

ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DA CLOROFILA-*a* NO RESERVATÓRIO DE IBITINGA/SP – RESULTADOS PRELIMINARES

Carolline Tressmann Cairo ¹, Daniel Andrade Maciel ¹, Rogério Flores Júnior ¹, Felipe Menino Carlos ¹, Claudio Clemente Faria Barbosa ¹, Felipe de Lucia Lobo ¹, Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo ¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010; carolline.cairo@inpe.br; damaciel_maciel@hotmail.com; rogerio.floresjr@gmail.com; felipe.carlos@fatec.sp.gov.br; claudio.barbosa@inpe.br; felipellobo@gmail.com; evlyn.novo@inpe.br

RESUMO

Alguns estudos têm mostrado que os modelos empíricos usados para estimar a concentração da chl-*a* por sensoriamento remoto em sistemas aquáticos possuem melhor desempenho quando calibrados para faixas específicas de concentração. Com o objetivo de identificar que modelos empíricos possuem melhor desempenho em intervalos específicos de concentração de chl-*a* no reservatório de Ibitinga/SP, usou-se 3 métodos para determinar as faixas específicas de concentração e simulou os dados *in-situ* para o sensor MSI do Sentinel-2A, os quais foram utilizados para calibrar e validar os modelos selecionados em cada faixa, usando a simulação Monte Carlo. A análise dos resultados mostrou que o método 1 é o mais indicado para estabelecer os limiares de concentrações de chl-*a*, e que os modelos [12], [13] e B6/B3 são os de melhor desempenho para as faixas de concentração desse método.

Palavras-chave — Clorofila-*a*, Reservatório Tropical, Sentinel-2A.

ABSTRACT

*Some studies have shown that the empirical models used to estimate chl-*a* concentration by remote sensing in aquatic systems have better performance when calibrated for specific concentration ranges. In order to identify which empirical models perform better at specific intervals of chl-*a* concentration in Ibitinga/SP reservoir, three methods were used to determine the specific concentration ranges and in-situ data were simulated for MSI sensor of Sentinel-2A, which were used to calibrate and validate the selected models in each range, using the Monte Carlo simulation. Analysis of the results showed that method 1 is best suited to establish chl-*a* concentration thresholds and that the models [12], [13] and B6/B3 have the best performance for the concentration ranges of this method.*

Key words — Chlorophyll-*a*, Tropical Reservoir, Sentinel-2A.

1. INTRODUÇÃO

A estimativa da concentração da clorofila-*a* (chl-*a*) por sensoriamento remoto é objeto de vários estudos voltados à avaliação da integridade dos ecossistemas aquáticos. Dos parâmetros derivados por sensoriamento remoto, a concentração da chl-*a* é a mais utilizada como indicador da qualidade da água, principalmente por ser aplicado na determinação do estado trófico das águas [1].

Alguns estudos [2 - 4] vêm mostrando que os modelos empíricos utilizados para estimar a concentração da chl-*a* por sensoriamento remoto em sistemas aquáticos possuem melhor desempenho quando calibrados para faixas específicas de concentração. Esses resultados dão suporte teórico para o desenvolvimento de uma abordagem operacionalmente definida como híbrida. A abordagem híbrida combina algoritmos específicos para diferentes intervalos de valores da variável em estudo, tendo, por exemplo, um algoritmo para representar cada conjunto de comportamento espectral proveniente da variação da concentração da chl-*a* na água. O uso dessa abordagem seria mais adequado para estimar a concentração da chl-*a* em reservatórios tropicais, uma vez que o estado trófico varia amplamente no espaço e no tempo, num mesmo sistema aquático e entre sistemas aquáticos distintos, em função de forçantes climáticas, hidrológicas, hidrodinâmicas e antropogênicas.

O objetivo do presente estudo é identificar quais modelos empíricos descritos na literatura possuem melhor desempenho em intervalos específicos de concentração de chl-*a* no reservatório de Ibitinga/SP, usando dados simulados para o sensor Sentinel-2A/MSI a partir da R_{rs} *in-situ*. Tal análise dará suporte ao desenvolvimento de um modelo híbrido para a região de estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O reservatório hidroelétrico de Ibitinga (Figura 1), que está localizado no médio Tietê, região central do estado de São Paulo, foi selecionado como suporte ao projeto temático FAPESP 08/56252-0 “*Environmental and Socioeconomic Impacts Associated with the Production and Conception of Sugar Cane Ethanol in South Central Brazil*” (BIOEN). Esse reservatório faz parte do conjunto de reservatórios em cascata construído ao longo do rio Tietê, que funcionam

como sistemas de regulação, sendo que grande parte da dinâmica óptica, limnológica, hidráulica e trófica do sistema aquático é influenciada pelo funcionamento da barragem.

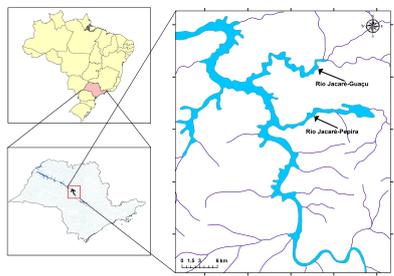


Figura 1. Localização do Reservatório de Ibitinga.

2.2. Conjunto de dados

Para o presente estudo foram utilizadas 8 campanhas de campo: 1 realizada por [5] em outubro/2005 (51 estações amostrais, chl-*a*: 6,14–76.804,84 mg/m³), 6 realizadas por [6] em 2013/2014 (novembro/2013 – 10 estações amostrais; fevereiro, março, maio, julho e setembro/2014 – 4 estações amostrais em cada campanha; chl-*a*: 3,01–258,83 mg/m³) e 1 realizada em agosto/2018 (8 estações amostrais, chl-*a*: 14,96–59,19 mg/m³). Vale ressaltar que em todas essas campanhas foram obtidos dados limnológicos, físico-químicos e radiométricos, sendo os dados radiométricos coletados por equipamentos e metodologias diferentes. [5] coletou os dados radiométricos usando ASD FieldSpec Hand Held, já nos campos de [6] e no campo de 2018 utilizou o radiômetro TriOs. Do conjunto total de dados coletados, foram usados apenas os valores de concentração de chl-*a* [7] e os dados radiométricos (cálculo da Reflectância de Sensoriamento Remoto – R_{rs} [8]) para a calibração e validação dos modelos empíricos testados. Como os dados radiométricos foram coletados por equipamentos e metodologias distintas, a R_{rs} calculada foi corrigida por metodologias diferentes. Para a R_{rs} obtida pelos dados da [5] usou a metodologia de [9], já a R_{rs} obtida pelos dados do TriOs usou a metodologia de [10]. Por fim, os dados corrigidos da R_{rs} *in-situ* foram simulados para o sensor MSI do Sentinel-2A.

2.3. Modelos empíricos de clorofila-*a*

Os modelos empíricos testados foram: razões simples de 2 bandas (B4/B3; B5/B3; B5/B4; B6/B3; B6/B4; [11]), razão de 3 bandas [12], NDCI e derivações [13], Slope e derivações [14], e MCI [15]. As derivações são referentes às variações de razão de bandas aplicadas, o NDCI foi testado usando os conjuntos de bandas “B5 e B4”, “B6 e B4” e “B4 e B3” e o Slope usando os conjuntos “B5 e B4” e “B6 e B4”. Esses modelos foram selecionados por apresentarem bom desempenho em outros sistemas aquáticos do caso 2, sendo que alguns deles já foram testados em modelos

híbridos [3, 4]. Vale ressaltar também que esses modelos foram testados em sua forma original, sem qualquer reparametrização dos coeficientes.

2.4. Faixas de concentração de clorofila-*a* testadas

Foram testados 3 métodos para particionar o conjunto de valores de concentração de clorofila-*a* em faixas específicas de concentração. O método 1 foi baseado nos intervalos de concentração do Índice de Estado Trófico (IET), sendo: a) FX1_1: Oligotrófico + Mesotrófico (Chl-*a* ≤ 11,03 mg/m³); b) FX1_2: Eutrófico + Supereutrófico (11,03 < Chl-*a* ≤ 69,05 mg/m³); e c) FX1_3: Hipereutrófico (Chl-*a* > 69,05 mg/m³). O método 2 foi baseado na semelhança dos espectros de campo, sendo: a) FX2_1: Chl-*a* ≤ 22,83 mg/m³; b) FX2_2: (22,83 < Chl-*a* ≤ 117,63 mg/m³); c) FX2_3: 117,63 < Chl-*a* ≤ 258,83 mg/m³; e d) FX2_4: Chl-*a* > 258,83 mg/m³. O método 3 foi baseado na junção das faixas “FX2_1 + FX2_2” e “FX2_3 + FX2_4” do método 2, sendo: a) FX3_1: Chl-*a* ≤ 117,63 mg/m³; e b) FX3_2: Chl-*a* > 117,63 mg/m³. Vale ressaltar que para os modelos de melhor desempenho em cada faixa foi aplicado intervalos de concentrações de chl-*a* mais amplos, como valores até 600 mg/m³ e até 1000 mg/m³. Essa etapa teve como objetivo comparar o desempenho dos modelos em faixas mais amplas e em faixas mais específicas.

2.5. Calibração/validação dos modelos

Para o processo de calibração/validação dos modelos empíricos foi utilizado a simulação Monte Carlo com 10000 iterações. De todo o conjunto de dados, 70% foi usado para calibração e 30% para validação. A cada iteração foram calculados os valores do Erro Médio Absoluto em Percentagem (MAPE), coeficiente de determinação (R^2) e Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE). A calibração dos modelos foi baseada no valor da moda do MAPE e foram testados ajustes lineares, polinomiais e exponenciais; e para a validação usou as ferramentas estatísticas citadas acima. Os modelos da estimativa da concentração da chl-*a* com o menor MAPE e RMSE e maior R^2 foram selecionados como os de melhor desempenho, para cada faixa de concentração testada.

2.6. Imagem Sentinel-2A

A imagem do Sentinel-2A de 13 de agosto de 2018 foi corrigida atmosféricamente utilizando o 6S [16]. Aplicou-se na imagem corrigida os modelos de melhor desempenho que abrangiam a faixa de concentração de chl-*a* do campo de agosto/2018 e comparou os resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados dos modelos de melhor desempenho para cada faixa de concentração de chl-*a*

amostrada no reservatório de Ibitinga. É possível notar que a faixa FX2_3 do método 2 não teve nenhum modelo de bom desempenho, o que torna este método não adequado para uso. Uma alternativa seria subdividir o método 2 de forma menos restritiva, tendo, por exemplo, 3 faixas de concentração. Comparando o método 1 com o 3, percebe-se que o método 1 possui modelos de melhor desempenho que o 3, principalmente considerando os valores mais baixos de RMSE.

No método 1 o modelo [12] teve bom desempenho na faixa FX1_1, pois os espectros de R_{rs} que abrangem esse intervalo de concentração possuem um comportamento semelhante aos espectros de reflectância extraídos do *Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean* (HICO) por [12] para uma faixa de concentração de 19,67–93,14 mg/m³ na Baía de Taranrog e no mar Azov (Rússia). [12] não conseguiu afirmar se o modelo é válido para concentrações inferiores a 40 mg/m³, por conta da baixa amostragem nessas concentrações, mas o presente estudo mostrou que o modelo tem sim bom desempenho para concentrações inferiores a 12 mg/m³. O modelo NDCI [13] teve bom desempenho na faixa FX1_2, embora [13] tenham usado para uma faixa de concentração com valores menores (0,9–28,1 mg/m³). [17] testaram o modelo [13] para o reservatório de Barra Bonita/SP, que faz parte do sistema em cascata do rio Tietê, usando o sensor MSI/Sentinel-2A em uma faixa de concentração de chl-a 17,7–797,8 mg/m³. Analisando os espectros de campo, nota-se que o formato da R_{rs} do presente estudo se encaixa dentre os espectros usados por [17] para calibração/validação do modelo. Comparando os resultados, o modelo teve melhor desempenho para faixas mais específicas de concentração que para a faixa ampla de concentração testada por [17] ([13]: MAPE 57,41%; R² 0,82 e RMSE 69,24 mg/m³). O modelo B6/B3 teve melhor desempenho para a faixa FX1_3, pois em elevadas concentrações os espectros de R_{rs} começam a ter mais sinal no comprimento de onda 740 nm (banda 6 Sentinel-2A) que em menores concentrações. Isso ocorre devido a maior influência do espalhamento das células fitoplânctônicas (blooms mais densos na superfície da água) e consequente redução da influência da absorção pela água nos maiores comprimentos de onda.

Os modelos presentes na Tabela 1 foram testados para concentrações mais amplas de chl-a, com até 600 e 1000 mg/m³. Os resultados mostram que tais modelos perdem desempenho quando aplicados para faixas de concentrações mais amplas, tendo estatísticas (mínimo, máximo) que variam: concentração até 600 mg/m³ possui MAPE 68,75–380,32%; R² 0,39–0,96; RMSE 50,47–256,51 mg/m³; concentração até 1000 mg/m³ possui MAPE 57,90–436,51%; R² 0,29–0,95; RMSE 90,97–184,45 mg/m³. Isso indica que os modelos podem ter melhor desempenho quando descrevem um conjunto de dados com comportamento espectral semelhante, o que reforça a importância do uso da abordagem híbrida na estimativa da concentração da chl-a por sensoriamento remoto.

Tabela 1. Resultados dos modelos empíricos testados para cada faixa de concentração de chl-a (mg/m³), nos 3 métodos. Lin: Linear, Pol: Polinomial, Exp: Exponencial, N: número amostras de validação. MAPE: %, RMSE: mg/m³.

Método 1						
	Modelo	Ajuste	N	MAPE	R ²	RMSE
FX1_1 (Chl-a ≤ 11.03)	[12]	Exp	4	25.17	0.92	1.12
FX1_2 (11.03 < Chl-a ≤ 69.05)	[13]	Exp	11	28.71	0.78	8.90
FX1_3 (69.05 < Chl-a ≤ 600)	B6/B3	Pol	6	22.17	0.98	26.39
Método 2						
	Modelo	Ajuste	N	MAPE	R ²	RMSE
FX2_1 (Chl-a ≤ 22.83)	[11]	Pol	9	37.71	0.90	3.32
FX2_2 (22.83 < Chl-a ≤ 117.63)	[12]	Exp	8	20.21	0.84	12.50
FX2_3 (117.63 < Chl-a ≤ 258.83)	nenhum modelo		3			
FX2_4 (258.83 < Chl-a ≤ 1000)	[13], B6/B4	Exp	3	20.00	0.87	92.84
Método 3						
	Modelo	Ajuste	N	MAPE	R ²	RMSE
FX3_1 (Chl-a ≤ 117.63)	B5/B4	Lin	16	35.98	0.96	11.97
FX3_2 (117.63 < Chl-a ≤ 1000)	[14], B6/B4	Pol	6	25.55	0.92	52.94
FX3_2 (117.63 < Chl-a ≤ 600)	B5/B3	Exp	5	20.47	0.98	70.60

A Figura 2 mostra o resultado dos modelos NDCI [13] (faixa FX1_2) e B5/B4 (faixa FX3_1) aplicados na imagem corrigida do sensor MSI/Sentinel-2A. Apenas estas faixas foram consideradas, pois abrangem totalmente a faixa de concentração de chl-a obtida em campo (14,96–59,19 mg/m³). Vale ressaltar que na imagem não foi considerada a correção do glint, pois quando aplicada provocou degradação do desempenho do modelo (glint subtração banda 11: R² 0,61; MAPE 83,31% / glint subtração banda 12: R² 0,68; MAPE 58,06%) em relação a imagem sem a correção do glint (R² 0,86; MAPE 41,12%).

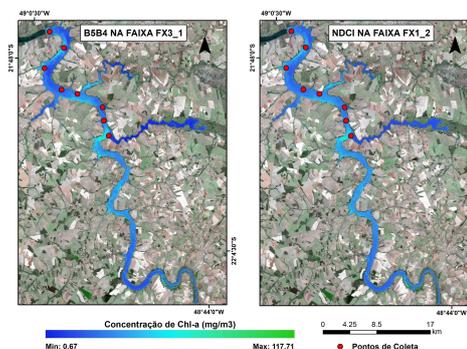


Figura 2. Modelos B5/B4 da faixa FX3_1 e NDCI da faixa FX1_2 aplicados na imagem corrigida do Sentinel-2A, e a localização das estações amostrais do campo de agosto/2018.

Comparando-se os resultados dos modelos aplicados na imagem com os dados *in-situ*, obteve-se para o NDCI um R² 0,62 e MAPE 37,74% e para B5/B4 um R² 0,62 e MAPE 37,74%. Embora o modelo tenha perdido desempenho quando aplicado na imagem, pode-se dizer que o desempenho ainda é satisfatório, considerando que nem todas as estações amostrais foram coletadas no dia da passagem do satélite e que os dados *in-situ* são coletados ao longo de 4 horas, das 10hr às 14hr (condições ambientais

diferentes para cada estação), enquanto a imagem é obtida quase instantaneamente em um horário exato no dia da passagem. A Figura 3 mostra o *scatterplot* entre a chl-a obtida *in-situ* e a chl-a estimada por sensoriamento remoto. É possível notar que ambos modelos, em sua maioria, subestimam a chl-a em concentrações mais baixas e superestimam em concentrações mais elevadas. Percebe-se que para valores mais baixos de concentração o modelo NDCI da FX1_2 superestima mais que o modelo B5/B4 da FX3_1, enquanto que para valores mais elevados o modelo B5/B4 subestima mais que o NDCI.

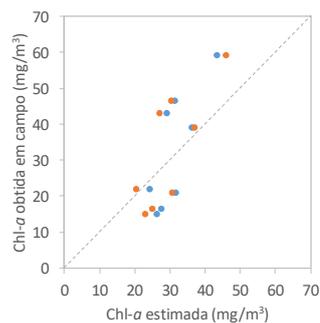


Figura 3. Chl-a *in-situ* versus chl-a estimada pelo modelo B5/B4 da faixa “FX3_1” (laranja) e modelo NDCI da faixa “FX1_2” (azul).

4. CONCLUSÕES

A partir desse estudo foi possível concluir que o método 1 é o mais indicado para estabelecer os limiares de concentração da abordagem híbrida. De todos os modelos testados para as faixas deste método, os modelos [12], [13] e B6/B3 foram selecionados para águas pouco (FX1_1), moderada (FX1_2) e muito (FX1_3) eutrofizadas, respectivamente. Além disso, o estudo mostrou que o desempenho dos modelos em faixas específicas de concentração foi superior em comparação quando aplicados em faixas mais amplas. Os resultados sugerem que a abordagem híbrida pode ter potencial para ser usada como ferramenta no monitoramento de chl-a em águas com condições tróficas variáveis, no tempo e no espaço.

5. AGRADECIMENTOS

Carolline Tressmann Cairo agradece à CAPES pela bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro ao campo de agosto de 2018; ao BIOEN pelo suporte de campo; ao projeto FAPESP que bancou a tese da Luciana Londe; e à Dra Luciana Londe por disponibilizar os dados.

6. REFERÊNCIAS

[1] Matthews, M. W. Bio-optical modeling of phytoplankton chlorophyll-a. In: Mishra, D. R.; Ogashawara, I.; Gitelson, A. A. (eds). Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters, Elsevier, p. 157-188, 2017.

- [2] Odermatt, D.; Gitelson, A.; Brando, V.E. e Schaepman, M. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 118, pp. 116–126, 2012.
- [3] Matsushita, B. M.; Yang, W.; Yu, G.; Oyama, Y.; Yoshimura, K. e Fukushima, T. A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-a concentration across different trophic states in Asian inland waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 102, pp. 28-37, 2015.
- [4] Smith, M. E.; Robertson Lain, L. e Bernard S. An optimized Chlorophyll-a switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 215, pp. 217-227, 2018.
- [5] Londe, L. R. Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado - Ibitinga/SP. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, pp. 223, 2008.
- [6] Cairo, C. T. Caracterização temporal das propriedades bio-óticas do reservatório de Ibitinga/SP. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, pp. 147, 2015.
- [7] Nush, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol.*, p. 14-39, 1980.
- [8] Kirk, J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3 ed., Cambridge University Press, England, pp. 528, 2011.
- [9] Kutser, T.; Vahtmäe, E.; Paavel, B. e Kauer, T. Removing glint effects from field radiometry data measured in optically complex coastal and inland Waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 133, pp. 85-89, 2013.
- [10] Mobley, C. D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces. *Applied Optics*, v. 54, n. 15, pp. 4828-4849, 2015.
- [11] Gilerson, A.; Gitelson, A.; Zhou, J.; Gulrin, D.; Moses, W.; Ioannou, I. e Ahmed, S. Algorithms for remote sensing of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Opt. Express*, v. 18, n. 23, pp. 24109–24125, 2010.
- [12] Gitelson, A.; Gao, B. C.; Li, R. R.; Berdnikov, S. e Saprygin, V. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: The Azov Sea case study. *Environmental Research Letters*, v. 6, pp. 1-6, 2011.
- [13] Mishra, S. e Mishra, D. R. Normalized Difference Chlorophyll Index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 117, pp. 394-406, 2012.
- [14] Mishra, D.R. e Mishra, S. Plume and bloom: effect of the Mississippi River diversion on the water quality of Lake Pontchartrain. *Geocarto Int.*, v. 25, n. 7, pp. 555-568, 2010.
- [15] Gower, J.; King, S.; Borstad, G.; Brown, L., et al. Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer. *Int. J. Remote Sens.*, v. 26, n. 9, pp. 2005-2012, 2005.
- [16] Vermote, E. F.; Tanre, D.; Deuze, J. L.; Herman, M.; Morcrette, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens.*, v. 35, pp. 675- 686, 1997.
- [17] Watanabe, F.S.Y.; Alcântara, E.; Rodrigues, T.; Rotta, L.; Bernardo, N.; Imai, N. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir - Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, pp. 1-14, 2017.