olmo e derivado de Stepwise B/B, tendo, contudo, utilizado diferença de datas de coleta e de sensoriamento igual a zero, além de bandas simuladas.

Gráfico 4 – Correlação de Cla modelado em Stepwise 3B e Cla in situ.

Fonte: Autor

Gráfico 5 – Correlação do Índice MCI e Cla in situ.

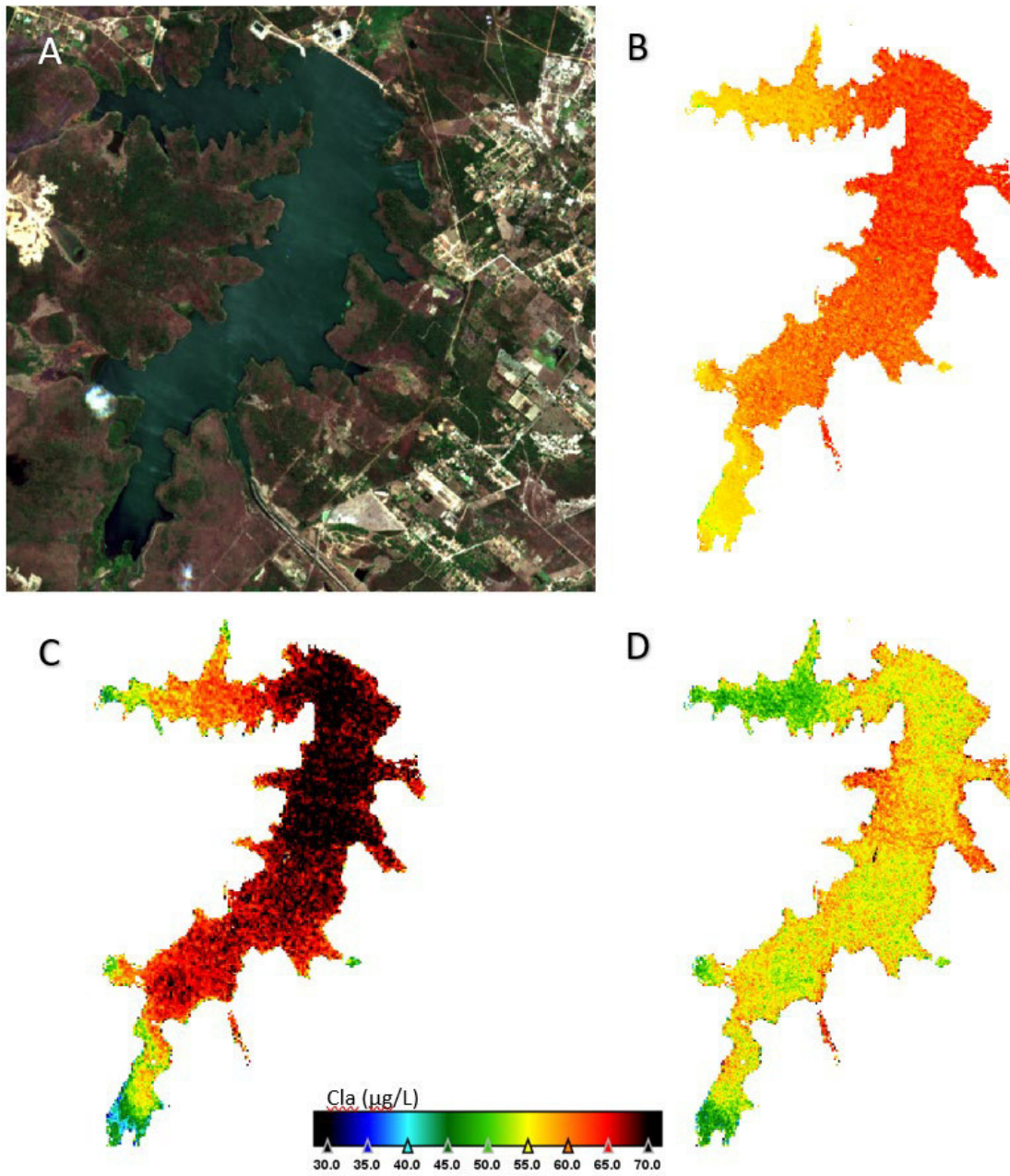


Fonte: Autor

Os modelos encontrados de MCI e Stepwise 3B foram aplicados para determinação da distribuição espacial e temporal de Cla no açude gavião. Além disso, SSa(665) foi aplicado para determinação da composição teórica do fitoplâncton.

A figura 2, apresenta os resultados para o único caso em que a coleta in situ coincide com a data do sensoriamento, sendo A as cores naturais, B SSa(665) com escala sem dimensão física e C e D, MCI e Stepwise 3B, respectivamente, com escala de cor de Cla em µg/L. Comparando C e D, observa-se a melhora tanto na resolução quanto na precisão do modelo ajustado ao ponto, sendo possível perceber zonas distintas de concentração de clorofila. Assumindo a validade da adaptação de SSa(665), é possível também atestar a composição teórica dos organismos produtores de Cla em B, onde quanto mais escuro, maior a proporção de cianobactérias na composição do fitoplâncton. Zonas de diferentes concentrações de Cla apresentam valores próximos de SSa(665), logo composições também parecidas. Sendo assim, considerando a distribuição de Cla e os resultados de SSa(665), seria possível determinar a formação, localização e extensão de florações de cianobactérias.

Figura 2 – Resultados de modelagem de sensoriamento remoto.



6. CONCLUSÃO

Enquanto ferramenta valiosa para a gestão dos recursos hídricos, o sensoriamento remoto precisa ser integrado de forma inteligente na rotina de companhias e órgãos para que seu uso tenha o potencial usado por completo. Apesar das incompatibilidades de dados e tecnológicas dos modelos, os resultados confirmam esse potencial da técnica no controle de cianobactérias.

Foi gerado um modelo para determinação espaço-temporal de clorofila-a no açude gavião com resolução espacial de 10 metros e temporal de 5 dias. O modelo, denominado Stepwise 3B, utilizou as bandas B3, B4 e B6 do sistema de satélites Sentinel 2, obtendo precisão expressiva de $R^2=0,71$. Além disso, como subproduto, foi derivado um modelo para determinação de cianobactérias, denominado SSa(665), que, mesmo com precisão extremamente baixa ($R^2=0,01$) na determinação da densidade celular, se apresenta como uma alternativa na identificação de florações de cianobactérias.

Por fim, além dos resultados numéricos supracitados, dois entendimentos sobre a tecnologia de sensoriamento remoto foram identificados. Em primeiro, atestou-se a necessidade de adaptação da forma como os dados são gerados. É preciso entender que as novas tecnologias da gestão hídrica são inteiramente dependentes da geração de dados primários de qualidade. A segunda máxima é que nenhum sistema é robusto o suficiente por si só. O segredo para o sucesso está na integração de técnicas e modelos, onde o sensoriamento remoto complementa as análises de campo e vice-versa.

REFERÊNCIAS

- ANSPER, A.; ALIKAS, K. Retrieval of chlorophyll a from Sentinel-2 MSI data for the European Union water framework directive reporting purposes. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, 2019.
- BONANSEA, M. et al. Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 1, p. 34–44, 2019.
- BRESCIANI, M. et al. Monitoring water quality in two dammed reservoirs from multispectral satellite data. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup4, p. 113–122, 2019.
- CAIRO, C. et al. Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical brazilian reservoir based on msi/sentinel-2 data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, 2020.
- CAMPBELL, James B.; WYNNE, Randolph H. **Introduction to remote sensing**. Guilford Press, 2011.
- CAO, H. et al. Inversion and distribution of total suspended matter in water based on remote sensing images—A case study on Yuqiao Reservoir, China. **Water Environment Research**, p. 0–2, 2020.
- CARMICHAEL, W. W. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal Health Effects of Toxin-Producing Cyanobacteria: " The CyanoHABs " Health Effects of Toxin-Producing Cyanobacteria: " The CyanoHABs " **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal Human and Ecological Risk Assessment**, v. 7, n. 5, p. 1393–1407, 2001.
- CHAWLA, I.; KARTHIKEYAN, L.; MISHRA, A. K. A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes. **Journal of Hydrology**, v. 585, n. March, p. 124826, 2020.
- CILLERO CASTRO, C. et al. An UAV and Satellite Multispectral Data Approach to Monitor Water Quality in Small Reservoirs. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1–33, 2020.

- COELHO, C. et al. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the brazilian semiarid region. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 12, 2017.
- COFFER, M. M. et al. Quantifying national and regional cyanobacterial occurrence in US lakes using satellite remote sensing. **Ecological Indicators**, v. 111, n. September 2019, 2020.
- DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A. Erratum: Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: Experimental results (Applied Optics (2005) 44 (412-422)). **Applied Optics**, v. 44, n. 16, p. 3342, 2005.
- DELEGIDO, J. et al. Turbidity and secchi disc depth with sentinel-2 in different trophic status reservoirs at the comunidad valenciana. **Revista de Teledeteccion**, v. 2019, n. 54, p. 15–24, 2019.
- DRUSCH, M. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25–36, 2012.
- FAWELL, J. K. et al. Blue-green algae and their toxins-analysis, toxicity, treatment and environmental control. **WATER SUPPLY-OXFORD-**, v. 11, p. 109-109, 1993.
- GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 8, 2016.
- GOWER, J. et al. Use of the 709 nm band of meris to detect intense plankton blooms and other conditions in coastal waters. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, n. 572, p. 365–368, 2005.
- GOWER, J. F. R.; DOERFFER, R.; BORSTAD, G. A. Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 9, p. 1771–

1786, 1999.

GUO, H. et al. A machine learning-based strategy for estimating non-optically active water quality parameters using Sentinel-2 imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 1841–1866, 2021.

HO, Lionel; SAWADE, Emma; NEWCOMBE, Gayle. Biological treatment options for cyanobacteria metabolite removal—A review. **Water Research**, v. 46, n. 5, p. 1536-1548, 2012.

ISENSTEIN, E. M.; TRESKOTT, A.; PARK, M.-H. Multispectral Remote Sensing of Harmful Algal Blooms in Lake Champlain, USA. **Water Environment Research**, v. 86, n. 12, p. 2271–2278, 2014.

LUNETTA, R. S. et al. Evaluation of cyanobacteria cell count detection derived from MERIS imagery across the eastern USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 24–34, 2015.

MATTHEWS, M. W. A current review of empirical procedures of remote sensing in Inland and near-coastal transitional waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 21, p. 6855–6899, 2011.

NASCIMENTO SILVA, H. A.; PANELLA, M. Eutrophication Analysis of Water Reservoirs by Remote Sensing and Neural Networks. **Progress in Electromagnetics Research Symposium**, v. 2018- August, p. 458–463, 2018.

OUMA, Y. O.; NOOR, K.; HERBERT, K. Modelling Reservoir Chlorophyll- a, TSS, and Turbidity Using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI Satellite Sensors with Empirical Multivariate Regression. **Journal of Sensors**, v. 2020, 2020.

PAPENFUS, M. et al. Exploring the potential value of satellite remote sensing to monitor chlorophyll-a for US lakes and reservoirs. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 12, 2020.

PIZANI, F. M. C. et al. Estimation of water quality in a reservoir from sentinel-2 msi and

landsat-8 oli sensors. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 5, n. 3, p. 401–408, 2020.

PUGLIESE, G.; FAVERO, M. S. Liver Failure and Death After Exposure to Microcystins at Hemodialysis Center. **Infection Control & Hospital Epidemiology**, v. 19, n. 6, p. 465–465, 1998.

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical

RODRIGUES, T. et al. Estimating the optical properties of inorganic matter-dominated oligo-to-mesotrophic inland waters. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018.

ROTTA, L. et al. A single semi-analytical algorithm to retrieve chlorophyll-a concentration in oligo-to-hypereutrophic waters of a tropical reservoir cascade. **Ecological Indicators**, v. 120, n. September 2020, p. 106913, 2021.

SANTOS, D. R. A. E. et al. Evaluation of Sentinel-2/Msi Imagery Products Level-2a Obtained by Three Different Atmospheric Corrections for Monitoring Suspended Sediments Concentration in Madeira River, Brazil. **2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference, LAGIRS 2020 - Proceedings**, p. 207–212, 2020.

S.B. WATSON Aquatic taste and odor: a primary signal of drinking-water integrity J. Toxicol. Environ. Health-part A-Curr. Iss., 67 (20–22) (2004), pp. 1779-1795.

SVRCEK, C.; SMITH, D. W. Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: A review. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 3, n. 3, p. 155–185, 2004.

UWE, M.-W. et al. Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor : Architecture , Algorithms and First Results. **ESA Living Planet Symposium 2013, Edinburgh, UK**, v. 2013, n. December, p. 3–10, 2013.

VAKILI, T.; AMANOLLAHI, J. **Determination of optically inactive water quality variables using Landsat 8 data: A case study in Geshlagh reservoir affected by agricultural land use.** [s.l.] Elsevier Ltd, 2020. v. 247

VIANA, Amanda Góis. Avaliação da integridade celular em duas espécies de cianobactérias na etapa de coagulação – verificação das condições hidráulicas e adição de carbono ativado em pó. 2018. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

WATANABE, F. et al. Estimation of chlorophyll-a concentration from optimizing a semi-analytical algorithm in productive inland waters. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1–18, 2018.

WATANABE, F. et al. Mapping the chlorophyll-a horizontal gradient in a cascading reservoirs system using MSI Sentinel-2A images. **Advances in Space Research**, v. 64, n. 3, p. 581–590, 2019.

WHITTON, B. A. Ecology of cyanobacteria II: Their diversity in space and time. **Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time**, v. 9789400738, p. 1–760, 2012.

WYNNE, T. T. et al. Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 12, p. 3665–3672, 2008.

YANG, X. et al. Temporal and spatial variations of chlorophyll a concentration and eutrophication assessment (1987-2018) of donghu lake in wuhan using landsat images. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2020.