

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DO SISTEMA AQUÁTICO DE UM RESERVATÓRIO URBANO: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO DE IBIRITÉ/MG MONITORADO POR SENSORES MULTIESPECTRAIS EMBARCADOS EM VANT

Bernardo Tadeu A. e Souza¹; Caio C. de Sousa Mello², Daniel Salim³, Gabriel Pereira⁴ & Camila C. de Amorim⁵

Abstract: This study analyzed the spectral behavior of the Ibirité Reservoir (MG), a water body affected by eutrophication, aiming to assess the sensitivity of multispectral sensors onboard UAVs in detecting photosynthetic pigments. The DJI Phantom 4 Multispectral and MicaSense RedEdge-P Dual sensors were used across six field campaigns conducted between August 2024 and February 2025. Average spectral signatures showed reflectance peaks in the green (531/560 nm) and RedEdge (705/730 nm) bands, and valleys in the blue (444–475 nm) and red (650–668 nm) regions, which are typical of waters rich in chlorophyll-a and phycocyanin. Spearman correlation analyses indicated that the RedEdge-730 nm ($r = 0.76$) and RedEdge-717 nm ($r = 0.59$) bands were most sensitive to phycocyanin, while NIR-840 nm ($r = -0.42$) and Red-650 nm ($r = -0.32$) showed stronger relationships with chlorophyll-a. The results demonstrate that UAV-based multispectral sensors are promising tools for inland water spectral monitoring, and future studies may focus on developing predictive models to estimate water quality parameters based on spectral data.

Resumo: Este trabalho analisou o comportamento espectral da água do Reservatório de Ibirité (MG), ambiente impactado por eutrofização, com o objetivo de avaliar a sensibilidade de sensores multiespectrais embarcados em VANTs na detecção de pigmentos fotossintéticos. Foram utilizados os sensores DJI Phantom 4 Multispectral e MicaSense RedEdge-P Dual, em seis campanhas de campo realizadas entre agosto de 2024 e fevereiro de 2025. As assinaturas espectrais médias evidenciaram picos de refletância nas bandas do verde (531/560 nm) e RedEdge (705/730 nm), e vales nas regiões do azul (444–475 nm) e vermelho (650–668 nm), compatíveis com águas ricas em clorofila-a e ficocianina. As análises de correlação de Spearman indicaram que as bandas RedEdge-730 nm ($r = 0,76$) e RedEdge-717 nm ($r = 0,59$) se destacaram para a ficocianina, enquanto NIR-840 nm ($r = -0,42$) e Red-650 nm ($r = -0,32$) apresentaram maior sensibilidade à clorofila-a. Conclui-se que os VANTs multiespectrais são ferramentas promissoras para o monitoramento espectral de águas interiores, e que futuros trabalhos podem desenvolver modelos de estimativa para parâmetros de qualidade da água com base nesses dados espectrais.

Palavras-Chave – sensoriamento remoto por VANT; fitoplâncton; sensor multiespectral

1) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil. E-mail: bernardoo.tadeu@gmail.com

2) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil. E-mail: caiocsmello@gmail.com

3) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil. E-mail: danielhcsalim@gmail.com

4) Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Departamento de Geociências (DEGEO). Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei - MG, 36307-352, Brasil. E-mail: pereira@ufsj.edu.br

5) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil. E-mail: camila@desa.ufmg.br

INTRODUÇÃO

A eutrofização e os blooms de cianobactérias alteram significativamente o comportamento espectral das águas devido, principalmente, às altas concentrações de clorofila-a (chl-a) e ficocianina (PC) tornando possível o monitoramento desses ambientes via sensoriamento óptico (Fournier *et al.*, 2024; Olivetti *et al.*, 2023 e Kislik *et al.*, 2018).

Burket *et al.* (2023) analisaram 325 espectros in situ de lagos e rios de Minnesota e Wisconsin. Os autores identificaram 7 grupos de águas com propriedades ópticas diferentes: (1) água quase pura; (2) água límpida e oligotrófica; (3) águas ricas em clorofila (chl-a); (4) águas ricas em matéria orgânica colorida (CDOM); (5) águas ricas em CDOM e chl-a; (6) águas ricas em CDOM e material em suspensão (SM), com predominância de CDOM; (7) águas ricas em SM e CDOM, com predominância de SM.

O espectro para água quase pura apresenta um máximo de reflectância perto de 500 nm e um máximo secundário em torno de 525 nm, ambos na região do azul. Um espectro mais típico de uma massa de água oligotrófica e com baixo CDOM tem um máximo de reflectância na região do verde (~ 560 nm) um vale de reflectância muito pequeno na região do vermelho (~ 670 nm). Águas eutrofizadas ricas em chl-a apresentam um maior pico no verde se comparado às águas oligotróficas, além de um vale pronunciado no vermelho e um pico secundário no RedEdge (~ 705 nm). Há ainda um mínimo secundário no laranja (~ 620 nm), característico do vale de absorbância de ficocianina e indica a presença de cianobactérias. Os quatro espectros rotulados como CDOM (4–7) têm baixa reflectância na região azul (<500 nm) devido à alta absorbância de CDOM (Burket *et al.*, 2023).

Beck *et al.* (2017) avaliaram 27 algoritmos em sensores aéreos e satelitais para estimativa da ficocianina e observaram que a absorção próxima à região do laranja (620-650 nm) são fortemente correlacionadas ($R^2 = 0,757$) com a biomassa cianobacteriana medida in situ.

Fournier *et al.* (2024) demonstraram em estudos laboratoriais que a análise hiperespectral de culturas puras de cinco gêneros de cianobactérias tóxicas evidenciou picos críticos em bandas específicas: 550–570 nm (verde), 640–690 nm (vermelho) e 870–900 nm (NIR). A aplicação de derivadas espectrais e suavização permitiu discriminar esses gêneros com precisão próxima a 90 %.

Já em ambiente in situ, Olivetti *et al.* (2023) compararam dados hiperespectrais (Headwall Nano-Hyperspec, 276 bandas) e multiespectrais (Parrot Sequoia, 4 bandas) em tanques de piscicultura, e identificaram que as bandas 660–690 nm (vermelho) e 700–730 nm (RedEdge) são sensíveis às variações de clorofila-a, enquanto as faixas 600–625 nm (laranja-vermelho) e 700–730 nm (RedEdge) respondem à presença de ficocianina. Seus modelos hiperespectrais apresentaram $R^2 = 0,87$ para clorofila-a e $R^2 = 0,83$ para ficocianina, superando os modelos multiespectrais ($R^2 = 0,72$ e $0,47$, respectivamente).

Estudos como o de Hafeez *et al.* (2018) reforçam que águas com elevados teores de clorofila-a exibem baixa reflectância em curtas comprimentos de onda (região azul), devido à absorção durante processos fotossintéticos. Em ambientes costeiros ou turvos, a relação red/NIR torna-se mais eficaz para estimar clorofila-a, especialmente quando há influência de sólidos suspensos. Destaca-se ainda que a altura do pico espectral entre 700 e 710 nm, conhecido como “*line-height*”, é um proxy direto da biomassa fitoplancônica.

Com base nesses fundamentos, este trabalho busca analisar o comportamento espectral da água do Reservatório de Ibirité (MG) por meio de reflectância obtida pelos sensores Phantom 4 Multispectral e MicaSense RedEdge-P Dual. Os objetivos são: (1) comparar o comportamento espectral do Reservatório de Ibirité (MG) aos relatados na literatura; (2) avaliar a correlação entre reflectância em bandas específicas com valores *in situ* de clorofila-a e ficocianina; e (3) comparar os

sensores quanto à consistência da reflectância calibrada, comportamento espectral e eficácia na correlação com pigmentos, identificando convergências e possíveis limitações operacionais entre plataformas. Essa investigação busca avaliar o uso de VANTs multiespectrais como ferramentas eficazes para o monitoramento de pigmentos algais e monitoramento de qualidade de água em ambientes interiores.

METODOLOGIA

Área de estudo

O reservatório de Ibitité está localizado entre os municípios de Ibitité e Sarzedo, no estado de Minas Gerais, integrando a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco. Possui uma área de 2,8 km², volume útil de 21,2 x 10⁶ m³ e profundidade máxima de 18 metros (Mozeto *et al.*, 2014). Esse ambiente apresenta estratificação térmica quase constante ao longo do ano, com ocorrência de circulação da coluna d'água durante o inverno, conforme descrito por Garcia *et al.*, (2009), sendo, portanto, classificado como um lago monomítico quente. A bacia hidrográfica do reservatório abrange diversas microbacias, incluindo os córregos Ibitité, Pintado, Barreirinho, Rola-Moça, Fubá, Urubu, Taboão, Sumidouro, Camargos, Jatobá e Palmares, conforme indicado por Lanza *et al.*, (2011), sendo os córregos Ibitité e Pintado os principais contribuintes.

Atualmente, o reservatório encontra-se em estado de eutrofização, sendo o lançamento de esgoto doméstico apontado como o principal fator responsável por esse processo, segundo Mozeto *et al.* (2014). Pinto e Coelho (2010) relataram concentrações elevadas de nutrientes, com médias de 6,2 mg L⁻¹ de nitrogênio total e 394 µg L⁻¹ de fósforo total. A maior parte desses nutrientes é carregada pelo córrego Ibitité, reconhecido por sua baixa qualidade da água, conforme registrado por Barbosa *et al.* (2011). Esses autores destacaram ainda que o reservatório desempenha um papel essencial como serviço ecossistêmico de regulação, uma vez que a qualidade da água a jusante é superior à verificada a montante do reservatório.

Coleta e processamento de amostras

As etapas metodológicas que compõe o monitoramento da qualidade da água por sensoriamento remoto englobam a aquisição de dados por meio de plataformas remotas (VANTs), a coleta de dados in situ com sonda multiparâmetros, a criação de banco de dados correlacionados e, por fim, a análise dos espectros e a correlação dos dados.

Os pontos de amostragem foram selecionados ao longo do reservatório com base em estudos de uso e ocupação do solo na região, totalizando 19 pontos de coleta, conforme apresentado na Figura 1. Os dados foram coletados em seis campanhas, quais sejam: Campanha 1 (23/08/2024), Campanha 2 (17/09/2024), Campanha 3 (02/10/2024) e Campanha 4 (06/11/2024), Campanha 5 (14/02/2025) e Campanha 6 (24/02/2025).

Os dados in situ foram adquiridos utilizando uma sonda multiparâmetros ProDSS YSI, com aferição dos seguintes parâmetros: clorofila-a, ficocianina, oxigênio dissolvido (OD), pH, temperatura da água, turbidez e condutividade elétrica. As medições in situ foram realizadas na subsuperfície, em aproximadamente 0,5 m, de modo a permitir a correlação com os dados espectrais dos sensores.

Figura 1 – Pontos de amostragem no Reservatório de Ibitité, MG



Obtenção dos dados de sensoriamento remoto

A aquisição dos dados de sensoriamento remoto foi realizada por meio de dois veículos aéreos não tripulados (VANTs): o Phantom 4 Multispectral (P4M) e o Matrice 350 RTK (M350). Ambos são multirrotores, mas com características distintas quanto à carga útil e aplicações.

O DJI Phantom 4 Multispectral é equipado com um sensor multispectral integrado, composto por cinco bandas espectrais (azul, verde, vermelho, red edge e infravermelho próximo – NIR), além de uma câmera RGB. Sua resolução espacial é de 2 megapixels por banda, o que permite a obtenção de imagens de alta definição com praticidade e agilidade, sendo ideal para o monitoramento de áreas ambientais de maneira rápida e eficiente (DJI, 2025).

Já o DJI Matrice 350 RTK foi empregado como plataforma de voo para o embarque do sensor MicaSense RedEdge-P Dual, cuja principal vantagem está na alta resolução espectral, totalizando 10 bandas multispectrais (AGEAGLE, 2024). O Quadro 1 apresenta as especificações comparativas dos sensores utilizados no estudo:

Quadro 1 – Características dos sensores espectrais utilizados

Características	MicaSense RedEdge-P Dual	DJI Phantom 4 Multispectral
Tipo de sensor	Multispectral (10 bandas)	Multispectral (5 bandas + RGB)
Plataforma	Embarcado no DJI Matrice 300 RTK	Integrado ao DJI Phantom 4 Multispectral
Resolução espacial (por banda)	1,6 MP	2 MP
Faixa espectral	Azul 1(444nm), Azul 2 (475nm), Verde 1 (531 nm), Verde 2 (560 nm), Vermelho (650 nm), Red Edge 1 (705 nm), Red Edge 2 (717 nm), Red Edge 3 (717 nm) e NIR (842 nm)	Azul (450 nm), Verde (560 nm), Vermelho (650 nm), Red Edge (730 nm), NIR (840 nm) eRGB
Largura de banda (nm)	Azul: 28/32; Verde: 14/27; Vermelho: 16/14; Red Edge: 10/12; NIR: 18/57	Azul: 16; Verde: 16; Vermelho: 16; Red Edge: 16; NIR: 26
Aplicações principais	Modelagem espectral, diferenciação de pigmentos, integração com Sentinel-2	Monitoramento ambiental de alta resolução espacial

Fonte: Adaptado de AGEAGLE, 2024 e DJI, 2025.

Os achados apresentados na literatura reforçam a importância das bandas do espectro verde (~550 nm) para clorofila-a, 600–625 nm para pigmentos de cianobactérias, e RedEdge (660–730 nm) para ambos os pigmentos, especialmente em águas interiores com interferências de CDOM e sólidos suspensos. Sensores multiespectrais embarcados em VANTs, como os utilizados neste trabalho, possuem bandas estreitas nessas faixas, sendo adequados para captar os picos espectrais relevantes.

Processamento de imagens

O processamento das imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) foi realizado com o objetivo de extrair informações de reflectância espectral nas proximidades dos pontos de amostragem definidos no Reservatório de Ibirité, MG.

Inicialmente, as correções radiométricas das imagens foram realizadas no software Agisoft Metashape, utilizando os dados obtidos em campo a partir dos painéis de calibração, conforme os protocolos estabelecidos pelos fabricantes dos sensores acoplados ao VANT. Foram selecionadas as imagens que estavam localizadas mais próximas dos pontos amostrados in situ através da sonda multiparâmetros.

Em seguida, essas imagens foram importadas para ambiente de programação em Python, no qual foram conduzidas as manipulações espectrais necessárias. Foi calculado o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para cada imagem, com o objetivo de excluir as áreas ocupadas por macrófitas aquáticas. O limiar de 0,3 para o NDVI tem sido amplamente utilizado na literatura científica para distinguir entre vegetação aquática flutuante e áreas de lâmina d'água (Liang *et al.*, 2022). Esse valor é eficaz na separação desses dois tipos de cobertura, e, através de experimentos empíricos, verificou-se que auxilia na mitigação de interferências causadas pelo reflexo especular da luz solar na superfície da água (*sun glint*), contribuindo para a obtenção de dados espectrais mais consistentes.

Todos os pixels das regiões resultantes da exclusão das macrófitas e das interferências ópticas foram utilizados para o cálculo da reflectância para cada banda espectral, sendo considerado os valores medianos. Os dados resultantes processados foram organizados em uma tabela estruturada contendo a reflectância por ponto de amostragem, banda espectral e data, além de informações complementares como coordenadas geográficas e identificação do sensor utilizado.

As assinaturas espectrais foram representadas em gráficos de linha com intervalos de variação interquartílica (IQR) e percentis 10–90%, a fim de expressar a variabilidade espectral associada às diferentes condições ambientais observadas ao longo do tempo.

Para investigar as relações entre os valores de reflectância e os parâmetros de qualidade da água medidos in situ (clorofila-a e ficocianina), foi aplicada a correlação de Spearman, método não paramétrico apropriado para avaliar associações monotônicas em dados ambientais. Foram construídos gráficos de barras que permitem identificar quais bandas espectrais de cada sensor possuem maior sensibilidade à variabilidade dos pigmentos analisados.

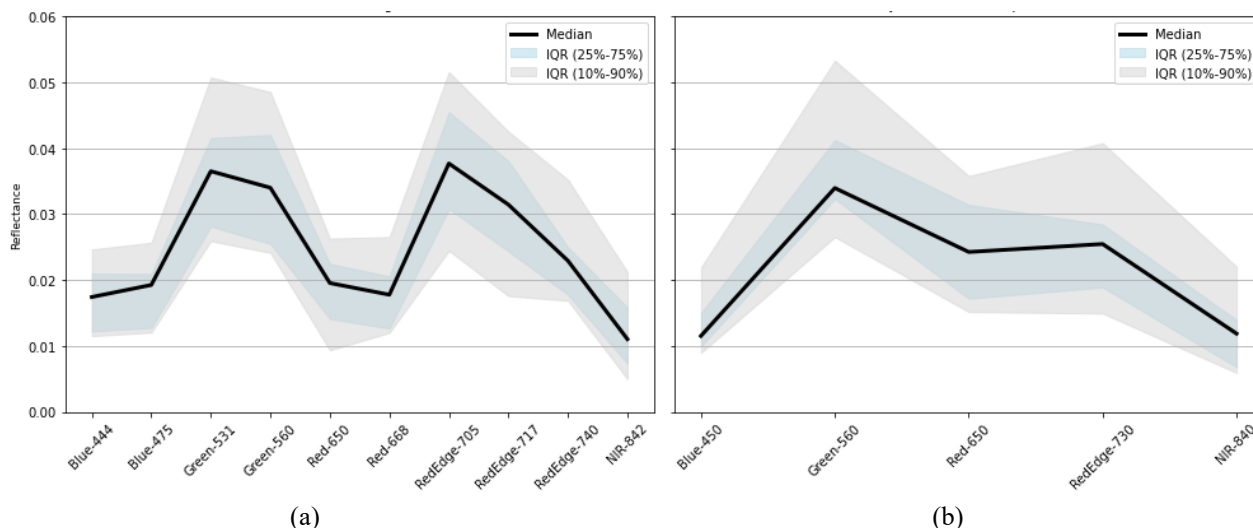
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise geral das respostas espectrais dos sensores embarcados

A análise das assinaturas espectrais médias obtidas pelos sensores MicaSense RedEdge Dual-P e DJI Phantom 4 Multispectral no Reservatório de Ibirité/MG (Figura 2) revelou padrões característicos de ambientes lênticos eutrofizados. Os espectros médios indicaram picos de reflectância nas bandas do verde (531/560 nm) e do RedEdge (705/730 nm), enquanto vales foram observados nas bandas do azul (444–475 nm) e do vermelho (650–668 nm). Esse comportamento é consistente com a presença de elevados níveis de clorofila-a e outros pigmentos fotossintéticos, que possuem alta

absorção nos comprimentos de onda do azul e do vermelho, enquanto refletem luz no verde e no RedEdge. A queda acentuada no vermelho, principalmente para o sensor MicaSense, está alinhada ao pico de absorção de clorofila-a em torno de 665 nm.

Figura 2 – Variação das assinaturas espectrais dos sensores MicaSense (a) e DJI Phantom 4 Multispectral (b) embarcados nas seis campanhas



A variabilidade das assinaturas espectrais, expressa pelos intervalos interquartis e percentis 10–90%, revelou flutuações relevantes, especialmente nas bandas Green-531 (MicaSense), Green-560 (DJI), RedEdge-705 (MicaSense) e RedEdge-730 (DJI). Essas variações estão associadas à dinâmica sazonal e espacial do fitoplâncton e à presença de material em suspensão. O canal NIR (842/840 nm) também mostrou alta variabilidade, possivelmente devido a sombras, ruídos e diferenças de turbidez.

Na comparação entre sensores, as bandas do verde (560 nm) e do vermelho (650 nm) apresentaram comportamentos semelhantes, com boa correspondência espectral. Já nas faixas do RedEdge (705/730 nm), o MicaSense indicou picos mais marcantes, enquanto o DJI apresentou resposta mais suavizada — diferença atribuída à largura de banda e à sensibilidade radiométrica dos sensores. No azul (444–475 nm), a refletância foi inferior no DJI, provavelmente por influência de sombras e limitações de calibração.

A ausência de sensores solares (DLS), a turbidez do reservatório e interferências como sombras e ruído eletrônico contribuíram para a dispersão dos dados. Para melhorar a consistência espectral, recomenda-se o uso de sensores solares para correção de irradiância, remoção de sombras e reflexos especulares, padronização dos horários de voo e calibração radiométrica adequada.

Análise temporal das respostas espectrais dos sensores embarcados

Na primeira campanha (23/08/2024), ambos os sensores apresentaram comportamentos semelhantes, com picos de refletância no verde e RedEdge, e vales no azul, vermelho e NIR. Não foram observadas diferenças espectrais evidentes entre os pontos amostrados, exceto no Ponto 3 do Phantom 4, que não apresentou o pico característico no RedEdge. Na MicaSense, o Ponto 3 apresentou refletância mais baixa em todo o espectro, o que pode indicar maior concentração de CDOM na região, conforme sugerido por Burket *et al.* (2023).

Na campanha de 17/09/2024, os dados do Phantom 4 mostraram maior variabilidade espacial em comparação à MicaSense. Os Pontos 1, 2 e 3 apresentaram maior refletância no azul e menores valores nas demais bandas, diferindo do padrão típico de águas clorofiladas. A ausência de vale no

vermelho pode indicar baixa concentração de clorofila, com assinatura espectral mais próxima à da água pura. Em contraste, os dados da MicaSense mostraram maior uniformidade entre os pontos, com assinatura espectral semelhante à da campanha anterior, com picos no verde e RedEdge e vales bem definidos, indicativo da presença de clorofila. A discrepância entre sensores pode ser explicada por diferenças nas condições climáticas entre os voos.

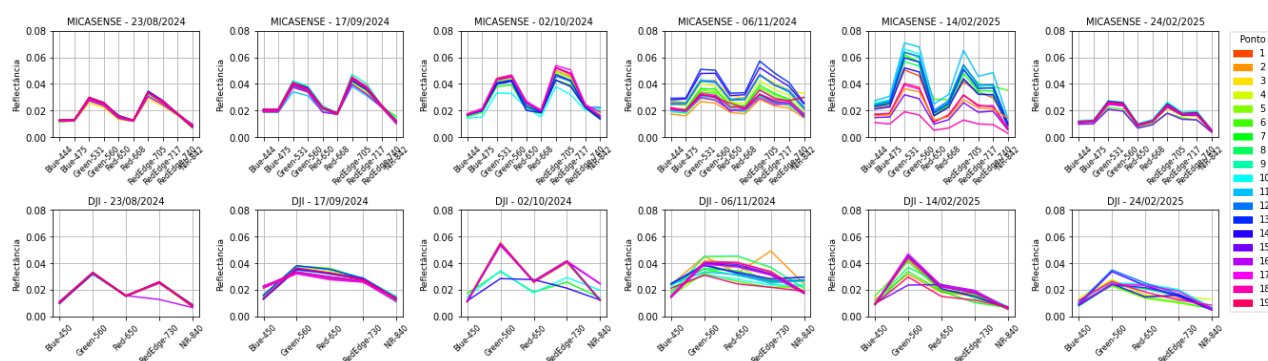
A terceira campanha (02/10/2024) apresentou maiores valores de refletância ($>0,05$) ao longo de todo o espectro. Os dados do Phantom 4 voltaram a exibir padrão típico de água com clorofila, com pico no verde e secundário no RedEdge, exceto no Ponto 14, onde o vermelho superou o RedEdge. Na MicaSense, observou-se inversão dos picos, com maior resposta no RedEdge, o que pode indicar aumento de material em suspensão. Além disso, houve inversão nos valores de refletância entre os comprimentos de onda do verde (~ 531 nm e ~ 560 nm), exceto nos Pontos 8 e 10.

Na quarta campanha (06/11/2024), observou-se maior dispersão espectral entre os pontos em ambos os sensores, refletindo heterogeneidade espacial no reservatório. No Phantom 4, o padrão típico foi perdido: os valores no verde e vermelho se igualaram e não houve pico no RedEdge, com tendência de queda após o vermelho, o comportamento mais atípico registrado. Por outro lado, a MicaSense manteve o padrão esperado, ainda que menos acentuado, com maior refletância no RedEdge, sugerindo influência de partículas não-algais na água.

Na quinta campanha (14/02/2025), os maiores valores de refletância foram registrados, especialmente na banda do verde, tanto na MicaSense ($>0,06$) quanto no Phantom 4 ($>0,04$). Este comportamento pode indicar aumento da concentração de clorofila-a e possível ocorrência de floração algal no período.

Na última campanha (24/02/2025), houve redução generalizada da refletância ($\sim 0,02$) em todo o espectro. A MicaSense manteve o padrão espectral típico, mas no Phantom 4 o pico esperado no RedEdge não foi observado. De maneira geral, a assinatura espectral da MicaSense apresentou menor variabilidade entre as datas, o que sugere maior robustez do sensor e maior resiliência a variações operacionais. A Figura 3 apresenta o comportamento espectral por sensor e por campanha.

Figura 3 – Assinaturas espectrais dos sensores MicaSense (a) e DJI Phantom 4 Multispectral (b) embarcados por campanha

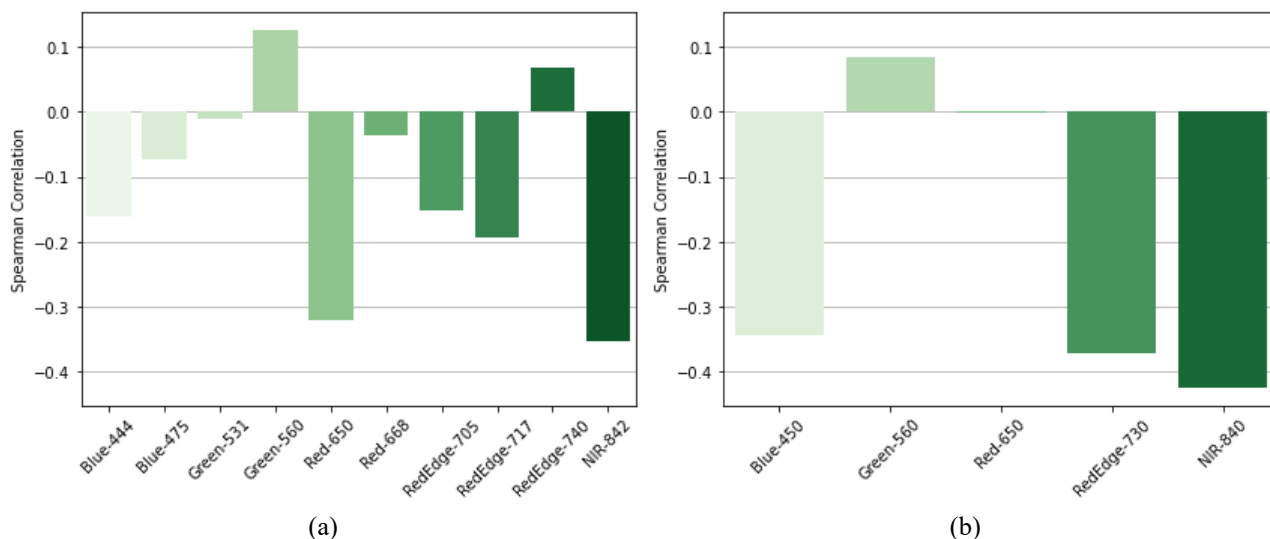


Análise de correlação dos parâmetros de qualidade de água e respostas espectrais

As correlações de Spearman entre as bandas espectrais dos sensores MicaSense e DJI Phantom 4 Multispectral e os parâmetros de qualidade da água do Reservatório de Ibirité permitem avaliar a sensibilidade espectral frente à variabilidade dos constituintes opticamente ativos. O comportamento das correlações para clorofila e ficocianina é discutido a seguir, destacando padrões esperados e

eventuais desvios (Figura 4 e Figura 5) considerando as características do ambiente lântico e eutrofizado do reservatório.

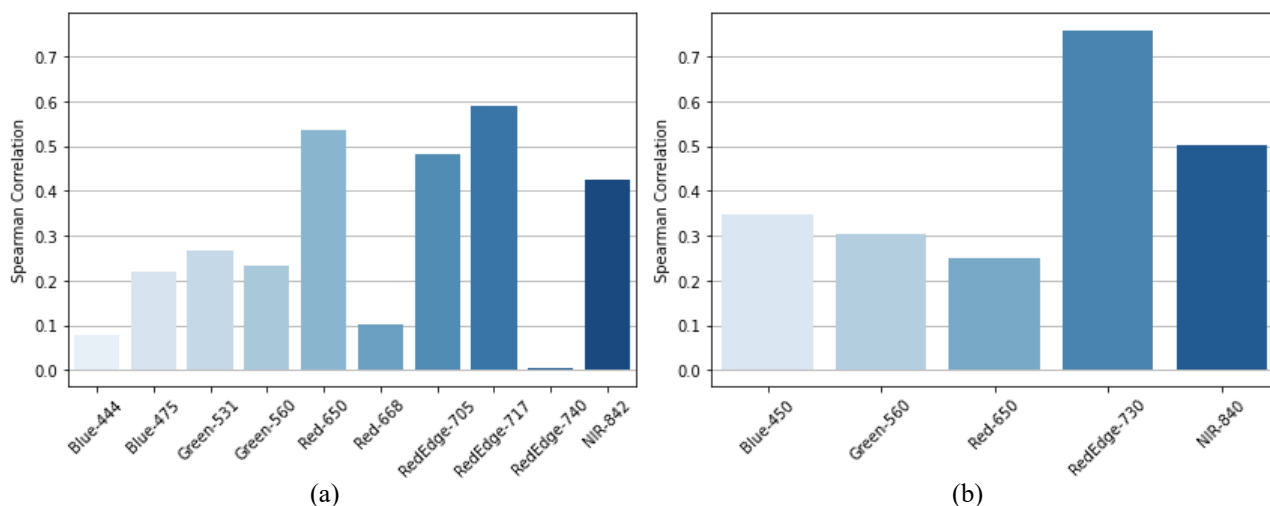
Figura 4 – Correlação de Spearman para clorofila entre as bandas espectrais dos sensores MicaSense (a) e DJI Phantom 4 Multispectral (b)



As correlações negativas em bandas do azul (Blue-444, Blue-475 para MicaSense; Blue-450 para DJI) estão de acordo com o comportamento óptico conhecido da clorofila-a, que absorve fortemente luz nessa região. Para o MicaSense, a correlação foi mais fraca (-0.16 e -0.07), enquanto o DJI apresentou uma correlação mais clara (-0.34), o que pode indicar que o sensor DJI captou com mais sensibilidade o efeito da absorção no azul, possivelmente por maior estabilidade radiométrica em sua banda específica. No vermelho (Red-650 e Red-668), também há correlação negativa moderada no MicaSense, especialmente em Red-650 (-0.32), o que confirma a forte absorção de clorofila nesta região. Já o DJI apresentou correlação próxima de zero nessa faixa, comportamento não esperado e que pode estar relacionado a ruído, saturação ou limitações radiométricas nessa banda específica. Nas bandas RedEdge e NIR, ambas associadas à transição de absorção para reflectância de clorofila, observou-se correlação negativa em ambos os sensores, com destaque para NIR-842 no MicaSense (-0.35) e NIR-840 no DJI (-0.42), o que corrobora o efeito de maior densidade de biomassa reduzindo a refletância, como esperado em ambientes eutrofizados.

A ficocianina apresentou correlações positivas em todas as bandas para ambos os sensores, com destaque para o RedEdge-717 (0.59) e o RedEdge-730 (0.76), evidenciando a forte sensibilidade da região RedEdge à presença de cianobactérias (Figura 5). Esse comportamento está de acordo com a literatura, que aponta a absorção da ficocianina em torno de 620 nm e seus efeitos indiretos sobre o espalhamento em bandas do RedEdge e NIR. O DJI mostrou correlações mais altas de forma geral, com destaque também para a banda NIR-840 (0.50). A maior sensibilidade do DJI pode estar relacionada à maior largura de banda ou à maior estabilidade radiométrica nas faixas RedEdge-NIR.

Figura 5 – Correlação de Spearman para ficocianina entre as bandas espectrais dos sensores MicaSense (a) e DJI Phantom 4 Multispectral (b)



CONCLUSÕES

A análise espectral da água do Reservatório de Ibirité, utilizando sensores multiespectrais embarcados em VANTs, permitiu identificar padrões ópticos típicos de ambientes eutrofizados, com destaque para picos de reflectância nas bandas do verde (531/560 nm) e RedEdge (705/730 nm), e vales nas regiões do azul (444–475 nm) e vermelho (650–668 nm). Esses padrões estiveram associados à presença de pigmentos fotossintéticos, principalmente clorofila-a e ficocianina. As assinaturas espectrais médias mostraram coerência com os grupos ópticos descritos na literatura, e as análises temporais evidenciaram variações significativas entre campanhas, influenciadas por fatores como concentração de algas, material em suspensão, CDOM e condições atmosféricas.

A correlação de Spearman indicou maior sensibilidade da ficocianina às bandas RedEdge-730 nm ($r = 0,76$) e RedEdge-717 nm ($r = 0,59$) do sensor MicaSense, além da banda NIR-840 nm do DJI ($r = 0,50$). Para a clorofila-a, destacaram-se correlações negativas na banda NIR-840 nm do DJI ($r = -0,42$) e Red-650 nm do MicaSense ($r = -0,32$), consistentes com o comportamento óptico conhecido do pigmento.

Este trabalho teve caráter exploratório, com foco na caracterização do comportamento espectral da água e avaliação preliminar da resposta dos sensores multiespectrais. Os resultados demonstram o potencial do uso de VANTs para o monitoramento da qualidade da água em ambientes interiores. Como continuidade, recomenda-se o desenvolvimento de modelos preditivos para estimar parâmetros como clorofila-a, ficocianina, turbidez e CDOM, por meio de abordagens estatísticas ou de aprendizado de máquina. Sugere-se ainda a ampliação da base de dados, a inclusão de sensores hiperespectrais e a integração com dados orbitais, de modo a aumentar a robustez e a escalabilidade das análises.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petrobras pelo financiamento do projeto *AQUASmart – Estratégias Inovadoras para Manejo e Recuperação de Ecossistemas Aquáticos para Abastecimento da Indústria de Óleo e Gás: Diagnóstico, Monitoramento, Mitigação e Prevenção de Pressões Antrópicas e Riscos Hidrológicos*, no âmbito do qual esta pesquisa foi realizada. Agradecem também à equipe técnica e aos colegas envolvidos nas coletas e no processamento dos dados, bem como à UFMG pela disponibilização de equipamentos e suporte logístico para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEAGLE. RedEdge-P Dual Camera. Disponível em: <https://ageagle.com/drone-sensors/rededge-p-dual-camera/>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- BARBOSA, F.A.R., MARQUES, M.M., MAIA-BARBOSA, P., SANTOS, A.M.M., COSTA, M.A.R., 2011. Ecosystem regulation services in aquatic environments: the case of Ibirité reservoir, Minas Gerais. *Oecol. Aust.* 15 (3), 714–725.
- BECK, Richard et al. Comparison of satellite reflectance algorithms for estimating chlorophyll-a in a temperate reservoir using coincident hyperspectral aircraft imagery and dense coincident surface observations. *Remote Sensing of Environment*, v. 178, p. 15-30, 2016.
- BURKET, Martha Otte; OLMANSON, Leif G.; BREZONIK, Patrick L. Comparison of two water color algorithms: Implications for the remote sensing of water bodies with moderate to high CDOM or chlorophyll levels. *Sensors*, v. 23, n. 3, p. 1071, 2023.
- DJI. P4 Multispectral. Disponível em: <https://ag.dji.com/pt-br/p4-multispectral>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- FOURNIER, Claudia et al. Discriminating bloom-forming cyanobacteria using lab-based hyperspectral imagery and machine learning: Validation with toxic species under environmental ranges. *Science of the Total Environment*, v. 932, p. 172741, 2024.
- GARCIA, F.C., BARBOSA, F.A.R. BRAZ, S. PETRUCIO, M.M.; FARIA, B. Water quality of an urban reservoir subjected to periodic applications of copper sulphate: the case of Ibirité reservoir, southeast Brazil. *Chemical Limnology, Acta Limnol. Bras.*, 2009, vol. 21, no. 2, p. 235-243.
- HAFEEZ, Sidrah et al. Detection and monitoring of marine pollution using remote sensing technologies. *Monitoring of Marine Pollution*, p. 7-32, 2018.
- KISLIK, Chippie; DRONOVA, Iryna; KELLY, Maggi. UAVs in support of algal bloom research: A review of current applications and future opportunities. *Drones*, v. 2, n. 4, p. 35, 2018.
- LANZA, Daniel Santana; OLIVEIRA, Daniel Lorentz; VAL, M. C. Mapeamento temporal do uso e cobertura do solo das microbacias contribuintes com a represa de Ibirité-MG utilizando imagens de alta resolução. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto—SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, v. 30, p. 6270-6277, 2011.
- LIANG, Shuang et al. Accurate monitoring of submerged aquatic vegetation in a macrophytic lake using time-series Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, p. 640, 2022.
- MOZETO, A. A., YAMADA, T. M., DE MORAIS, C. R, 2014. Assessment of organic and inorganic contaminants in sediments of an urban tropical eutrophic reservoir. *Environ Monit Assess*, 186, 815–834.
- OLIVETTI, Diogo et al. Comparing unmanned aerial multispectral and hyperspectral imagery for harmful algal bloom monitoring in artificial ponds used for fish farming. *Drones*, v. 7, n. 7, p. 410, 2023.
- PINTO-COELHO, R.M., BRIGHENTI, L.S., BEZERRA-NETO, J.F., MORAIS JR., C.A., GONZAGA, A.V., 2010. Effects of sampling effort on the estimation of spatial gradients in a tropical reservoir impacted by an oil refinery. *Limnologica* 40, 126–133.