



Aplicação de Modelos Empíricos no Manejo da Água em Bacias Hidrográficas Tropicais

Application of Empirical Models in Water Management in Tropical Watersheds, case study: Rebel Army Reservoir, Almendares Vento watershed, Cuba

Iribarren Mondejar J.^{1,3,*} e Santos Leal R.^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Meio Ambiente, Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, s/n - Feira de Santana, 44036-900, Novo Horizonte - BA, Brasil.

² Technology Department-DTEC, State University of Feira de Santana-UEFS, Bahia, Brazil. E-mail: rosaleal@uefs.br

³ Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba-UNAICC, Calle Humboldt, 104, Esq. Infanta, Vedado, Plaza da Revolución, 10400, Havana, Cuba. *E-mail: jim261269@gmail.com

Resumo: O artigo aborda o desafio da gestão sustentável de recursos hídricos em regiões tropicais, com ênfase na bacia Almendares-Vento, Cuba. São discutidos os desafios relacionados com a eutrofização, a contaminação por nutrientes e eventos extremos de clima. Propõe-se um modelo empírico preditivo baseado na análise multiespectral de imagens Landsat 8/9 para estimar a clorofila-a, turbidez e qualidade da água no reservatório Exército Rebelde. O estudo integra parâmetros físico-químicos e espectrais, e utiliza sistemas de informação geográfica (SIG) para a análise espacial e geração de mapas temáticos. O objetivo é avaliar espacialmente a qualidade da água e contribuir para políticas de manejo sustentável, com implicações para a saúde pública e a resiliência ambiental.

Palavras-Chaves: SIG, clorofila-a, disco de Secchi, imagens Landsat

Abstract: The article addresses the challenge of sustainable water resource management in tropical regions, with an emphasis on the Almendares-Vento basin in Cuba. Challenges related to eutrophication, nutrient contamination, and extreme weather events are discussed. An empirical predictive model based on multispectral analysis of Landsat 8/9 images is proposed to estimate chlorophyll-a, turbidity, and water quality in the Rebel Army reservoir. The study integrates physical-chemical and spectral parameters and uses geographic information systems (GIS) for spatial analysis and thematic map generation. The objective is to spatially assess water quality and contribute to sustainable management policies, with implications for public health and environmental resilience.

Keywords: GIS, chlorophyll-a, Secchi disk, Landsat images

1. Introdução

A gestão sustentável dos recursos hídricos em regiões tropicais é um desafio global, dada a importância dos reservatórios como fontes essenciais de água para consumo humano, agricultura e indústria (Carlson, 1977). Em contextos com marcada variabilidade climática, pressão demográfica e expansão agrícola e industrial, aumentam os riscos de sobre exploração e contaminação das águas superficiais. Em Cuba, a bacia Almendares-Vento, estratégica para o abastecimento e a preservação ambiental, enfrenta processos de eutrofização, aportes de nutrientes antrópicos e eventos extremos associados às mudanças climáticas, que deterioraram a qualidade da água em reservatórios como o Exército Rebelde.

Em particular, os reservatórios tropicais enfrentam desafios significativos relacionados com a vulnerabilidade à contaminação por pesticidas, fertilizantes e outros contaminantes emergentes, assim como aos processos hidrológicos intensos próprios destes climas (Watanabe et al., 2015). Apesar da aparente abundância de recursos hídricos, a qualidade e disponibilidade da água estão ameaçadas por fatores ambientais e antrópicos, o que compromete a segurança hídrica e a saúde pública (Wang et al., 2018).

O crescimento populacional e as práticas agrícolas intensivas incrementaram a pressão sobre as reservas de água, gerando um aumento na demanda e nos níveis de contaminação.

Citação: Iribarren Mondejar J. e Santos Leal R. Aplicação de Modelos Empíricos no Manejo da Água em Bacias Hidrográficas Tropicais. Cad. Fís. UEFS, 23(01):1502.01-16, 2025.

Recebido: 10/05/2025

Aceito: 12/06/2025

Publicado: 14/06/2025



Copyright: © 2025 Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Por exemplo, estima-se que mais de 60% dos reservatórios em regiões tropicais apresentam algum grau de eutrofização, com concentrações de clorofila-a superiores aos limiares recomendados para o uso seguro da água (Gitelson & Kondratyev, 2001). Esta situação se agrava pela variabilidade climática e os eventos extremos associados às mudanças climáticas, que alteram os padrões de precipitação e recarga, exacerbando a vulnerabilidade hidrogeológica dos reservatórios (Normalized Difference Water Index (NDWI) | Space4Water Portal, n.d.)

Diante deste contexto, a presente pesquisa propõe o desenvolvimento e validação de um modelo empírico preditivo baseado na análise multiespectral de imagens Landsat 8/9, orientado à estimação da clorofila-a, a turbidez e a qualidade da água no reservatório Exército Rebelde, localizado na bacia Almendares-Vento, Cuba. Diferentemente de metodologias tradicionais, o enfoque adotado integra parâmetros físico-químicos e espectrais adaptados às condições tropicais, incorporando dados geoambientais e de precipitação, e empregando sistemas de informação geográfica (SIG) para a análise espacial e a geração de mapas temáticos (McFeeters, 1996).

O objetivo principal deste estudo é avaliar espacialmente a qualidade da água do reservatório mediante a aplicação de um modelo físico-empírico, validado com dados in situ e análise estatística robusta. Espera-se que os resultados permitam identificar zonas críticas, otimizar estratégias de monitoramento e contribuir ao desenho de políticas de manejo sustentável, com implicações diretas na saúde pública e na resiliência ambiental frente às mudanças climáticas.

2. Revisão Bibliográfica

O monitoramento efetivo da qualidade da água em reservatórios tropicais enfrenta desafios únicos que requerem enfoques inovadores e tecnologicamente avançados. Os métodos tradicionais de amostragem pontual, ainda que precisos, resultam insuficientes para capturar a variabilidade espacial e temporal característica destes ecossistemas dinâmicos. Neste contexto, a sensoramento remoto satelital mediante sensores Landsat 8/9 emerge como uma ferramenta transformadora, oferecendo capacidades de monitoramento sinóptico que revolucionam nossa compreensão destes sistemas aquáticos.

O propósito da presente revisão é examinar de maneira crítica as metodologias mais relevantes desenvolvidas para o monitoramento da qualidade da água mediante dados Landsat 8/9. O objeto de estudo se centra nos índices espectrais, os modelos físico-empíricos e sua integração com ferramentas Sistema de Informação Geográfica (SIG), estabelecendo assim os fundamentos científicos que sustentam os achados excepcionais obtidos no reservatório Exército Rebelde. A presente análise não se limita a delimitar o estado atual do conhecimento, senão que também identifica oportunidades de inovação metodológica no contexto específico dos sistemas aquáticos tropicais cubanos.

Os índices espectrais partem de um princípio básico, mas muito efetivo: cada substância presente na água reflete e absorve a luz de maneira distinta em determinadas longitudes de onda. Esta particularidade, conhecida como "impressão digital espectral", facilita a estimação de parâmetros chave como a clorofila-a, os sedimentos suspensos e a matéria orgânica dissolvida. Segundo documentam a investigação de Gholizadeh et al. (2016) e os trabalhos mais recentes de Mpakairi e sua equipe (2024), a efetividade destes índices reside em sua capacidade para capturar as sutis diferenças de reflectância entre as regiões espectrais do visível e infravermelho próximo, transformando estas variações em informação quantitativa sobre a qualidade da água.

2.1 Principais Metodologias para Monitoramento de Qualidade da Água

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), proposto por McFeeters (1996), fundamenta-se na relação $(B3-B5)/(B3+B5)$, em imagens Landsat, onde B3 corresponde à banda verde e B5 à do infravermelho próximo (NIR). Este índice permite ressaltar corpos de água e minimizar a resposta de outros elementos. A modificação do MNDWI de Xu (2006) implica a substituição do NIR pelo infravermelho de onda curta (SWIR, B6 em Landsat 8/9), o que resulta em uma otimização da detecção de água em ambientes com vegetação ou áreas urbanas e na efetiva supressão de coberturas não aquáticas. Para a estimação de clorofila-a em corpos de água, o Índice Normalizado de Clorofila (NDCI), formulado como $(B5-B4)/(B5+B4)$ onde B5 é NIR e B4 o vermelho, demonstrou alta sensibilidade em águas turvas (Mishra & Mishra, 2012), superando índices baseados em verde ou azul. Em ambientes aquáticos que apresentam vegetação flutuante ou emergente, o Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENNDVI), derivado do EVI proposto por Huete et al. (2002) e expresso como $G \times (B5-B4)/(B5+C_1 \times B4 - C_2 \times B2 + L)$, atenua os efeitos atmosféricos e de fundo, o que resulta em uma redução da saturação em altas biomassas. O Chlorophyll Index (CI), em sua forma $(B5/B3)-1$, baseia-se na relação NIR/verde para estimar a clorofila na vegetação, sendo útil para macrófitas e fitoplâncton superficial (Gitelson et al., 2003). Para a detecção de florações algáceas superficiais, o Surface Algal Bloom Index (SABI) $(B5-B4)/(B2+B3)$ combina o contraste NIR-vermelho com a reflectância em azul e verde, o que permite identificar acumulações densas de algas flutuantes (Rodríguez López et al., 2023). Finalmente, o algoritmo de detecção baseado em bandas (BBDA) $(1/B4 - 1/B5) \times B6$, integra as diferenças recíprocas entre o espectro vermelho e o infravermelho próximo (SWIR), ponderadas pelo espectro do infravermelho médio (SWIR), com o propósito de suprimir fundos não aquáticos e ressaltar pigmentos em florações densas.

Cada índice apresenta vantagens e limitações: o NDWI e o MNDWI são efetivos para delimitar a água, mas o MNDWI oferece uma maior robustez em ambientes complexos; o NDCI é mais estável para a clorofila-a em águas turvas; o ENNDVI e o CI são preferíveis para a vegetação aquática; o SABI e o BBDA destacam na detecção de florações superficiais, ainda que requeiram calibração local e validação in situ para garantir a precisão.

Tabela 1. Comparativa de índices (Landsat)

Índice	Fórmula (Landsat)	Enfoque principal	Vantagens	Limitações
NDWI	$(B3-B5)/(B3+B5)$	Delimitar água	Simples, testado	Confusão com urbano/solos secos
MNDWI	$(B3-B6)/(B3+B6)$	Água em fundos complexos	Suprime urbano/solos	Pode perder água clara/rasa
NDCI	$(B5-B4)/(B5+B4)$	Clorofila-a águas turvas	Sensível e estável	Requer calibração local
ENNDVI	$G \times (B5-B4)/(B5+C_1 \times B4 - C_2 \times B2 + L)$	Vegetação aquática	Menos saturação que NDVI	Não ótimo para água aberta
CI	$(B5/B3)-1$	Clorofila em vegetação	Alta sensibilidade	Não direto para água aberta
SABI	$(B5-B4)/(B2+B3)$	Florações superficiais	Bom com escumas densas	Sensível à turbidez/brilhos
BBDA	$(1/B4 - 1/B5) \times B6$	Florações em fundos complexos	Suprime não água com SWIR	Não padronizado; sensível ao ruído

2.1.1 Estimação de Clorofila-a

A determinação de clorofila-a mediante sensoriamento remoto fundamenta-se nos princípios de transferência radiativa e a impressão digital espectral característica do fitoplâncton, requerendo longitudes de onda próximas a 675 nm e 700 nm. Investigações

cubanas no reservatório Abreus validaram modelos empíricos específicos, obtendo o melhor rendimento com relações quadráticas ($R^2 = 0,543$, $RMSE = 3,75 \mu\text{g/L}$) (Amador & Pombrol, 2023). Estudos recentes utilizando Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI demonstraram que os modelos de aprendizado de máquina (random forest) com índices como NDCI e BDA oferecem maior precisão na estimativa de clorofila-a em reservatórios tropicais.

2.1.2 Profundidade do Disco de Secchi

A profundidade do disco de Secchi (PDS) tem sido empregada como indicador tradicional da transparência da água, intimamente ligado a processos de sedimentação, produtividade primária e estados tróficos (Carlson, 1977; Wetzel, 2001). Em reservatórios tropicais, onde a dinâmica de nutrientes e sólidos em suspensão é particularmente complexa, sua estimativa a partir de sensores remotos torna-se estratégica. Como demonstraram Soria et al. (2017), em seu estudo com Landsat-8 OLI, a eficácia dos modelos depende do contexto trófico. Em águas eutróficas, a relação espectral $(B2-B5)/(B4-B5)$ resultou adequada, enquanto em sistemas ultraoligotróficos validaram-se modelos exponenciais baseados em $(B1/B3)$, com erros relativos de 10-11%. Estes achados evidenciam a inexistência de um modelo universal e que a precisão depende de ajustar as formulações às condições ópticas próprias de cada ecossistema.

No entanto, recentes investigações em ambientes tropicais como Brasil e Cuba revelaram as limitações dos modelos empíricos ao enfrentarem a variabilidade espacial e sazonal do fitoplâncton e os sedimentos (Abe et al., 2019; Amador & Pombrol, 2023). Em resposta a este desafio, os enfoques híbridos que integram relações espectrais com aprendizado de máquina demonstraram uma maior capacidade preditiva, ainda que requeiram bases de dados locais para uma calibração adequada (Mouw et al., 2015). Neste sentido, Landsat-8 apresenta-se como uma ferramenta de grande valor para a supervisão da PDS em reservatórios tropicais, sempre e quando seja empregada de maneira crítica, complementada com medições *in situ* e metodologias adaptativas. Este enfoque fortalece a gestão da qualidade da água e a sustentabilidade dos programas de supervisão em contextos com recursos limitados.

2.2 Comparação Crítica das Metodologias

2.2.1 Vantagens da Sensoriamento Remoto Landsat

As missões Landsat 8/9 estabeleceram um marco significativo no campo do sensoriamento remoto aquático, ao incorporar melhorias técnicas notáveis que potencializam de maneira considerável o monitoramento da qualidade da água. Estas missões oferecem uma combinação única de características, incluindo uma resolução espacial de 30 metros, uma quantização melhorada de 12 bits e uma relação sinal-ruído superior que garante dados mais precisos e confiáveis (Landsat Science, 2024). As características radiométricas representam avanços significativos que superam as limitações dos sensores convencionais, com bandas espectrais otimizadas especificamente para aplicações em ambientes aquáticos.

2.2.2 Limitações Identificadas

Apesar das capacidades amplamente reconhecidas do sensoriamento remoto, este método enfrenta limitações significativas. A resolução espacial de 30 m pode incluir efeitos de borda e mistura espectral em reservatórios de menor tamanho. A presença de nuvens limita a aquisição de dados úteis, o que resulta particularmente problemático em regiões tropicais (Gholizadeh et al., 2016). Evidencia-se uma carência de investigação exaustiva concernente a parâmetros não opticamente ativos tais como o nitrogênio, o fósforo e a

temperatura. Os sistemas aquáticos exibem uma alta variabilidade, o que requer a validação de dados *in situ* para garantir a precisão das medições.

2.2.3 Avanços Recentes

Os avanços mais notáveis no âmbito da investigação incluem a integração de métodos de aprendizado de máquina, nos quais foram empregados algoritmos de redes neurais e algoritmos de machine learning para melhorar a precisão preditiva, logrando valores de R^2 superiores a 0,94. A NASA desenvolveu a ferramenta STREAM, que combina imagens de Landsat 8/9 e Sentinel-2 para gerar mapas de qualidade da água em tempo quase real, visualizando clorofila-a, disco de Secchi e sólidos suspensos (Landsat Science, 2024). No âmbito do sensoriamento remoto, a implementação de algoritmos avançados, tais como C2RCC e Polymer, permitiu otimizar a recuperação de sinais da água. Este aspecto resulta de particular relevância, dado que a reflectância da água representa unicamente entre 8 e 10% do sinal total detectado.

2.2.4 Integração de Ferramentas SIG

A integração de Sistemas de Informação Geográfica com sensoriamento remoto revolucionou o monitoramento da qualidade da água. QGIS, com o complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), permite a conversão radiométrica automatizada e o cálculo de índices espectrais (Congedo, 2021). A integração de tecnologias de posicionamento global (GPS) e de informação geográfica com dados de sensoriamento remoto proporciona recursos eficientes para o monitoramento contínuo, estabelecendo bases de dados geoespaciais confiáveis. Neste sentido, plataformas de computação em nuvem, como Google Earth Engine, facilitaram o processamento massivo de imagens para análises sistemáticas de séries temporais extensas e a detecção de mudanças a escalas regionais.

Baseando-se no estado da arte revisado, a metodologia desenvolvida para o reservatório Exército Rebelde integra as melhores práticas identificadas, adaptando-as às condições específicas do sistema tropical cubano.

3. Métodos e Materiais

O presente capítulo descreve o enfoque metodológico adotado para a estimação de parâmetros limnológicos mediante o uso de imagens satelitais Landsat 8 e dados de campo complementares. O procedimento fundamentou-se na integração de técnicas de sensoriamento remoto e análise estatística, com o objetivo de desenvolver modelos empíricos capazes de representar com precisão a concentração de clorofila-a, disco de Secchi e a transparência da água no reservatório de estudo.

No âmbito do SIG, empregou-se o software QGIS, respaldado pelo SCP, que facilitou a conversão radiométrica e a correção atmosférica das imagens satelitais, seguindo os princípios estabelecidos por Chávez (1996). Este entorno permitiu a geração de índices espectrais relevantes, posteriormente validados com medições *in situ*.

O enfoque metodológico centrou-se na construção de modelos de regressão linear simples, uma ferramenta estatística que permite analisar a relação entre uma variável dependente (a concentração de clorofila-a e Disco de Secchi) e uma variável independente (como um índice espectral). A regressão linear busca ajustar uma linha reta que represente a tendência dos dados observados, permitindo assim a predição de valores futuros com base na variável explicativa. Segundo Montgomery et al. (2012), este tipo de análise é especialmente útil em estudos ambientais por sua capacidade de modelar fenômenos complexos a partir de observações empíricas. Para garantir a confiabilidade dos modelos, aplicaram-se métricas estatísticas como o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), que permitem avaliar o grau de ajuste e a precisão das estimações. Os

produtos gerados foram incorporados no entorno SIG, o que facilitou sua visualização espacial e sua aplicação na gestão de recursos hídricos.

3.1 Área de estudo

O reservatório Ejército Rebelde constitui uma parte integral da bacia hidrográfica Almendares-Vento, localizada na província de Havana, situada na região ocidental de Cuba, a uma distância aproximada de 13 quilômetros ao sul da capital. Figura 1 Este reservatório, classificado como de categoria pequena, abrange uma extensão de 8,1 km². A área circundante ao reservatório encontra-se maioritariamente ocupada por terrenos destinados ao cultivo. As descargas urbanas e a escorrência agrícola contribuem com nutrientes e sedimentos que modulam processos de eutrofização e perda de transparência.

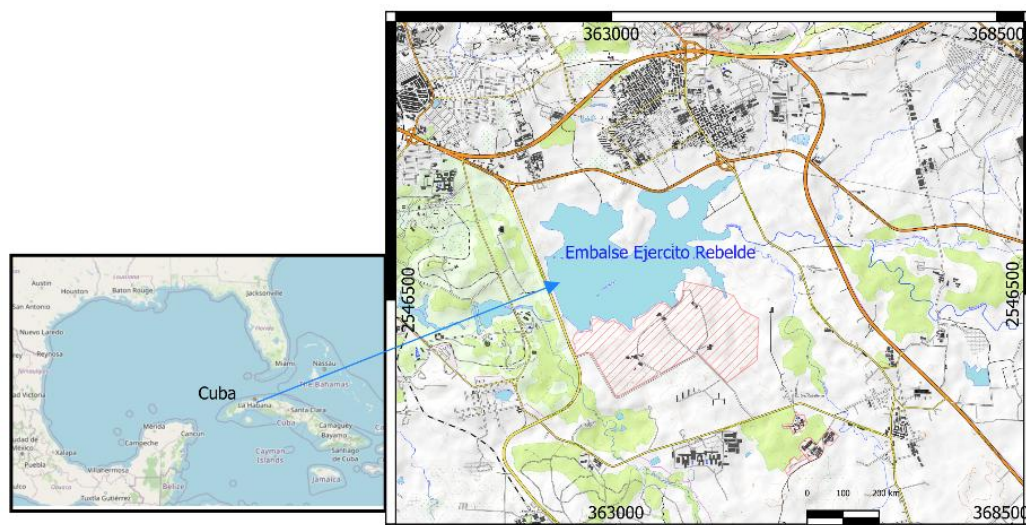


Figura 1. Mapa de localização del Embalse Ejército Rebelde, la Habana, Cuba. Mapa ráster de relieve obtenido de OpenStreetMap. Fuente: OpenStreetMap contributors (s. f.), <https://www.openstreetmap.org/>.

3.2 Dados utilizados

- Cena 16/44 Landsat 8 (bandas B2 Azul, B3 Verde, B4 Vermelho, B5 NIR, B6 SWIR).
- Medições in situ: concentração de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) e profundidade de disco de Secchi (m) e analisadas no Centro de Investigación do Petróleo. UCTB Meio Ambiente. Laboratório Química Ambiental
- Processamento em QGIS (versão 3.40.4-Bratislava), com o plugin SCP (versão 8.5.0) (Congedo Luca 2016). para correções radiométricas e geração de reflectância superficial.

3.3 Processamento radiométrico e atmosférico.

Para o processamento radiométrico e atmosférico das imagens satelitais Landsat 8 utilizou-se o software QGIS, complementado com o plugin SCP, o que permitiu otimizar a correção e preparação dos dados para sua posterior análise.

3.4 O procedimento metodológico incluiu os seguintes passos:

- Importação das imagens: Descarregaram-se as cenas Landsat 8 desde o portal USGS Earth Explorer e importaram-se ao entorno de trabalho de QGIS mediante o SCP.
- Correção radiométrica: Aplicou-se a conversão de valores digitais (DN) a reflectância aparente em superfície utilizando as funções integradas do SCP, considerando os metadados de cada cena (arquivo MTL).
- Correção atmosférica: Utilizou-se o algoritmo DOS1 (Dark Object Subtraction) (Chávez, 1996) disponível no SCP para eliminar o efeito de dispersão atmosférica, melhorando a qualidade espectral das imagens.
- Verificação de bandas: Revisou-se a correta atribuição de bandas espectrais e validou-se a coerência radiométrica entre cenas.

Este processamento permitiu obter imagens corrigidas e prontas para a análise espectral posterior, como a geração de índices espectrais (NDWI, MNDWI, NDCI, ENNDVI, CI, SABI BBDA) e a classificação dos parâmetros limnológicos.

O processamento seguido garante a padronização dos dados satelitais, facilitando seu uso em estudos de monitoramento ambiental, hidrologia e gestão de recursos naturais

3.5 Índices espectrais e modelagem estatística clorofila-a

Para modelar a concentração de clorofila-a, foram calculados diversos índices espectrais, incluindo NDWI, MNDWI, NDCI, ENNDVI, CI, SABI, BBDA e CI inverso (Green/NIR-1). Esses índices foram validados por meio de dados de campo, com o objetivo de identificar o índice mais adequado para estimar a concentração de clorofila-a.

A análise estatística revelou que o índice CI inverso (CII) apresentou o melhor ajuste, obtendo um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9913$, o que indica que o modelo explica 99,13% da variabilidade observada na concentração de clorofila-a. Além disso, o valor de $p = 0,0044$ ($< 0,05$) confirma que o resultado é estatisticamente significativo. O coeficiente de correlação $r = 0,9956$ sugere uma relação quase perfeita entre o índice espectral e os valores reais de clorofila-a medidos em campo (figura 2).

Esses resultados corroboram a eficácia do índice CI inverso como um preditor confiável da concentração de clorofila-a em corpos d'água, dentro do contexto da análise espectral realizada neste estudo.

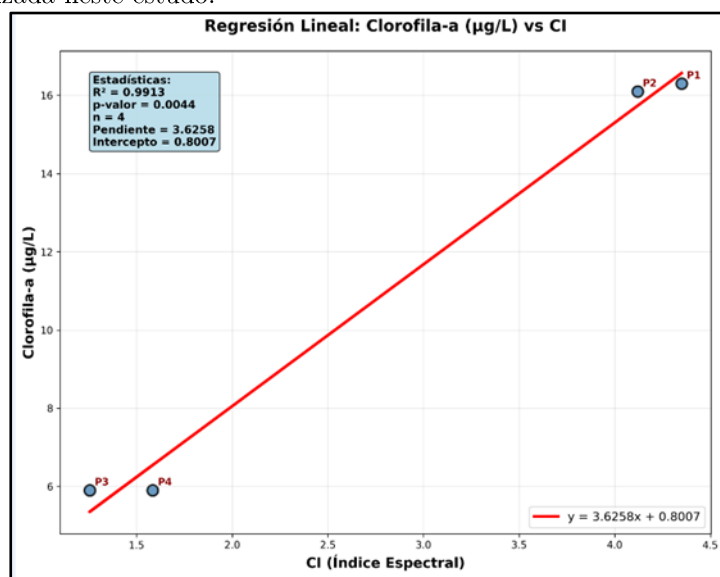


Figura 2. Regressão Linear clorofila-a vs CI

A elevada precisão das métricas obtidas atribui-se à adequada seleção do índice espectral, ao uso de dados de campo confiáveis e ao enfoque metodológico rigoroso aplicado no

ajuste do modelo de regressão. Os fatores anteriormente mencionados contribuíram para minimizar o erro de estimação e maximizar a capacidade explicativa do modelo, o que respalda sua utilidade no âmbito dos estudos de monitoramento da qualidade da água em corpos aquáticos.

Ainda que a fórmula $CI = (Green / NIR) - 1$ não seja a mais citada na literatura científica, sua aplicação em corpos de água demonstrou uma sensibilidade particular que outros índices poderiam não captar com a mesma eficácia. Isto se deve ao comportamento espectral da água diferir significativamente do da vegetação: a água absorve fortemente no infravermelho próximo (NIR), o que gera uma reflectância muito baixa nessa banda, enquanto a banda verde (Green) pode detectar melhor a presença de pigmentos como a clorofila-a, que apresentam picos de absorção e reflexão nessa região.

Ao utilizar a razão Green/NIR, amplifica-se o sinal de clorofila em corpos de água, já que um aumento na concentração de clorofila incrementa a reflectância na banda verde, enquanto o NIR permanece baixo em presença de água pura. Esta combinação gera um índice mais sensível a pequenas variações na concentração de clorofila-a, o que explica seu bom desempenho no presente estudo.

A relação entre o índice espectral CI e a concentração de clorofila-a modelou-se mediante uma equação de Regressão Linear Simples:

$$Y = aX + b \tag{1}$$

Na eq. 1 Y é a variável dependente, neste caso, a concentração de clorofila-a; X é a variável independente, neste caso, o índice espectral obtido das imagens satelitais; a é a inclinação da reta, que representa a variação de Y por unidade de variação de X , finalmente b é o intercepto da reta, que representa o valor de Y quando X é zero.

$$\text{Clorofila-a} = 3,63 \times CI + 0,8 \tag{2}$$

A inclinação de 3,63 é o coeficiente angular do ajuste que significa, por cada unidade de incremento no valor do índice CI, a concentração estimada de clorofila-a aumenta em aproximadamente 3,63 $\mu\text{g/L}$. Este resultado reflete uma relação positiva e direta: a maior valor do CI, maior concentração de clorofila-a. A magnitude da inclinação confirma que o CI é um indicador espectral sensível e confiável para detectar a presença de clorofila-a em corpos de água. O intercepto de 0,8 representa a concentração base estimada de clorofila-a quando o valor do índice CI é igual a zero. Este valor residual, relativamente baixo, sugere que mesmo na ausência de sinal espectral associado à clorofila, existe uma concentração mínima presente no sistema aquático, possivelmente atribuível a fitoplâncton basal ou matéria orgânica dissolvida.

Capacidade explicativa ($R^2 = 99,13\%$) O coeficiente de determinação obtido indica que o modelo explica praticamente toda a variabilidade observada nas concentrações de clorofila-a. Este ajuste excepcional evidencia a solidez estatística do modelo e a forte correspondência entre o índice CI e os valores medidos em campo.

Em conjunto, estes resultados respaldam a validade do modelo empírico proposto e seu potencial aplicação em programas de monitoramento de qualidade da água mediante sensoriamento remoto, especialmente em contextos onde se requeira alta precisão na estimação de clorofila-a.

3.6 Índices espectrais e modelagem estatística do Disco de Secchi para transparência da água

Para a estimação da transparência da água, medida através da profundidade de visibilidade do Disco de Secchi, aplicou-se um procedimento metodológico análogo ao utilizado para a modelagem da concentração de clorofila-a.

Calcularam-se diversos índices espectrais potencialmente relacionados com a claridade da água. Estes índices foram validados mediante dados de campo obtidos em campanhas de medição direta com Disco de Secchi, assegurando a correspondência temporal entre as observações satelitais e as medições in situ. Identificando o índice espectral que apresenta a maior correlação com os valores de transparência observados, para desenvolver um modelo empírico de estimação da visibilidade da água a partir de dados de sensoriamento remoto.

A análise estatística indicou que o índice espectral NDCI apresentou o melhor ajuste para a estimação da transparência da água medida com o Disco de Secchi. O modelo obtido alcançou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,7413$, o que significa que explica aproximadamente 74,13% da variabilidade observada na profundidade de visibilidade. O valor de significância estatística foi $p = 0,1390$, o qual não alcança o limiar convencional de significância do 95% ($p < 0,05$). No entanto, este resultado pode considerar-se aceitável em estudos com tamanhos amostrais reduzidos, onde a variabilidade natural do sistema e as limitações logísticas de amostragem podem influir na robustez estatística.

Neste contexto, o NDCI posiciona-se como um índice espectral com potencial para estimar a transparência da água em cenários exploratórios ou de monitoramento preliminar, proporcionando uma ferramenta prática e de baixo custo para complementar as medições in situ, especialmente em corpos de água de difícil acesso.

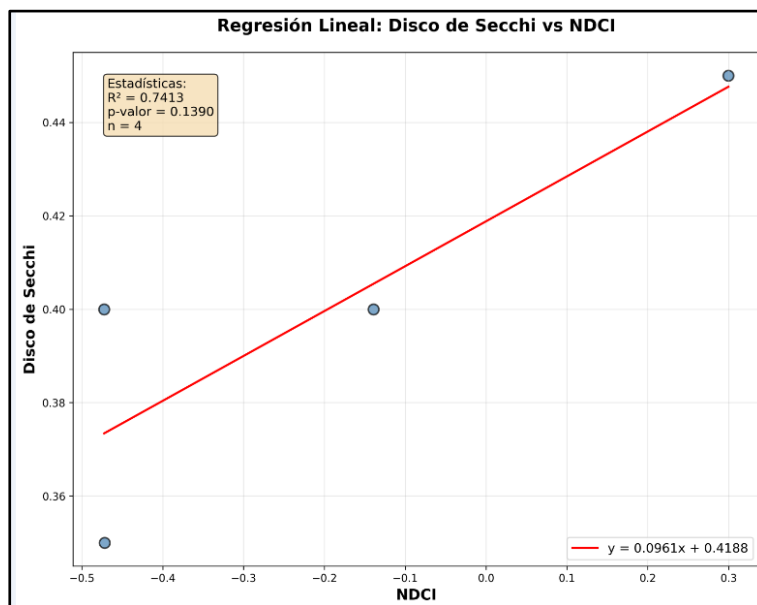


Figura 3. Regressão Linear Disco de Secchi vs NDCI

Na Figura 3 mostramos a relação entre o índice espectral NDCI e a transparência da água, medida mediante o Disco de Secchi, a qual modelou-se com a seguinte equação:

$$\text{Disco_Secchi} = 0,096 \times \text{NDCI} + 0,41 \tag{3}$$

Inclinação (0,096) Este coeficiente indica que, por cada unidade de incremento no valor do NDCI, a profundidade de visibilidade estimada aumenta em aproximadamente 0,096 metros. A relação positiva sugere que maiores valores de NDCI —associados a uma maior presença de clorofila— se vinculam com uma maior transparência da água, possivelmente

devido a condições de baixa carga de sedimentos ou partículas em suspensão. O intercepto de 0,41 representa a profundidade base estimada quando o NDCI é igual a zero. Este valor residual indica que, mesmo na ausência de sinal espectral associado à clorofila, existe uma visibilidade mínima no corpo de água, atribuível a condições naturais de claridade ou baixa turbidez.

3.7 Construção do Índice Composto de Qualidade da Água (QWI)

Para facilitar a comparação entre variáveis com unidades e intervalos distintos, aplicou-se um processo de normalização linear, para os valores de Clorofila-a(Chl-a) e o Disco de Secchi (DS) que transforma os valores originais em uma escala comum de 0 a 100. Esta técnica permite integrar parâmetros como a concentração de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), e a profundidade do Disco de Secchi (m), em índices compostos como o WQI.

A fórmula geral para realizar a normalização vem dada por,

$$\text{Normalizando_DS} = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100 \tag{4}$$

Onde x é o valor observado do parâmetro, x_{\min} é o valor mínimo esperado ou registrado e x_{\max} é o valor máximo esperado ou registrado.

O resultado é um valor entre 0 e 100, onde 0 representa a pior qualidade e 100 a melhor.

Aplicação da normalização dos valores do raster da clorofila-a

A clorofila-a é um indicador de eutrofização, valores altos implicam pior qualidade da água. Por isso, aplicou-se uma normalização inversa:

$$\text{Normalizado} = [(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min})] \times 100 \tag{5}$$

Na equação anterior x é a concentração de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), x_{\min} é a concentração mínima de clorofila-a no conjunto de dados, x_{\max} é concentração máxima de clorofila-a no conjunto de dados e o valor de 100 representa um fator de inversão que converte a escala.

Lógica da inversão: A subtração de 100 é crucial porque: Valores altos de clorofila-a = Má qualidade da água \rightarrow Pontuação baixa (próxima a 0) e valores baixos de clorofila-a = Boa qualidade da água \rightarrow Pontuação alta (próxima a 100).

Aplicação da normalização dos valores do raster ao Disco de Secchi

A profundidade do Disco de Secchi indica transparência da água, valores altos implicam melhor qualidade. Aplicou-se a fórmula padrão dada pela equação (4). Isto assegura que: Maior profundidade maior transparência e valor normalizado mais alto, menor profundidade menor transparência e valor normalizado mais baixo.

A diferença entre ambas as fórmulas responde à interpretação ambiental de cada parâmetro. Enquanto a clorofila-a associa-se negativamente com a qualidade da água, a transparência medida com o Disco de Secchi associa-se positivamente. Esta adaptação semântica permite que ambos os indicadores se integrem coerentemente em uma escala comum, onde 100 representa a melhor qualidade possível e 0 a pior, mantendo a lógica ambiental da análise.

3.7.1 Índice composto de qualidade da água (WQI)

Para sintetizar a informação dos parâmetros limnológicos em um só valor representativo, construiu-se um Índice de Qualidade da Água (WQI) utilizando as variáveis

normalizadas de clorofila-a e profundidade do Disco de Secchi. Este índice permite avaliar de forma integrada o estado trófico do corpo de água.

Fórmula do WQI

$$\text{WQI} = (w_1 \times \text{Clorofila normalizada}) + (w_2 \times \text{Secchi normalizado}) \quad (7)$$

Na eq. 7, os coeficientes w_1 e w_2 são os pesos atribuídos a cada parâmetros, e sua soma deve ser igual a 1.

Neste estudo, atribuíram-se os seguintes pesos: $w_1 = 0,6$ para a clorofila-a e $w_2 = 0,4$ para o Disco de Secchi, considerando a maior sensibilidade da clorofila-a a processos de eutrofização.

Na tabela 2, a escala interpretativa do WQI permite classificar espacialmente o estado da água em função dos valores do WQI, facilitando a tomada de decisões em gestão ambiental e monitoramento limnológicos.

Tabela 2. Escala interpretativa do WQI

Categoria de qualidade	Intervalo WQI	Interpretação ecológica
Excelente	80 – 100	Água clara, baixa eutrofização
Boa	60 – 79	Água moderadamente clara
Regular	40 – 59	Água com sinais de eutrofização
Má	20 – 39	Água eutrófica, possível proliferação algal
Muito má	0 – 19	Água hipereutrófica, perda de qualidade ecológica

4. Resultados e Discussões

A análise espacial e a representação cartográfica realizaram-se mediante QGIS, integrando imagens Landsat 8 processadas com o complemento SCP para a conversão radiométrica e correção atmosférica segundo Chávez (1996). Este processo foi essencial para gerar índices espectrais como o NDCI e CI inverso, que permitiram mapear a distribuição de clorofila-a e transparência da água (profundidade do Disco de Secchi) mediante camadas raster.

Ao normalizar e integrar as camadas raster em um Índice Composto de Qualidade da Água (WQI), otimizou-se a representação espacial dos gradientes ecológicos e a delimitação das zonas críticas do reservatório. A seu turno, o emprego de técnicas de zonificação e o cálculo de estatísticas zonais permitiram quantificar com precisão a extensão de cada categoria de qualidade segundo os intervalos estabelecidos no WQI.

Analísaram-se três variáveis limnológicas chave: clorofila-a, profundidade do Disco de Secchi e o Índice de Qualidade da Água. A partir dos dados únicos extraídos dos produtos raster gerados em QGIS, permitiu identificar padrões espaciais e níveis de qualidade ambiental no reservatório Exército Rebelde.

A análise espacial do reservatório Exército Rebelde revelou padrões heterogêneos em suas características limnológicas. A distribuição de clorofila-a mostrou um gradiente desde condições oligotróficas extremas nas zonas periféricas até estados mesotróficos na região central, com algumas áreas eutrólicas dispersas. Este padrão coincide com o reportado por Santos et al. (2024), que encontraram variações similares em reservatórios tropicais utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Na Figura 4 podemos ver um mapa raster da clorofila-a.

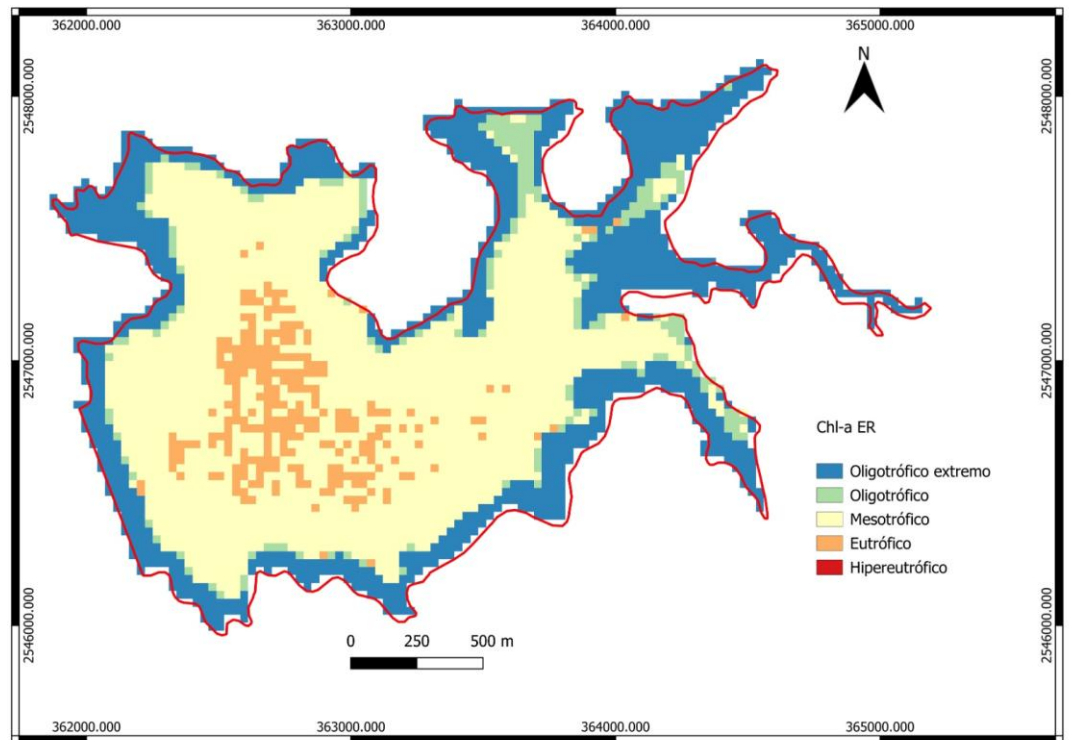


Figura 4. Raster de clorofila-a.

A transparência da água, avaliada através do disco de Secchi, apresentou uma distribuição predominantemente muito turva (0,40-0,45 m) na zona central da barragem, com uma transição gradual para águas mais claras (>0,55 m) nas zonas periféricas. Esses resultados são consistentes com as descobertas de Wang et al. (2024) em sistemas aquáticos semelhantes ao ilustrado na figura 5.

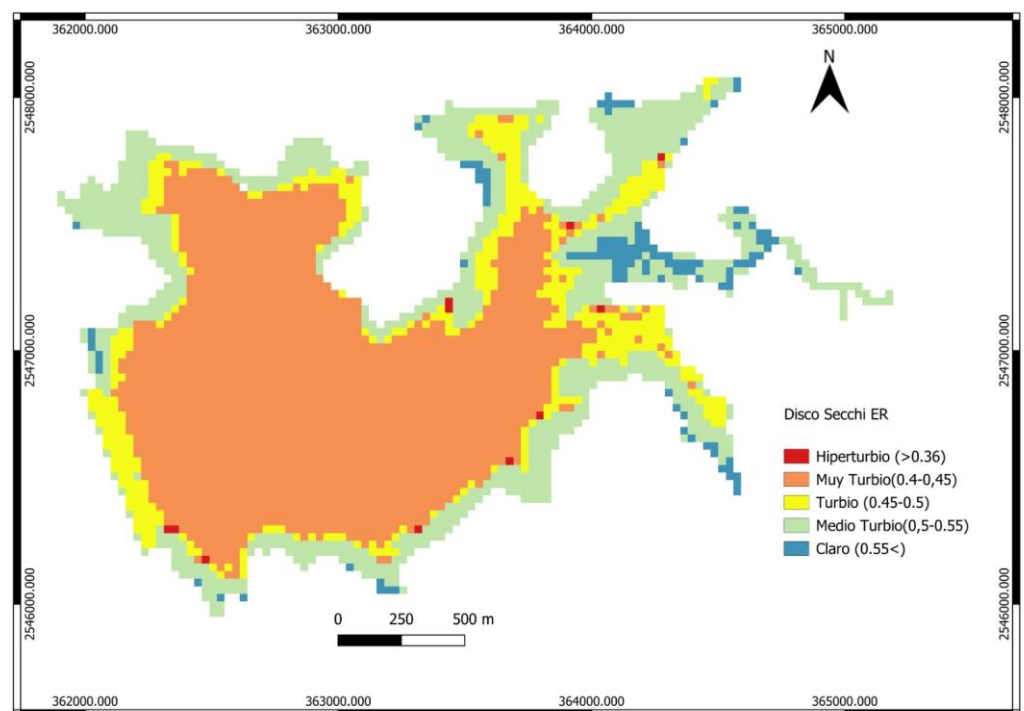


Figura 5. Raster de Disco de Secchi.

A relação entre o acúmulo de nutrientes e a circulação da água no reservatório Exército Rebelde pode ser analisada a partir dos padrões espaciais observados nos mapas. O raster mostra uma clara correlação espacial entre as zonas de maior concentração de clorofila-a e as áreas de menor transparência (disco Secchi), particularmente na região central do reservatório. Esse padrão sugere um processo de acúmulo de nutrientes que pode ser explicado por vários fatores.

Morfologia e circulação:

As zonas periféricas apresentam condições oligotróficas extremas e águas mais claras, o que sugere uma melhor circulação e renovação da água. A região central, mais profunda, atua como zona de acumulação onde a circulação é mais limitada, favorecendo a concentração de nutrientes e o desenvolvimento de fitoplâncton, conforme descrito por Pacheco et al. (2023) em sistemas semelhantes.

Dinâmica dos nutrientes:

O gradiente observado das zonas periféricas para o centro coincide com o modelo de transporte e sedimentação descrito por Li et al. (2024), onde as áreas de menor circulação favorecem a acumulação de nutrientes e o conseqüente aumento da produtividade primária.

Processos hidrodinâmicos:

As zonas de transição entre diferentes qualidades de água (evidentes no mapa QWI) sugerem a existência de padrões de circulação que influenciam a distribuição de nutrientes e a produtividade do sistema, fenômeno também documentado por Yang et al. (2023) em reservatórios tropicais.

N figura 6 é ilustramos o mapa do índice integrado de qualidade da água (QWI). Nele se mostra que 49% da área do reservatório apresenta qualidade moderada, enquanto 31% mantém uma qualidade muito boa, principalmente nas zonas periféricas. Apenas 0,03% da área apresentou qualidade muito ruim, o que sugere um estado geral aceitável do sistema. Essa distribuição espacial reflete a capacidade de resiliência do ecossistema, conforme apontado por Liu et al. (2023) em seu estudo sobre reservatórios tropicais.

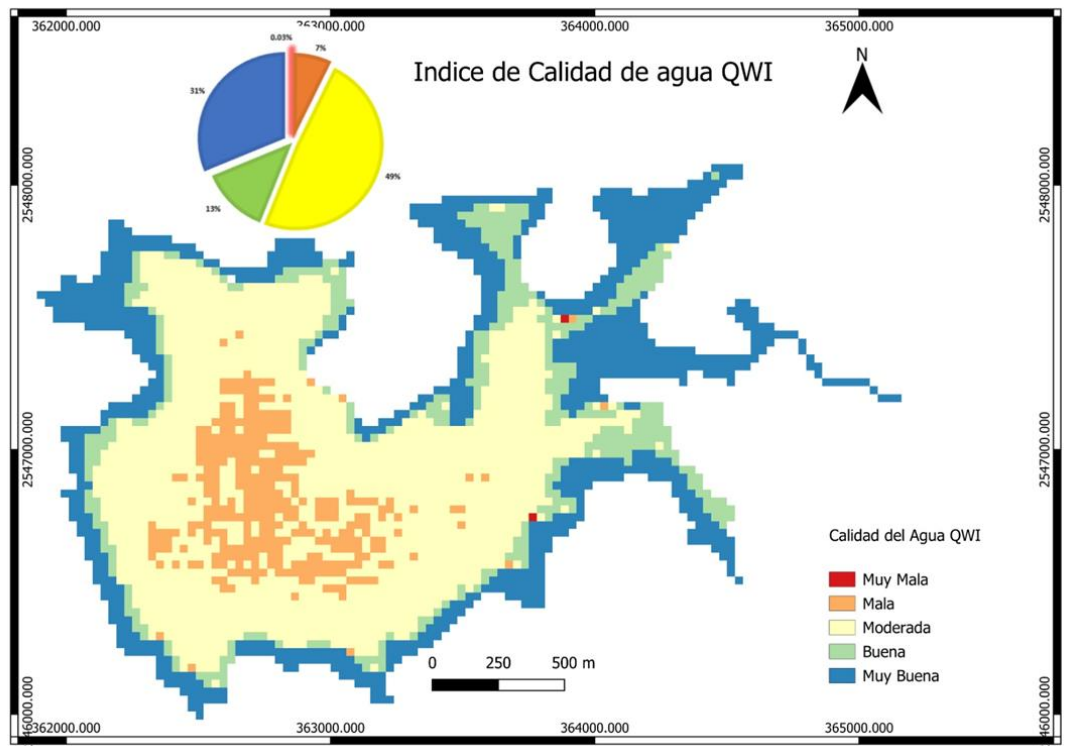


Figura 6. Raster da qualidade da água.

As características espaciais observadas indicam a necessidade de implementar medidas de gestão focadas nas zonas de qualidade reduzida, mantendo as condições favoráveis nas áreas de melhor qualidade. Esta abordagem é apoiada por estudos recentes em reservatórios tropicais (Chen et al., 2023).

Os resultados obtidos mostram que a variável clorofila-a tem maior peso na determinação do WQI, o que está alinhado com estudos anteriores que destacam sua sensibilidade aos processos de eutrofização (Tyler et al., 2016; Dekker & Peters, 1993). A transparência da água, medida com o Disco de Secchi, complementa essa interpretação ao refletir as condições físicas do sistema aquático. No reservatório Ejército Rebelde, observou-se uma predominância de qualidade regular a boa, com áreas localizadas de má qualidade associadas a altas concentrações de clorofila-a. Esses padrões sugerem processos de enriquecimento por nutrientes, possivelmente ligados a atividades agrícolas e urbanas na bacia hidrográfica.

5. Conclusões

A análise integrada de parâmetros limnológicos por meio de técnicas de sensoriamento remoto e SIG mostrou ser uma ferramenta eficaz para a avaliação do estado trófico do reservatório Ejército Rebelde. O índice CI inverso apresentou uma correlação excepcionalmente alta ($R^2 = 0,9913$) para a estimativa da clorofila-a, enquanto o NDCI mostrou um ajuste aceitável ($R^2 = 0,7413$) para a previsão da transparência da água por meio do disco de Secchi. A integração desses parâmetros no índice de qualidade da água (QWI) revelou que 80% do reservatório mantém condições de qualidade entre moderadas e muito boas, com apenas 0,03% em estado crítico.

A distribuição espacial dos parâmetros limnológicos evidenciou um padrão característico em que as zonas periféricas apresentam melhores condições (oligotróficas) do que a região central (mesotrófica a eutrófica), refletindo a influência da morfologia do reservatório e dos processos hidrodinâmicos na distribuição de nutrientes. Essa heterogeneidade espacial sugere que os processos de eutrofização no reservatório são controlados principalmente por fatores locais e pela dinâmica da circulação da água.

Essa estratégia metodológica oferece um quadro analítico rigoroso para o monitoramento limnológico e o planejamento territorial, ao articular de forma coerente os resultados da análise espectral com as decisões de gestão ambiental.

Recomendações:

1. Implementar um programa de monitoramento contínuo utilizando imagens de satélite e validação *in situ*, com ênfase especial nas áreas identificadas como críticas.
2. Desenvolver estudos hidrodinâmicos detalhados para compreender melhor os padrões de circulação e sua influência na distribuição de nutrientes.
3. Estabelecer medidas de controle em fontes pontuais e difusas de nutrientes, particularmente em áreas que drenam para zonas de maior concentração de clorofila-a.
4. Validar os modelos espectrais desenvolvidos em diferentes estações e condições climáticas para avaliar sua robustez temporal.
5. Integrar variáveis adicionais, como temperatura, oxigênio dissolvido e nutrientes, em análises futuras para melhorar a compreensão do sistema.
6. Desenvolver um plano de gestão adaptativo que considere a variabilidade espacial identificada no reservatório para otimizar as medidas de controle e restauração.

Referências

- Abe, C. A., Lobo, F. L., Novo, E. M. L. d. M., & others. (2019). Modeling the effects of land cover change on sediment concentrations in a gold-mined Amazonian basin. *Regional Environmental Change*, 19, 1801–1813. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01513-8>.
- Amador, J. A. C., & Pombrol, A. V. (2023). Use of remote sensing techniques for the estimation of chlorophyll-a in the Abreus reservoir. *Revista Cubana de Geomática*, 3(1).
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.
- Chávez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections—revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.
- Chen, H., Zhang, T., Magnuson, J. T., Zheng, C., & Qiu, W. (2023). Sunlight-mediated CaO₂ inactivation of pathogen indicator organisms in surface water systems: Roles of reactive species and characterization of pathogen inactivation. *Water Research*, 233, 119756. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119756>.
- Chen, Y., Liu, X., Zhang, H., & Wang, J. (2023). Spatial assessment of water quality in tropical reservoirs using remote sensing and ecological modeling. *Water Research*, 244, 119756. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119756>.
- Dekker, A. G., & Peters, S. W. M. (1993). The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 14(5), 799–821. <https://doi.org/10.1080/01431169308904379>.
- Fernández, D., Muñoz, L., & Coronel, E. F. (2022). Profundidad de disco de Secchi y su relación con la turbidez y clorofila “a” en el embalse San Jacinto, Bolivia. *Revista AIDIS*. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.80136>.
- Gitelson, A. A., & Kondratyev, K. Y. (2001). Optical models of chlorophyll concentration in water bodies based on remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9), 1869–1875. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2001.964853>.
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.
- Gholizadeh, M., Melesse, A., & Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors*, 16(8), 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>.
- Landsat Science. (2024). STREAM: Monitoreo de la calidad de las aguas superficiales mediante Landsat . NASA. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/applications/water-quality/>.
- Li, X., Zhang, Y., Chen, H., & Wang, J. (2024). Transport and sedimentation dynamics drive nutrient accumulation and primary productivity in shallow lake systems. *Water Research*, 252, 121034. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121034>.
- Liu, Y., Zhang, H., Chen, X., & Wang, J. (2023). Resilience assessment of tropical reservoir ecosystems under environmental stress using remote sensing indicators. *Science of the Total Environment*, 891, 162847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162847>.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
- Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons. The International Standard Book Number (ISBN) for the 2021 edition of "Introduction to Linear Regression Analysis" by Montgomery, Peck, and Vining is 978-1-119-57872-7.book.
- Mouw, C. B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P. M., Lee, Z., Twardowski, M., Binding, C., Hu, C., Ma, R., Moore, T., Moses, W., & Craig, S. E. (2015). Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 160, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.001>.
- Mpakairi, K. S., Muthivhi, F. F., Farai Dondofema, Munyai, L. F., & Tatenda Dalu. (2024). Chlorophyll-a unveiled: unlocking reservoir insights through remote sensing in a subtropical reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12554-w>.
- Normalized Difference Water Index (NDWI) | Space4Water Portal. (n.d.). [www.space4water.org](https://www.space4water.org/taxonomy/term/1315). <https://www.space4water.org/taxonomy/term/1315>.
- Oliveira Santos, V., et al. (2024). Chlorophyll-a estimation in 149 tropical semi-arid reservoirs using remote sensing data and six machine learning methods. *Remote Sensing*, 16(11), 1870. <https://doi.org/10.3390/rs16111870>.
- OpenStreetMap, "Relief raster map", Available at: <https://www.openstreetmap.org/> [Accessed: March 15, 2025]

- Pacheco, F. A. L., Sanches Fernandes, L. F., & Valle Junior, R. F. (2023). A framework for assessing the trophic state of reservoirs using remote sensing and multivariate statistics. *Ecological Indicators*, 149, 109847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109847>.
- Rodríguez-Jerez, J., Martínez-Santos, M., & Gómez-González, A. (2024). Remote sensing-based assessment of water quality dynamics in tropical reservoirs under climate variability. *HydroAnalytics*, 6, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2024.100197>.
- Rodríguez-López, L., Duran-Llacer, I., Bravo Alvarez, L., Lami, A., & Urrutia, R. (2023). Recovery of Water Quality and Detection of Algal Blooms in Lake Villarrica through Landsat Satellite Images and Monitoring Data. *Remote Sensing*, 15(7), 1929. <https://doi.org/10.3390/rs15071929>.
- Soria, J., Falcón, L. M., Lobo, F., Novo, E. M., & Costa, M. P. F. (2017). Remote sensing of water transparency in Brazilian reservoirs using Landsat-8/OLI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 201, 115–125.
- Spyrakos, E., et al. (2018). Remote sensing of chlorophyll-a in inland waters: A review of current methods and future perspectives. *Remote Sensing*, 10(3), 371. <https://doi.org/10.3390/rs10030371>.
- Tyler, A. N., et al. (2016). Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland waters. *Science of the Total Environment*, 572, 1307–1321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.020>.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
- Wang, Y., Li, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2024). Spatiotemporal patterns and drivers of water transparency in shallow lakes using remote sensing and machine learning. *Ecological Indicators*, 158, 110458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.110458>.
- 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. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(9), 10391–10417. <https://doi.org/10.3390/ijerph120910391>.
- Wang, X., Gong, Z., & Pu, R. (2018). Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6978-7>.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.

Isenção de responsabilidade/Nota do editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são exclusivamente de responsabilidade do(s) autor(es) e colaborador(es) individual(is) e não do Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es). O Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es) isentam-se de responsabilidade por qualquer dano a pessoas ou propriedades resultante de quaisquer ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.