

MEDIDAS DE COMPLEXIDADE BASEADAS EM ENTROPIA INFORMACIONAL APLICADAS À IMAGEM LANDSAT 8 (OLI) PARA ESTIMATIVA DE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA

Andrea Koga-Vicente¹, Alessandra Fagioli da Silva², Cláudio Bielenki Junior³, João Vitor Guerrero², José Roberto Castilho Piqueira⁴, Luciana Spinelli-Araujo², Sérgio Henrique Vannucchi Leme de Mattos³, e Luiz Eduardo Vicente²

¹ AKV Geo consultoria, Alameda dos Ipês, 1215, Jaguariúna/SP, { andrea.kvicente@gmail.com }; ² Embrapa Meio Ambiente, Rodovia SP-340, Km 127,5, Tanquinho Velho, Jaguariúna, SP { alefagioli@hotmail.com, joaovitorguerrero@yahoo.com.br, luciana.spinelli@embrapa.br, luiz.vicente@embrapa.br }; ³ Laboratório de Sistemas Complexos Ambientais, Departamento de Hidrobiologia, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos {sergiomattos@ufscar.br, bielenki@ufscar.br}; ⁴ Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil {piqueira@lac.usp.br}

RESUMO

O uso de corpos d'água, sobretudo para fins comerciais (e.g. aquicultura), tem sido cada vez mais intenso, gerando demandas emergenciais para seu monitoramento. A alta variabilidade nos componentes físico-químicos da água dificulta seu mapeamento, mesmo com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, enquanto método consagrado para esse tipo de aplicação. O presente trabalho aplicou a dados do sensor OLI (Landsat 8) o algoritmo *CompPlex Janus* para avaliar o potencial da medida de variabilidade espacial baseada na entropia informacional H_e/H_{max} , como um novo método para estimativas de transparência da água. Os resultados indicaram significativa correlação com dados de turbidez de campo (-66%), obtidos no reservatório de Ilha Solteira - SP. Ademais, a aplicação do algoritmo dispensou série temporal de imagens, bem como parâmetros empíricos locais, mostrando-se de aplicação simples e computacionalmente rápida.

Palavras-chave — Sensoriamento Remoto, Reservatório, Aquicultura, Medidas de Complexidade, Estimativa de Transparência.

ABSTRACT

The use of water bodies, especially for commercial purposes (e.g. aquaculture), has been increasingly intense, generating emergency demands for their monitoring. The high variability in the physical-chemical components of water makes its mapping difficult, even with the use of remote sensing techniques, as an established method for this type of application. The present work applied the CompPlex Janus algorithm to data from the OLI sensor (Landsat 8) to evaluate the potential of the measurement of Spatial variability based on the informational entropy H_e/H_{max} as a new method for estimating water transparency. The results show a significant correlation between field turbidity data (-66%), obtained in

the Ilha Solteira reservoir - SP. Furthermore, the application of the algorithm did not require a time series of images, as well as local empirical parameters, proving to be simple to apply and computationally fast. The results obtained are believed to contribute to the qualitative monitoring indicative of water quality.

Keywords — Remote Sensing, Freshwater, Aquaculture, Complexity Measures, Transparency estimates.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, como um dos maiores detentores de água doce do mundo, tem um elevado potencial para o uso dos seus recursos hídricos e serviços ambientais, principalmente com atividades relacionadas à aquicultura [1,2], sendo uma atividade em franca ascensão no Brasil, com um aumento de 125% em um período de 10 anos analisados [3].

Entretanto, esta é uma atividade que apresenta total dependência da qualidade da água para prosperar e, que também, é potencial causadora de danos ambientais em caso de falta de boas práticas de manejo. Tais preocupações tornam-se ainda mais pertinentes diante de um contexto histórico de degradação dos recursos hídricos superficiais no Brasil ocorridos, principalmente, pela falta de monitoramento adequado [4].

Neste sentido, são essenciais os estudos que sejam capazes de produzir monitoramentos a baixo custo relativo, em grande escala e que preençam esta lacuna metodológica para a conservação das águas interiores, sobretudo em ambientes tropicais, com alta demanda por ferramentas adaptadas às suas características físico-químicas [5].

A presença de material particulado em reservatórios proveniente de ações humanas, como erosão e uso intensivo de aquicultura, bem como presença de algas, afetam a resposta espectral da água de forma altamente dinâmica espacial e temporalmente, demonstrando uma relação direta entre as propriedades analisadas em imagens de satélites, e o nível de sedimentos presentes [6,7]. Assim, avaliar a turbidez

e sua influência na transparência da água são essenciais para o monitoramento de sua qualidade. As técnicas de sensoriamento remoto orbital emergem como uma importante ferramenta de coleta de dados e análise de informações em ambiente aquático, possuindo custo relativamente baixo e proporcionando alta frequência de medidas e cobertura de grandes áreas [4,5,8,9]

Entretanto, devido à própria natureza variável da água e sua dependência à dinâmica do entorno, bem como pela baixa sensibilidade óptico espectral desse elemento, são exigidos métodos muitas vezes não triviais e complexos em sensoriamento remoto [10], tornando sua aplicação altamente especializada e restrita. Assim, este trabalho buscou contribuir com a melhoria de procedimentos de classificação de imagens ópticas orbitais, por meio da aplicação da ferramenta computacional *CompPlex Janus* para avaliar o potencial da medida de variabilidade baseada na entropia informacional H_e/H_{max} [11] na identificação de tubidez/transparência da água. A referida medida não se propõe a substituir métodos semi-quantitativos (e.g. empírico, analítico) de maior precisão, mas apresenta avanços substanciais no que se refere a sua simplicidade de uso, com redução de observações de campo, tempo de processamento e massa de dados, resultando em um desejável aumento da frequência de mapeamentos em larga escala, e baixo custo de realização.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende uma faixa territorial do reservatório de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, especificamente na confluência entre os Rios Paranaíba e Grande (Figura 1).

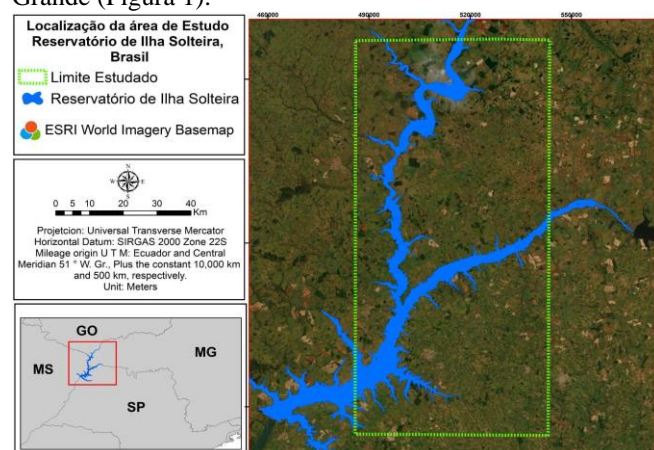


Figura 1. Localização da área de estudo.

Esta região é de especial interesse pois vem sofrendo alterações em grande escala em sua dinâmica de uso do solo, principalmente com a conversão de áreas naturais em usos agrosilvipastoris voltados à produção de *commodities* agrícolas [12]. Além disso, constata-se também o incremento do uso do reservatório para atividades relacionadas à

aquicultura, principalmente para a produção de tilápias em tanques-rede, fatores esses que potencialmente podem alterar as características dos recursos hídricos locais [4].

2.2. Materiais e Método

Para a aplicação da medida de variabilidade baseada na entropia informacional H_e/H_{max} , foi utilizada uma imagem do sensor *Operational Land Imager* (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30m, com data de passagem de 02 Julho de 2018 (Serviço Geológico dos Estados Unidos - <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Foram utilizadas as bandas 2 (Visível - 450-515 nm) e 5 (Infravermelho Próximo - 845-885 nm), para compor o índice espectral NDWI (do inglês *Normalized Difference Water Index*), o qual foi utilizado como base de referência, considerando ser o NDWI índice amplamente conhecido e utilizado para o monitoramento de sistemas aquáticos [8]. A heterogeneidade espacial foi avaliada utilizando-se a medida de variabilidade H_e/H_{max} , cujo cálculo foi feito a partir da ferramenta computacional *CompPlex Janus*, usando uma janela de varredura de 7 x 7 pixels [11]. Relacionada ao conceito de entropia informacional de Shannon [11,13], a medida H_e/H_{max} considera a complexidade como uma função direta da desordem do sistema. Desta forma, baixos valores estão associados a padrões ordenados e altos valores representam padrões desordenados, os quais estão associados à variabilidade e representatividade de diferentes níveis de cinza (quantização radiométrica) dos pixels presentes em uma imagem ou região de interesse [11].

Para o cálculo dessa medida, inicialmente verifica-se o valor de entropia máxima (H_{max}) considerando como sendo equiprováveis todos os valores dos números digitais (DNs) presentes em uma região de interesse (os quais correspondem à extensão do sistema N):

$$H_{max} = \log_2 N \quad (1)$$

Dividindo o número de pixels que apresenta um determinado valor de DN pelo total de DNs presentes na região de interesse (ROI), obtêm-se a probabilidade P do i^{th} valor de DN em cada ROI. Assim, a entropia de Boltzmann-Gibbs-Shannon (H_e) é dado por:

$$H_e = \sum_{DN \in N} P_{(DN)} \log_2 P_{(DN)} \quad (2)$$

A medida de variabilidade (V) é obtida dividindo a entropia informacional (H_e) pela entropia máxima (H_{max}):

$$V = H_e / H_{max} \quad (3)$$

Considerando as premissas supradescritas, essa medida de entropia informacional é capaz de identificar áreas de maior/menor complexidade, traduzidas da relação de maior ou menor presença de elementos em suspensão na água, os quais são registrados pelo algoritmo como maior ou menor

quantidade de informação na janela de varredura (equações 1-3), resultando num intervalo de valores que podem ser relacionados aos níveis de transparência na água do reservatório.

A validação da classificação He/Max foi feita a partir de dados da água coletadas em campo em 05/07/2018, por meio da técnica de amostragem estratificada [4]. Também foi utilizado como referência comparativa o mapeamento de transparência da água obtido por método empírico [3] e disponível no aplicativo AgroTag_Aqua, como parte dos resultados do projeto BRS_Aqua (Agrotag_Aqua – Disponível em: <https://www.agrotag.cnptia.embrapa.br>)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de correlação espacial entre os dados de turbidez coletados no reservatório e os resultados do processamento H_e/H_{max} apresentou um índice de -66%, o que indica uma correlação significativa e inversamente correlacionada entre as duas variáveis. Nesta perspectiva, quanto maior a variabilidade (altos valores de H_e/H_{max}), menores os valores de turbidez no corpo d'água.

A Figura 2 sumariza comparativamente o gradiente de ganho de informação válida sobre o alvo investigado, partindo da imagem original (composição colorida R4G3B2-2.1), NDWI (2.2) e imagem resultado He/Hmax (2.3), pela qual se buscou um refinamento espacial dos dados e eventuais relações com os gradientes de turbidez. 3

A partir do resultado da medida H_e/H_{max} (2.3), é possível associar altos valores dos pixels (próximos ou iguais a 1) com padrões mais desordenados, associados à alta heterogeneidade (representadas por materiais com diferentes respostas espectrais), expressos nos pixels verdes, os quais representam maior variabilidade e, portanto, menor transparência. Este comportamento pode indicar a presença de outros elementos que não somente água, por exemplo, sedimentos em suspensão ou bancos de areia, como evidenciado em duas pequenas ilhas na figura 2.8 (setas indicativas). Em relação oposta, têm-se pixels em tons de vermelho (próximos ou iguais a 0), representando áreas com menor heterogeneidade, que podem estar relacionadas a maior transparência) (figura 2.3), áreas essas com comportamento análogo aos padrões de transparência verificados nas imagens referência (figura 2.1; 2.2; 2.4).

Destaca-se que na confluência dos dois principais cursos d'água (rio Grande e rio Paranaíba) as características delineadas acima ainda persistem no início desse encontro, com a porção a oeste com maior transparência/ menor turbidez (figura 2.4), e a porção a leste com menor transparência/ maior turbidez (figura 2.4). Características essas mais destacadas nas imagens H_e/H_{max} (figura 2.3, 2.7 e 2.8), nas quais a área a oeste apresenta baixos valores (menor variabilidade/ maior transparência/ menor turbidez), enquanto área a leste apresenta predomínio de valores altos e intermediários de H_e/H_{max} (maior variabilidade/ menor transparência/ maior turbidez), com destaque para região central (figura 2.2; 2.3 e 2.4) com valores intermediários, ou

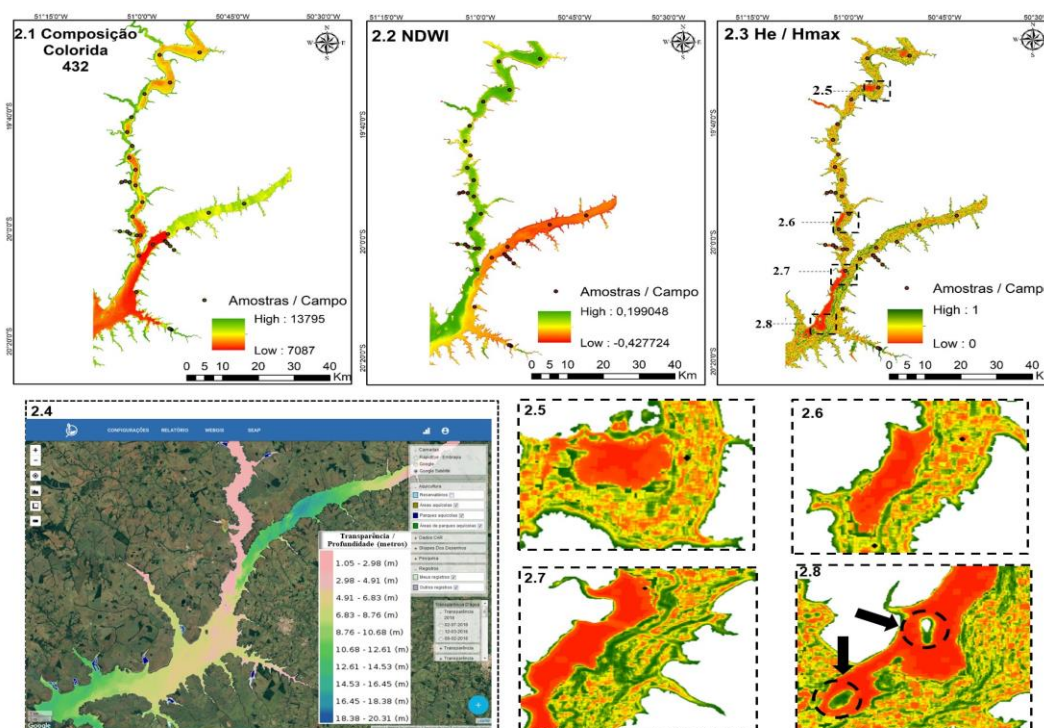


Figura 2. Composição Colorida OLI (Landsat 8) 432 (2.1), NDWI (2.2), Resultado H_e/H_{max} (2.3), Mapeamento de Transparência Agrotag_Aqua (2.4), Destques para áreas de interesse no mapeamento H_e/H_{max} (2.5..2.6.2.7 e 2.8)

seja, mistura de água e sedimentos típica para essa área do rio, apresentando a predominância de uma faixa de pixels verdes.

Verifica-se também ao longo das margens e curvas, consonância com o comportamento típico da água no rio, através do evidenciamento de zonas de reposição (áreas em verde), com variação de composição/quantidade de material (áreas em tons de vermelho/laranja) (Figuras. 2.5-2.8).

5. CONCLUSÕES

A medida de variabilidade baseada na entropia informacional H_e/H_{max} aplicada sobre imagem OLI (Landsat 8) permitiu estimar de forma eficiente a transparência da água em uma área do reservatório de Ilha Solteira, indicando a eficiência do algoritmo proposto. De modo geral, o ganho em usar a H_e/H_{max} em relação ao NDWI, trata-se de fornecer uma medida mais exata sobre o alvo, considerando a variação de materiais (heterogeneidade) vs. transparência, ou seja, o mapeamento de áreas heterogêneas, enquanto métodos tradicionais (e.g. NDWI) indicam áreas homogêneas. Assim, a medida H_e/H_{max} pode auxiliar na explicação das causas da variação de transparência e sua localização. Algo somente possível através de métodos semi-quantitativos mais complexos [3]. Entretanto, o referido algoritmo não se propõe, em sua forma atual, a substituir métodos de classificação mais complexos (e.g. empírico, analítico), mas dado sua simplicidade de uso, apresenta avanços substanciais no bem vindo possível aumento da frequência de mapeamentos em larga escala.

Por fim, é possível concluir que as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas por meio de algoritmos de complexidade comprovaram-se como uma possível importante contribuição auxiliar do sensoriamento remoto para monitoramento da qualidade da água no Brasil.

8. REFERÊNCIAS

[1] L. Sidonio, I. Cavalcanti, L. Capanema, R. Morch, G. Magalhães, J. Lima, V. Burns, A.J. Alves, I. Cavalcanti and Burns, Biblioteca Digital Panorama da Aquicultura no Brasil: Desafios e Oportunidades Panorama da Aquicultura no Brasil: Desafios e Oportunidades Luiza Sidonio. *Agroindústria* **2012**.

[2] Evoy Zaniboni-Filho, Janaína dos Santos Pedron, and J.R. Thematic Section: Reservoirs Ecology Opportunities and Challenges for Fish Culture in Brazilian Reservoirs: A Review Oportunidades e Desafios Para a Aquicultura Em Reservatórios Brasileiros: Uma Revisão. *Acta Limnol. Bras.* **2018**, *30*, 21.

[3] Gomes, A.C.C.; Pentean, R.; Portinho, J.L.; Vicente, L.E.; Spinelli-Araujo, L.; Manzatto, C.; Gomes, D.; Alcântara, E. Short-Term Retrieval of Water Transparency from a Caged-Fish Farm Using Landsat-8/OLI Images. *An. do XIX Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto* **2019**, 1100–1103.

[4] Portinho, J.L.; Gomes, A.C.C.; Koga-Vicente, A.; Milani, F.C.C.; Pentean, R.B.; Manzatto, C.V.; Spinelli-Araujo, L.; Vicente, L.E. The Pathways Influence of Agricultural Expansion on Water

Quality of Fish Farming in Ilha Solteira Reservoir, São Paulo, Brazil. *Aquaculture* **2021**, *536*, 736405, doi:10.1016/j.aquaculture.2021.736405.

[5] Contador, T.M.; Alcântara, E.; Rodrigues, T.; Park, E. Remote Sensing of Water Transparency Variability in the Ibitinga Reservoir during COVID-19 Lockdown. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* **2021**, *22*, doi:10.1016/j.rsase.2021.100511.

[6] Martínez-Santos, P.; Aristizábal, H.; Díaz-Alcaide, P.M.-S.F.A.D.-A. V.; Gómez-Escalonilla Predictive Mapping of Aquatic Ecosystems by Means of Support Vector Machines and Random Forests. *J. Hydrol.* **2021**, *595*, 15.

[7] Borges, R. de O.; Camargo, F.F.; Campagnoli, F.; Bayer, M. Aplicação Do Índice Da Diferença Normalizada Da Água (NDWI) Na Delimitação de Fluxos de Sedimentos Em Suspensão No Rio Araguaia: Avaliação Das Imagens Landsat 8 Para o Monitoramento Hidroviário. *An. XVII Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto* **2015**, 6022–6029.

[8] Jensen, J.R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*; 2nd ed.; Pearson Education India, 2009;

[9] Hadian, M.; Mosaedi, A. Application of Remote Sensing Technology in Sediment Estimating Entering the Dam Reservoirs Due to Floods. *Shock Vib.* **2021**, *2021*, doi:10.1155/2021/4469744.

[10] Alcântara, E.; Curtarelli, M.; Ogashawara, I.; Kampel, M.; Stech, J. DEVELOPING QAA-BASED RETRIEVAL MODEL OF TOTAL SUSPENDED MATTER CONCENTRATION IN ITUMBIARA RESERVOIR, BRAZIL In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 2015; pp. 711–714.

[11] De Mattos, S.H.V.L.; Vicente, L.E.; Vicente, A.K.; Bielenki, C.; Piqueira, J.R.C. Metrics Based on Information Entropy Applied to Evaluate Complexity of Landscape Patterns. *PLoS One* **2022**, *17*, 1–23, doi:10.1371/journal.pone.0262680.

[12] MapBiomas Coleção 4 Da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo Do Brasil, Available online: <https://mapbiomas.org/> (acesso em 22 de Agosto de 2022).

[13] Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J. Vol.* **1948**, *37*, 212–214.

9. AGRADECIMENTOS

Ao BNDES e CNPq pelo apoio financeiro via projeto BRS_Aqua (Projeto CNPq N. 421502/2017-7). Ao CNPq pela concessão de bolsa DTI (Processo 80656/2022-1). Às comunidades de piscicultores do reservatório de Ilha Solteira pela recepção e apoio logístico das equipes de campo.