

Espectrorradiometria de Campo e Dados Sentinel-2 Aplicado ao Estudo da Clorofila-a em Corpos Hídricos de Reservatórios

Field Spectroradiometry and Sentinel-2 Data Applied to the Study of Chlorophyll-a in Water Bodies of Reservoirs

Erli Pinto dos Santos¹ , Taíse Bomfim de Jesus² , Ayala de Souza Reis Carneiro³ ,
Rosângela Leal Santos⁴ , Washington de Jesus Sant'Anna da Franca-Rocha² ,
& Taiara Souza Costa¹ 

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, Brasil

²Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Ciências Exatas, Feira de Santana, BA, Brasil

³Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Ciências Biológicas, Feira de Santana, BA, Brasil

⁴Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, Feira de Santana, BA, Brasil

E-mails: erli.santos@ufv.br; taise@uefs.br; ayala.reis@hotmail.com; rosaleal@uefs.br; wrocha@uefs.br; taiara.costa@ufv.br

Resumo

O monitoramento da qualidade de água em corpos hídricos é fundamental para a conservação destes, por isso metodologias de monitoramento em larga escala são cada vez mais imprescindíveis para monitorar ações antrópicas e naturais que alteram a qualidade destes ambientes. Partindo dessa premissa, este trabalho propôs utilizar dados radiométricos obtidos *in situ* e multispectrais do sensor MSI (*Multispectral Instrument*) a bordo do satélite Sentinel-2 para estudar o comportamento da clorofila-a como parâmetro de qualidade de água, em reservatório no curso do rio Juliana, na Área de Preservação Ambiental (APA) do Pratigi, Bahia, Brasil. A espectrorradiometria de campo foi empregada para estudar o comportamento ultraespectral do corpo hídrico, visando identificar feições da presença do pigmento. Com auxílio de técnicas de extração de informações, foi possível identificar a presença da clorofila na região do espectro vermelho e infravermelho próximo, possibilitando a escolha de razões de bandas do MSI. Dentre as relações matemáticas de bandas do MSI escolhidas, as que apresentaram melhor ajuste às concentrações de clorofila-a foram as razões Verde-Vermelho e Infravermelho próximo-Vermelho, com r^2 de 0,771 e 0,895, respectivamente, mostrando que, mesmo não tendo sido desenvolvido com a finalidade de monitorar ambientes aquáticos, os resultados demonstram um potencial de uso dos dados deste sensor para monitoramento em larga escala.

Palavras-chave: Derivada Espectral; Mata Atlântica; Águas Continentais

Abstract

Monitoring water quality in water bodies is fundamental for their conservation. In this sense, large-scale monitoring methodologies are increasingly essential to monitor anthropic and natural actions that change the quality of these environments. Based on this premise, this paper proposes to use multispectral data from the MSI sensor (*MultiSpectral Instrument*) onboard the Sentinel-2 satellite constellation to study chlorophyll-a behavior as a parameter of water quality, in the reservoir in the course of the Juliana River, in the Pratigi Environmental Preservation Area (EPA), Bahia, Brazil. Field spectroradiometry was used to study the hyperspectral behavior of the water body, aiming to identify features of the presence of the pigment. With the aid of information extraction techniques, it was possible to identify the presence of chlorophyll in the region of the near red and infrared spectrum, allowing the choice of MSI band ratios. Among the mathematical relationships of MSI bands chosen, those that presented better adjustment to chlorophyll-a concentrations were the Green-Red and Near infrared-Red ratios, with r^2 of 0.771 and 0.895 respectively, showing that even though it was not developed to monitor aquatic environments, the results demonstrate the potential use of data from this sensor for large-scale monitoring.

Keywords: Spectral Derivative; Atlantic Forest; Continental Waters

1 Introdução

Os corpos hídricos constituem-se em um dos ambientes mais sensíveis do planeta, e quaisquer mudanças nesses ecossistemas podem alterar a sua qualidade (Gholizadeh, Melesse & Reddi 2016). Sendo a qualidade da água um descritor geral das suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Ritchie, Zimba & Everitt 2003), estas devem ser monitoradas para gerenciamento de atividades bem como para a preservação do habitat de organismos aquáticos. Nesse aspecto o sensoriamento remoto se destaca como uma ferramenta de monitoramento, e coleta de dados não intrusiva.

Os sistemas de observação da Terra a partir de sensores aéreos e orbitais, em sinergia com medições *in situ*, fornecem a base para o mapeamento de atividades antrópicas e naturais (Chen et al. 2016). No caso dos recursos hídricos, o sensoriamento remoto é usado para encontrar diferenças e relações entre a radiação eletromagnética solar refletida e algumas variáveis limnológicas capazes de alterar as propriedades espectrais da água (Guimarães et al. 2017), e seus componentes opticamente ativos (COA's). Dentre estes, estão os sólidos totais em suspensão, a matéria orgânica dissolvida e os fitoplânctons (Ha et al. 2017).

Sob essa ótica, o monitoramento de sistemas aquáticos tem sido uma das mais bem estabelecidas aplicações do sensoriamento remoto (Gholizadeh, Melesse & Reddi 2016), mais especificamente o monitoramento da clorofila-a (Schalles 2006). A clorofila-a é considerada um indicador de fitoplânctons e biomassa em água, além de indicar o nível de eutrofização de um corpo hídrico (Ha et al. 2017).

O uso de sensores hiperespectrais a nível de campo é importante para entendimento do comportamento espectral do alvo. Os espectros coletados *in situ* podem identificar o COA presente na água, e ser usado como dado bruto para modelo de estimativa da concentração de clorofila-a (Guimarães et al. 2017). Além disso, o entendimento das propriedades ópticas do corpo hídrico em questão é essencial para a escolha de melhores combinações de bandas para estimativa e espacialização da clorofila-a usando dados de satélites orbitais (Ha et al. 2017).

Já o uso de sensores aéreos e orbitais são uma ferramenta para monitoramento em larga escala, visto que recobrem extensas áreas. A tecnologia destes sensores é uma ferramenta para coletar dados espaço-temporais consistentes para a avaliação dos parâmetros de qualidade da água em lagos (Bresciani et al. 2011). Destacam-se os trabalhos de Laliberté et al. (2018), Novo et al. (2006), Cicerelli & Galo (2015), Guimarães et al. (2017), Anspér

& Alikas (2018), Zheng & Digiacomio (2017), focados no monitoramento da clorofila-a com uso de diferentes sensores. Entretanto muitos destes sensores apresentam potenciais e restrições para essa aplicação, como limitação na resolução espacial e espectral (Ritchie, Zimba & Everitt 2003). Nesse contexto surge o MSI (*Multispectral Sensor Imager*) dos satélites Sentinel-2 A e B, que apesar de não terem sido desenvolvidos para esta finalidade, tiveram potencial para uso apontado por Toming et al. (2016) e Ha et al. (2017).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo identificar a presença da clorofila-a utilizando dados hiperespectrais obtidos *in situ* por espectrorradiometria de campo nos pontos amostrais e, a partir da identificação das feições da presença da clorofila-a, calcular a sua relação com as bandas multiespectrais do sensor MSI Sentinel-2. Dessa forma este estudo considera a importância da sinergia entre sensores a nível de solo e sensores orbitais para entendimento do comportamento espectral de águas interiores.

2 Metodologia

2.1 Área de Estudo e Amostragem

A área de estudo deste trabalho foi um lago artificial formado pelo reservatório de água, no curso do rio Juliana, na bacia hidrográfica do rio Juliana, conforme ilustra a Figura 1. A bacia está localizada na APA do Pratigi, que por sua vez está inserida no bioma Mata Atlântica, no Estado da Bahia, Brasil. O reservatório é destinado ao uso humano, e à produção agrícola como irrigação e piscicultura. O lago possui um espelho d'água de aproximadamente 40 ha, e nessa extensão foram escolhidos 4 pontos amostrais, tendo como critério a acessibilidade. A amostragem em campo foi realizada no dia 28 de novembro de 2017 coletando 1,0 L de água para quantificar clorofila-a em laboratório, seguindo recomendações da American Public Health Association (2017).

Simultaneamente à amostragem de água, os dados radiométricos foram coletados *in situ* usando um espectrorradiômetro modelo ASD FieldSpec 4 Hi-Res. O espectrorradiômetro possui faixa de captação de sinal de 350 a 2500 nm, totalizando 2.151 bandas espectrais. O sensor é operado por uma unidade controladora (lap-top Panasonic com Windows 7 ®) e uma unidade detectora (fibra óptica) com campo de visada de 25 graus. As medições foram tomadas entre 13:00 e 14:00 calibrando a irradiância solar usando uma placa de spectralon, para obter a reflectância do alvo.

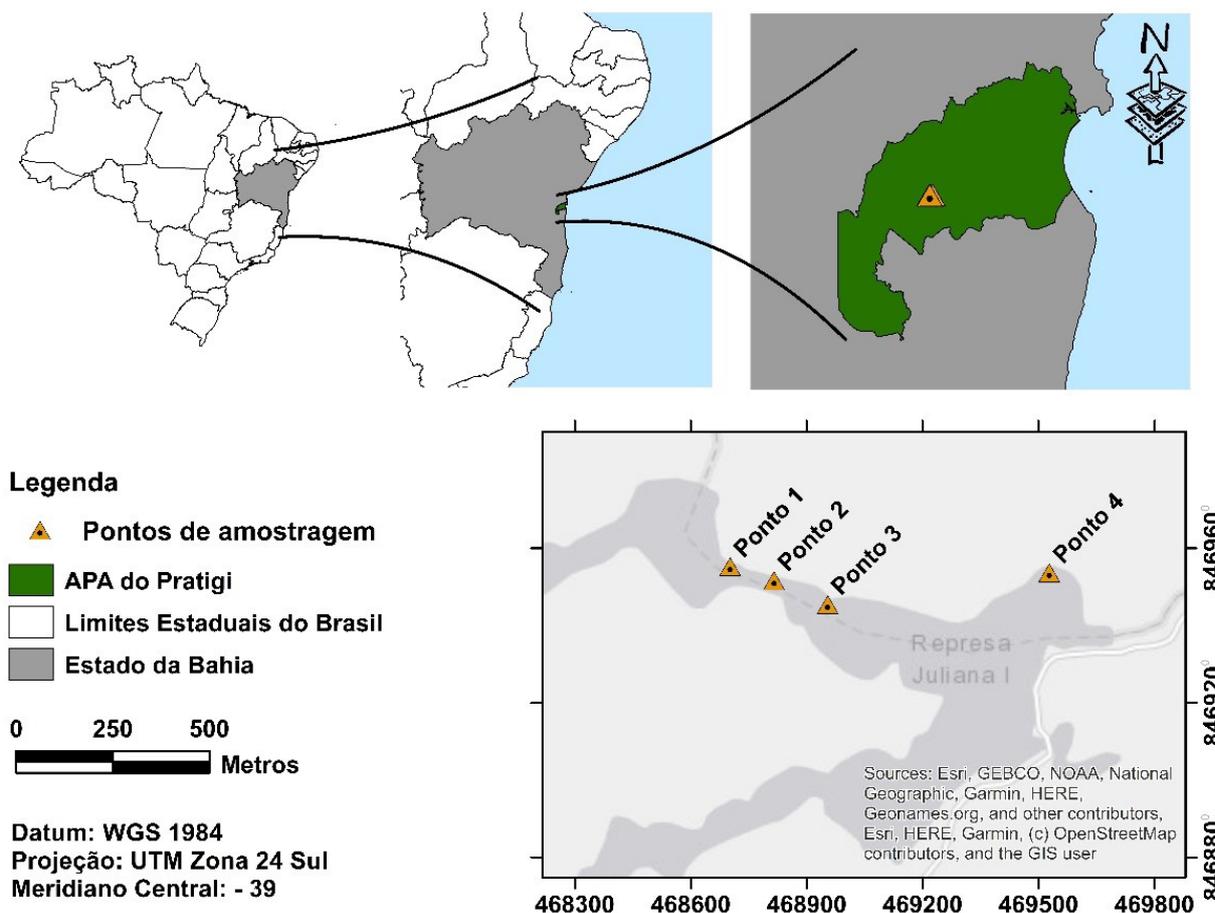


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo evidenciando os pontos de amostragem.

2.2 Determinação da Clorofila-a

A quantificação da clorofila-a foi feita por espectrofotometria de acordo com o método estabelecido pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association 2017). A determinação em laboratório foi feita usando acetona (C₃H₆O) 100% como extrator orgânico.

2.3 Processamento de Dados Radiométricos

Obtidos os dados brutos de reflectância, estes passaram por um pré-processamento. Este pré-processamento consistiu de duas etapas: a) gerar uma curva espectral média para cada ponto amostrado, visto que no campo foram feitas 5 medições para cada ponto; b) aplicação de um filtro de média móvel (equação 1) na curva média com objetivo de remover ruídos. A remoção de ruídos foi necessária, pois as técnicas de extração de informações (como a derivada espectral) são sensíveis a ruídos (Cloutis 1996; Rudorff et al. 2007).

$$\hat{S}(\lambda_j) = \frac{\sum S(\lambda_i)}{n} \tag{1}$$

Em que $\hat{S}(\lambda_j)$ é o novo valor obtido para o ponto médio dentro da janela de filtragem (adimensional); $S(\lambda_i)$ é o sinal verdadeiro do espectro; e o n é o número de pontos de amostragem ou tamanho do filtro. Esse pré-processamento gera o primeiro resultado radiométrico, que é a curva espectral de cada ponto amostral, e, a partir deles são aplicadas sobre os espectros as técnicas de extração de informações.

2.3.1 Remoção do Contínuo

A primeira técnica de extração de informações aplicada sobre os espectros de reflectância foi a remoção do contínuo. Essa técnica objetiva isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância. Inicialmente é definido o espectro contínuo em cada feição de absorção (Figura 2B). Este é estabelecido pela aplicação da equação 2, cujos parâmetros lineares e angulares foram obtidos através das equações 3 e 4, respectivamente.

$$\rho_{CONTINUOUS}(\lambda) = w + k\lambda \tag{2}$$

$$w = \frac{[y_1(\lambda_2 - \lambda_1)] + [-\lambda_1(y_2 - y_1)]}{\lambda_2 - \lambda_1} \tag{3}$$

$$k = \frac{y_2 - y_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \tag{4}$$

Em que, $\rho_{CONTINUOUS}(\lambda)$ é a reflectância do espectro contínuo (adimensional) em função do comprimento de onda; w e k são os coeficientes linear e angular da equação da reta, λ_1 e λ_2 representam o comprimento de onda inferior e superior da banda (nm); y_1 e y_2 representam a reflectância observada nos limites superior e inferior da banda (adimensional). O segundo passo foi a remoção de feições contínuas calculando a razão entre $\rho(\lambda)$ (reflectância original, Figura 2 A) e $\rho_{CONTINUOUS}(\lambda)$ (Figura 2 B) aplicando a equação 5. O resultado é a curva de reflectância normalizada, ilustrada pela Figura 2C.

$$\rho_{CR}(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\rho_{CONTINUOUS}(\lambda)} \tag{5}$$

2.3.2 Derivada Espectral

A segunda técnica de extração de informações aplicadas sobre as curvas espectrais foi a derivada espectral,

proposta por Tsai & Philpot (1998) para verificar variações no comportamento espectral da água (Rudorff et al. 2007). Foi aplicada pelo método de aproximação finita considerando que este pode ser usado para estimar derivadas por um plano apropriado de diferença em concordância com uma finita banda de resolução. Portanto, a derivação foi realizada até a segunda ordem, sendo que a primeira derivada foi aplicada usando a equação 6 e a derivada de segunda ordem foi aplicada usando a equação 7.

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_i \cong \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} \tag{6}$$

$$\left. \frac{d^2s}{d\lambda^2} \right|_j = \frac{d}{d\lambda} \left(\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_j \right) \cong \frac{s(\lambda_i) - 2s(\lambda_j) + s(\lambda_k)}{2\Delta\lambda} \tag{7}$$

Em que, $\Delta\lambda$ representa a diferença entre comprimentos de onda, ou separação entre as bandas adjacentes: $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$, sendo que $\lambda_j > \lambda_i$ é o intervalo entre as bandas (que é constante); $s(\lambda_i)$ e $s(\lambda_j)$ são valores de reflectância dos comprimentos de onda $\lambda_j > \lambda_i$, respectivamente. $\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_j = \lambda_j - \lambda_i$, $\lambda_k > \lambda_j > \lambda_i$. A partir daí derivadas de outras ordens são calculadas iterativamente e qualquer ordem de derivada é possível, com o uso da aproximação finita (Tsai & Philpot 1998).

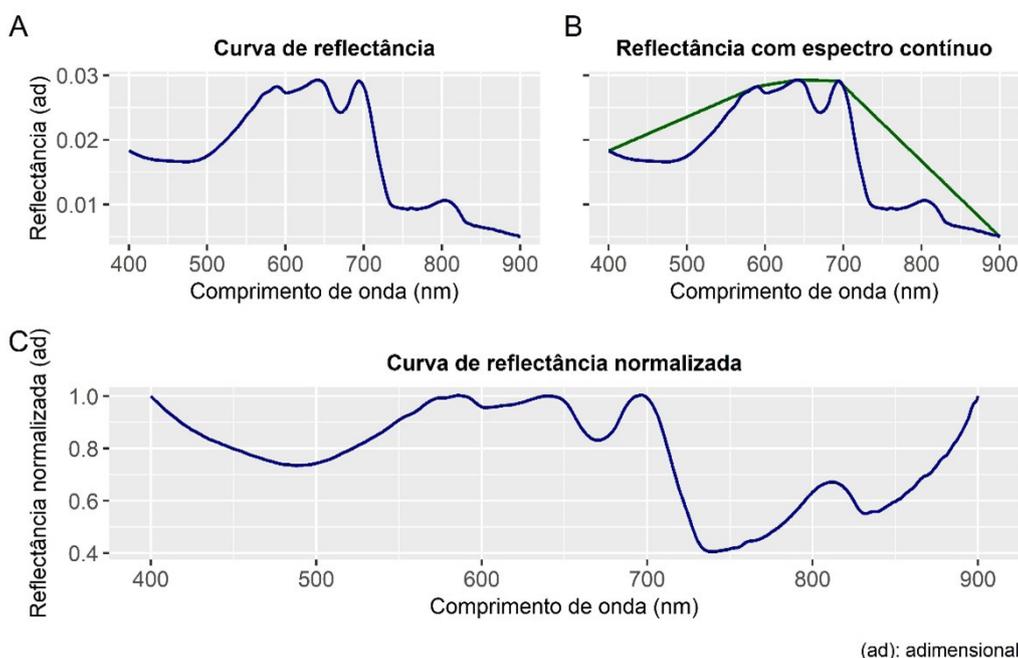


Figura 2 Passos para aplicação da remoção do contínuo, mostrando em: A. curva de reflectância; B. curva de reflectância com espectros contínuo nas feições de absorção, para todo o intervalo de interesse (400 a 900 nm); e C. a curva de reflectância normalizada.

2.4 Dados Sentinel-2 e Processamento

O satélite Sentinel-2 foi escolhido como fonte de dados orbitais do trabalho. O Sentinel-2 possui o sensor MSI o qual realiza imageamento em 13 bandas (Figura 3) multiespectrais localizadas em diferentes regiões do espectro eletromagnético: visível, infravermelho próximo e de ondas curtas. A cena foi adquirida do portal Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>), tendo sido capturada pelo satélite Sentinel-2A, datada de 27/11/2017 (dia anterior à amostragem em campo).

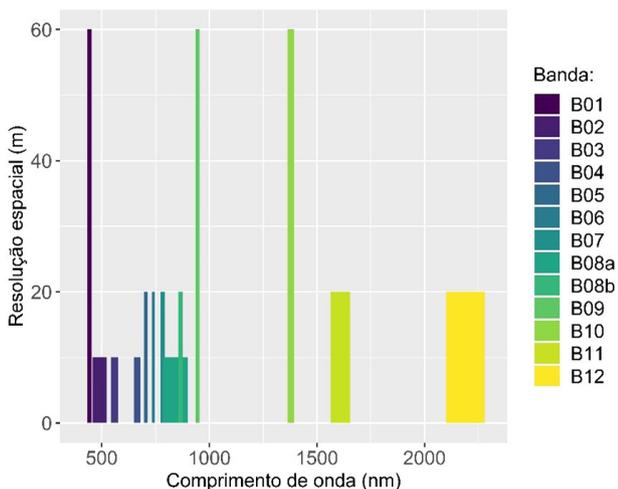


Figura 3 Resolução espacial, largura de banda e posição das bandas multiespectrais do sensor MSI ao longo do espectro eletromagnético visível, infravermelho próximo até o infravermelho de ondas curtas.

Fonte dos dados: European Space Agency (2016a).

As imagens da cena escolhida foram processadas com a ferramenta *Sentinel-2 Toolbox (S2TBX)* no software *Sentinel Application Platform (SNAP)*. A primeira etapa foi a correção atmosférica para obter reflectância da base da atmosfera (BOA), o que foi feito usando o algoritmo Sen2Cor (European Space Agency 2016b). Então realizada a correção atmosférica, as bandas B3, B4, B5 e B6 (reflectância BOA) foram utilizadas no cômputo da relação vermelho-vermelho limítrofe (equação 8) proposto por Toming et al. (2016), da razão verde-vermelho e NIR-vermelho (equações 9 e 10, respectivamente) propostas por Ha et al. (2017)

$$B5 - \frac{B4 + B6}{2} \tag{8}$$

$$\frac{B3}{B4} \tag{9}$$

$$\frac{B5}{B4} \tag{10}$$

2.5 Análise Estatística

Análise de regressão linear foi aplicada para confrontar os dados obtidos a partir das plataformas de sensoriamento com o conteúdo de clorofila-a do reservatório, verificando assim o comportamento dos dados de sensores como variáveis explicativas do conteúdo de clorofila-a do lago. Dessa forma, foi aplicada a regressão por mínimos quadrados e para verificar o agrupamento dos dados, foi gerado o coeficiente de determinação. O processamento dos dados radiométricos, bem como a análise estatística, foi feito usando linguagem **R v3.5.3** (R Core Team 2019) em software **RStudio v1.1.463** (RStudio Team 2018) utilizando os pacotes **dplyr** e **tidyr** para organizar os dados (Wickham et al. 2021; Wickham 2021), bem como os pacotes **ggplot2** e **ggpmisc** para visualização dos dados (Aphalo 2017; Wickham 2016).

3 Resultados e Discussão

O primeiro resultado refere-se as concentrações de clorofila-a. A Tabela 1 traz a concentração de clorofila-a das amostras coletadas nos pontos amostrais. A partir destes valores foi possível interpretar as curvas espectrais e a partir dessas buscar feições que caracterizam a presença do pigmento.

Tabela 1 Concentrações de clorofila-a obtidas nos corpos hídricos da Bacia do rio Juliana, APA Pratigi, BA, Brasil.

Ponto amostral	Concentração de clorofila-a (µg L ⁻¹)
1	28,74
2	26,13
3	12,02
4	16,21

A Figura 4 exibe as curvas espectrais dos pontos analisados. Nestas curvas foram encontradas três feições características da presença da clorofila, a saber: pico de reflectância na região do espectro verde (580 nm) indicado pela seta A, uma queda brusca da reflectância no infravermelho próximo (entre 700 e 730 nm) indicada pela seta C e picos de absorbância na região do vermelho (672 nm) indicada pela seta B.

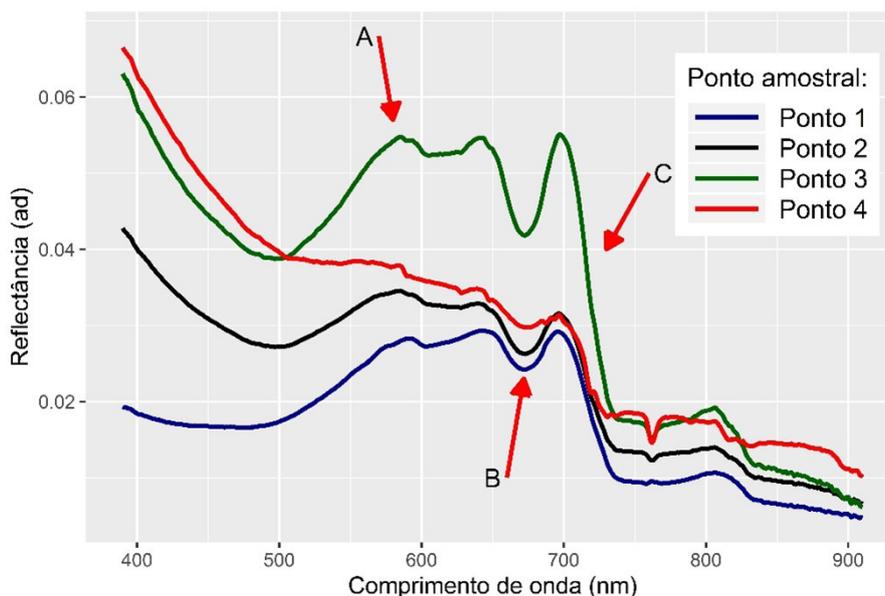


Figura 4 Curvas de reflectância dos pontos amostrais, evidenciando as feições características da presença da clorofila-a, nos corpos hídricos da Bacia do rio Juliana, APA Pratigi, BA, Brasil.

Gitelson (1992) associou a ocorrência do pico de reflectância em 550 nm (espectro verde), à presença da clorofila-a. Na Figura 4 observa-se esta feição (indicado pela seta A), mas deslocada para 580 nm. Gitelson (1992) argumenta que a magnitude e a posição desses picos podem ser usadas como indicadores precisos do conteúdo de fitoplâncton, e por conseguinte, da concentração de clorofila-a. Ainda assim, a presença desse pico, para Guimarães et al. (2017), está associado à baixa absorção pelo pigmento, bem como ao alto espalhamento pela matéria particulada (Murugan et al. 2016), de modo que, associando a feição às concentrações da Tabela 1, observa-se que o ponto 3 apresenta menor concentração de clorofila-a e maior reflectância nesse pico. Portanto, o deslocamento do pico para 580 nm, bem como sua magnitude nos espectros, está associado à baixa concentração do pigmento nos pontos amostrais.

Já nos espectros da Figura 4 ocorre um decréscimo da reflectância (indicada pela seta C) entre o vermelho e o infravermelho próximo. Essa diferença de reflectância é provocada pela presença do pico de reflectância em 700 nm e pode ser associada à presença da clorofila-a (Gitelson 1992; Watanabe et al. 2015), mas é devido principalmente à presença de sólidos totais em suspensão, como elucidado por Chen, Curran & Hanson (1992).

A seta C da Figura 4 indica os picos de absorbância das curvas na região do espectro vermelho. Gitelson (1992) e Rundquist et al. (1996) observaram este pico, ou seja,

um valor de mínima reflectância no domínio do espectro vermelho, no comprimento de onda de 665 nm, sendo esta a região de absorção luminosa da clorofila-a. Cruzando o comportamento espectral dos pontos e a concentração do pigmento, nota-se que, com o aumento da concentração a reflectância diminui (aumentando a absorção de luz). Este mesmo fato foi observado por Alcântara et al. (2016), que atribuíram este pico à presença da clorofila-a mais ficocianina.

A reflectância no pico de absorção do vermelho tende a diminuir quando a concentração de clorofila-a aumenta. Partindo dessa premissa, a identificação do pico de absorbância foi realizada com o resultado da remoção do contínuo, ou seja, as curvas de reflectância normalizada (Figura 5). Com auxílio destas curvas identificou-se o pico em 672 nm, deslocado do valor de Gitelson (1992) e Rundquist et al. (1996) bem como de Guimarães et al. (2017) e Coelho et al. (2017).

O objetivo da remoção do contínuo, proposta por Clark & Roush (1984), é de acentuar feições de absorção em espectros de reflectância, gerando valores de profundidade de absorção (Van Der Meer 2000). De posse das curvas de profundidade da absorção é possível identificar qual componente absorve mais energia, ou seja, apresenta o maior valor de reflectância normalizada. Pode-se notar na Figura 5 que a reflectância normalizada da feição de absorção (672 nm) é diretamente proporcional à concentração de clorofila-a, maior, portanto, para o ponto 1.

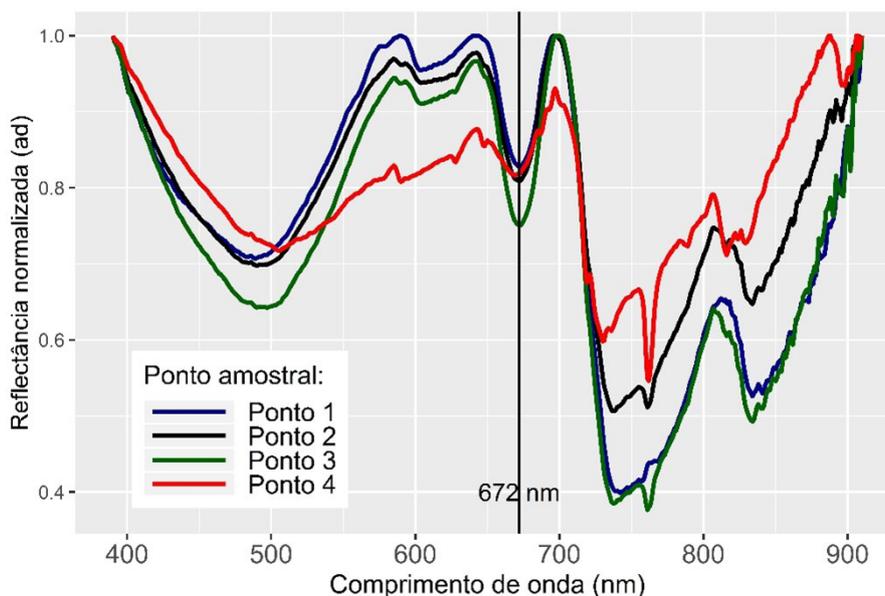


Figura 5 Curvas de reflectância normalizada dos espectros de reflectância dos corpos hídricos, da Bacia do rio Juliana, APA Pratigi, BA, Brasil.

O decréscimo da reflectância entre o vermelho e infravermelho próximo (indicado pela seta B da Figura 4) pôde ser melhor explorado pela aplicação da primeira derivada, como pode ser observado na Figura 6. Essa variação é provocada por um pico de reflectância (observado em 700 nm), ocasionado por efeito de fluorescência da clorofila-a (Gitelson 1992). Rundquist et al. (1996) encontraram inflexão negativa da primeira derivada em 725 nm, associando-a ao pico de reflectância no infravermelho próximo (700 nm).

Como a derivada é matematicamente uma taxa de variação da variável analisada, a taxa tende a zero quanto menor for a diferença entre intervalos. Fato este observado na Figura 6 na inflexão negativa em 713 nm (indicada pela seta A), onde, com o aumento da concentração de clorofila-a, a primeira derivada aproxima-se de zero. Os dados obtidos com a segunda derivada mostraram-se confusos de serem discutidos, provavelmente pelo efeito de demais COA's presentes na água.

Baseando-se nas feições de absorção e variação identificadas com a remoção do contínuo e com a primeira derivada, respectivamente, os dados foram confrontados estatisticamente com a concentração de clorofila-a. Na Figura 7 A pode ser observado o comportamento da reflectância em 672 nm em relação à clorofila-a. Observa-se que o comportamento da reflectância no pico de absorção tende a diminuir com o aumento da clorofila-a, corroborando com Gitelson et al. (2009) e Gilerson et al. (2010). Gilerson et al. (2010) atribuíram esse comportamento espectral à presença de fitoplânctons.

Pode-se observar também o comportamento da taxa de variação em 713 nm na Figura 7 B. Nota-se que com o aumento da concentração de clorofila-a a primeira derivada também aumenta (tendendo a zero), revelando correlação com o pigmento. Han (2005) fez observações semelhantes concluindo que a primeira derivada em regiões entre 700 e 735 nm estão fortemente relacionadas ao conteúdo de clorofila-a, entretanto neste trabalho não é possível caracterizar como forte correlação em decorrência do número de amostras e consequentemente pequeno número de graus de liberdade.

O objetivo da análise de produtos de satélite de observação da Terra com dados da superfície é encontrar variáveis explicatórias de melhor ajuste para estimar uma variável na superfície. Por isso os dados gerados com a cena Sentinel-2 MSI foram confrontados com o conteúdo de clorofila-a na Figura 7 C, D e E. As razões de bandas testadas baseiam-se no comportamento espectral de águas complexas, contendo COA's.

As figuras 7 C e D exibem o comportamento das razões NIR-vermelho e verde-vermelho, respectivamente. Ha et al. (2017) aplicaram ambas as razões baseadas em feições de absorção em 675 nm (vermelho), pico de reflectância em 550 nm (verde) e mínima reflectância no infravermelho próximo (no caso de águas turbidas). Usando dados do MSI, Ha et al. (2017) obtiveram melhores resultados as razões B3/B4 e B5/B4, testadas. Como observado nas Figura 7 C e D, ambas as razões apresentam elevados coeficientes de determinação e uma relação linear crescente, concordando com os autores.

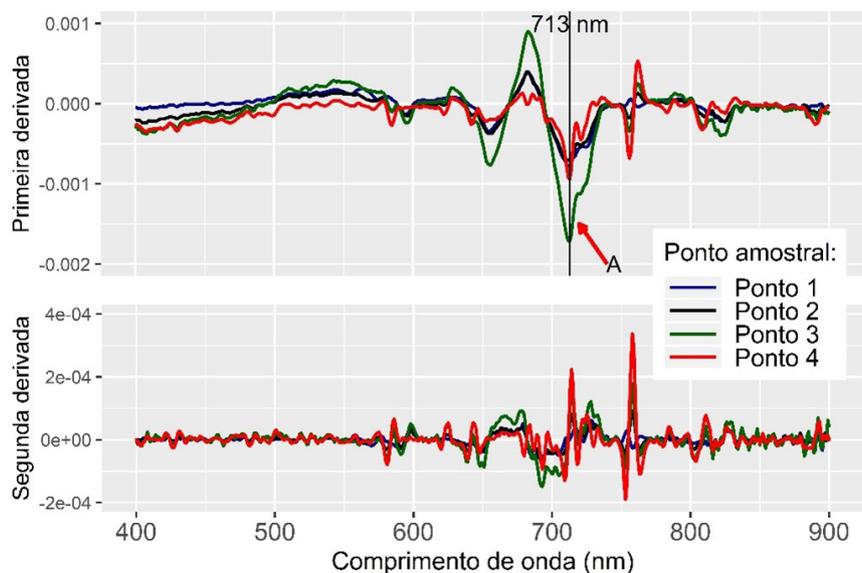


Figura 6 Curvas de derivada espectral de primeira e segunda ordem para os espectros analisados.

A figura 7 E exibe a correlação entre o produto das bandas B4, B5 e B6 com a concentração de clorofila-a. Toming *et al.* (2016) testaram a eficiência do sensor MSI em monitoramento da qualidade de água aplicando a equação 8 que se baseia no comportamento espectral da água contendo a clorofila-a, especialmente pelo pico de reflectância em 700 nm (Gitelson 1992), e com isso, obtiveram altos coeficientes de determinação relacionando o produto das bandas com a concentração de clorofila-a. Entretanto, o mesmo resultado não foi observado neste trabalho, onde entre todos os produtos do MSI, foi o que apresentou menor r^2 .

É importante destacar que o produto das razões de bandas do sensor MSI está intrinsecamente associado ao comportamento espectral da água e seus COAs. Provavelmente as feições de absorção na região do vermelho (672 nm) observadas nos dados hiperespectrais (Figura 4 e Figura 7 A) influenciaram nas razões B5/B4 e B3/B4. Reforçando a ideia de que o MSI dos satélites Sentinel-2 A e B apresentam um bom potencial para monitoramento de águas continentais, especificamente da clorofila-a como variável limnológica indicadora de qualidade.

A capacidade do sensor MSI de monitorar a concentração de clorofila-a no lago em estudo foi possível apenas correlacionando variáveis multiespectrais com a concentração do pigmento. Pelo fato de que foi possível realizar um pequeno número de amostras, ficou inviável qualquer espacialização da estimativa de clorofila-a dada a impossibilidade de validação dos resultados. Entretanto, como variável explicatória da presença da clorofila-a, os dados do MSI apresentaram um bom desempenho. Portanto, escolhendo a relação de bandas que melhor

descreve o conteúdo do pigmento, pode ser usado para fins de monitoramento.

4 Conclusões

A presença da clorofila-a foi identificada nas curvas espectrais embasando a análise com a literatura consultada. Sendo que a principal evidência da presença do pigmento nos espectros de água foi observada no pico de absorção do vermelho, para a reflectância original, e a taxa de variação da reflectância (primeira derivada) no infravermelho próximo, feição associada ao pico de reflectância próximo de 700 nm

Com os dados Sentinel-2 do sensor MSI, as melhores combinações de bandas que descrevem mais acuradamente a presença da clorofila-a foram as razões verde-vermelho, e NIR-vermelho. Esse comportamento pode estar associado ao observado nos dados hiperespectrais, visto que são feições identificadas nos espectros. Portanto as razões B3/B4 e B5/B6 tiveram melhor desempenho em explicar o comportamento da clorofila-a no reservatório.

É importante destacar que o comportamento espectral da água está associado à presença de diferentes COA, bem como à própria estrutura molecular do líquido. Isso significa que em águas complexas, existe efeito de dominância espectral de componentes como sólidos em suspensão, o que justifica o desempenho ruim de outras variáveis multiespectrais, visto como a relação entre as bandas B6, B5 e B4 (equação 8). Portanto, quando o assunto é monitorar qualidade da água, é necessário ter em vista qual COA e qual a melhor combinação de bandas de um sensor se ajusta ao comportamento espectral do corpo hídrico em questão.

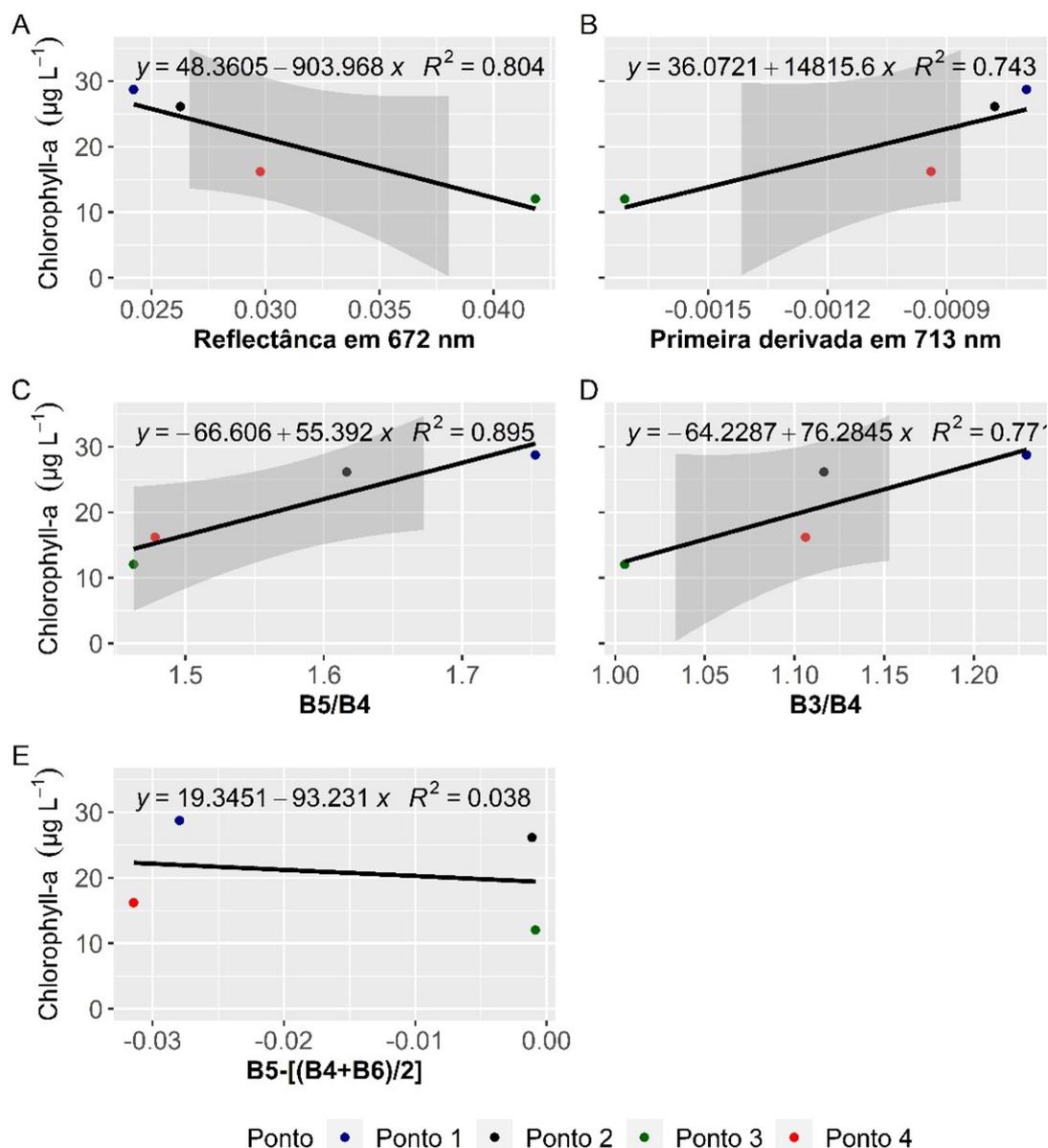


Figura 7 Gráficos de dispersão exibindo coeficiente de determinação e comportamento dos dados entre clorofila-a e: A. reflectância em 672 nm; B. primeira derivada em 713 nm; relações entre as bandas do MSI: C. B5/B4, D. B3/B4 e E. B6, B5 e B4.

5 Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil. Também pela Organização de Conservação da Terra (OCT).

6 Referências

Alcântara, E., Watanabe, F., Rodrigues, T. & Bernardo, N. 2016, 'An investigation into the phytoplankton package effect on the chlorophyll- a specific absorption coefficient in Barra Bonita reservoir, Brazil', *Remote Sens. Lett.*, vol. 7, pp. 761–770. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1185189>

- Ansper, A. & Alikas, K. 2018, 'Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes', *Remote Sens.*, vol. 11, p. 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>
- American Public Health Association 2017, 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater', 23rd edn, American Public Health Association, Washington D.C.
- Aphalo, P.J. 2017, *Learn R... as you learnt your mother tongue*, Leanpub, Helsinki.
- Bresciani, M., Stroppiana, D., Odermatt, D., Morabito, G. & Giardino, C. 2011, 'Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the Water Framework Directive in European perialpine lakes', *Sci. Total Environ.*, vol. 409, pp. 3083–3091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.001>
- Chen, Z., Curran, P.J. & Hansom, J.D. 1992, 'Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration', *Remote Sens. Environ.*, vol. 40, pp. 67–77. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90127-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90127-6)
- Chen, J., Dowman, I., Li, S., Li, Z., Madden, M., Mills, J., Paparoditis, N., Rottensteiner, F., Sester, M., Toth, C., Trinder, J. & Heipke, C. 2016, 'Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda', *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.*, vol. 115, pp. 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008>
- Cicerelli, R. E. & Galo, M. de L. B. T. 2015, 'Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores / Multisource remote sensing applied to the detection of phytoplankton in inland waters', *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 19, no. 3, pp. 259–265. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p259-265>
- Clark, R.N. & Roush, T.L. 1984, 'Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications' *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 89, pp. 6329–6340. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p06329>
- Cloutis, E.A. 1996, 'Review article hyperspectral geological remote sensing: Evaluation of analytical techniques', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, pp. 2215–2242. <https://doi.org/10.1080/01431169608948770>
- Coelho, C., Heim, B., Foerster, S., Brosinsky, A., de Araújo, J.C. 2017. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the Brazilian semi-arid region. *Water (Switzerland)* 9. <https://doi.org/10.3390/w9120913>
- European Space Agency 2016a, *MSI Instrument – Sentinel-2 MSI Technical Guide – Sentinel Online [WWW Document]*, acesso em 28 nov. 2019, <<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>>.
- European Space Agency 2016b, *Sen2Cor Configuration and User Manual*.
- Gholizadeh, M., Melesse, A. & Reddi, L. 2016, 'A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques', *Sensors*, vol. 16, pp. 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>
- Gilerson, A.A., Gitelson, A.A., Zhou, J., Gurlin, D., Moses, W., Ioannou, I., Ahmed, S.A. 2010, 'Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands', *Opt. Express*, vol. 18, 24109. <https://doi.org/10.1364/oe.18.024109>
- Gitelson, A. 1992, 'The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 13, pp. 3367–3373. <https://doi.org/10.1080/01431169208904125>
- Gitelson, A.A., Gurlin, D., Moses, W.J. & Barrow, T. 2009, 'A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters', *Environ. Res. Lett.*, vol. 4, p. 045003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045003>
- Guimarães, T., Veronez, M., Koste, E., Gonzaga, L., Bordin, F., Inocencio, L., Larocca, A., de Oliveira, M., Vitti, D. & Mauad, F. 2017, 'An Alternative Method of Spatial Autocorrelation for Chlorophyll Detection in Water Bodies Using Remote Sensing', *Sustainability*, vol. 9, p. 416. <https://doi.org/10.3390/su9030416>
- Ha, N.T.T., Thao, N.T.P., Koike, K. & Nhuan, M.T. 2017, 'Selecting the Best Band Ratio to Estimate Chlorophyll-a Concentration in a Tropical Freshwater Lake Using Sentinel 2A Images from a Case Study of Lake Ba Be (Northern Vietnam)', *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 6, p. 290. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090290>
- Han, L. 2005, 'Estimating chlorophyll-a concentration using first-derivative spectra in coastal water', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, p. 5235–5244. <https://doi.org/10.1080/01431160500219133>
- Laliberté, J., Larouche, P., Devred, E. & Craig, S. 2018, 'Chlorophyll-a concentration retrieval in the optically complex waters of the St. Lawrence Estuary and Gulf using principal component analysis', *Remote Sens.*, vol. 10. <https://doi.org/10.3390/rs10020265>
- Murugan, P., Sivakumar, R., Pandiyan, R. & Annadurai, M. 2016, 'Comparison of in-Situ Hyperspectral and Landsat ETM+ Data for Chlorophyll-a Mapping in Case-II Water (Krishnarajapuram Lake, Bangalore)', *J. Indian Soc. Remote Sens.*, vol. 44, pp. 949–957. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0531-8>
- Novo, E.M.L. de M., de Farias Barbosa, C.C., Freitas, R.M., Shimabukuro, Y.E., Melack, J.M. & Filho, W.P. 2006, 'Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images', *Limnology*, vol. 7, pp. 153–161. <https://doi.org/10.1007/s10201-006-0179-8>
- R Core Team, R. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing, v 3.6, R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Ritchie, J.C., Zimba, P. V. & Everitt, J.H. 2003, 'Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality', *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 69, pp. 695–704. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>
- RStudio Team 2018, 'RStudio: Integrated Development Environment for R', v 1.1.463, RStudio Team, Boston.
- Rudorff, C.M., Novo, E.M.L.M., Galvão, L.S., Pereira Filho, W. 2007, 'Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia', *Acta Amaz.*, vol. 37, pp. 269–280. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672007000200014>
- Rundquist, D.C., Han, L., Schalles, J.F. & Peake, J.S. 1996, 'Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters:

- The case for the first derivative of reflectance near 690 nm', *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 62, pp. 195–200.
- Schalles, J.F. 2006, 'Optical Remote Sensing Techniques to Estimate Phytoplankton Chlorophyll a Concentrations in Coastal' in L. Richardson & E. LeDrew (eds), *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes*, Springer, Dordrecht, pp. 27–79. https://doi.org/10.1007/1-4020-3968-9_3
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B. & Nõges, T. 2016, 'First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery', *Remote Sens.*, vol. 8, p. 640. <https://doi.org/10.3390/rs8080640>
- Tsai, F. & Philpot, W. 1998, 'Derivative analysis of hyperspectral data', *Remote Sens. Environ.*, vol. 66, pp. 41–51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00032-7)
- Van Der Meer, F. 2000, 'Spectral curve shape matching with a continuum removed CCSM algorithm', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, pp. 3179–3185. <https://doi.org/10.1080/01431160050145063>
- Watanabe, F., Alcântara, E., Rodrigues, T., Imai, N., Barbosa, C. & Rotta, L. 2015, 'Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images', *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, pp. 10391–10417. <https://doi.org/10.3390/ijerph120910391>
- Wickham, H. 2016, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, New York.
- Wickham, H., François, R., Henry, L. & Müller, K. 2021, *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*, v 1.0.6, < <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>>.
- Wickham, H. 2021. *tidyr: Tidy Messy Data*, v 1.1.3, < <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>>.
- Zheng, G. & DiGiacomo, P.M. 2017, 'Remote sensing of chlorophyll-a in coastal waters based on the light absorption coefficient of phytoplankton', *Remote Sens. Environ.*, vol. 201, pp. 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.008>

Recebido em: 02/10/2020

Aprovado em: 18/02/2021

Como citar:

Santos, E.P., Jesus, T.B., Carneiro, A.S.R., Santos, R.L., Franca-Rocha, W.J.S. & Costa, T.S. 2021, 'Espectrorradiometria de Campo e Dados Sentinel-2 Aplicado ao Estudo da Clorofila-A em Corpos Hídricos de Reservatórios', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 38707. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_38707