

ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A EM UM COMPLEXO ESTUARINO-LAGUNAR UTILIZANDO ANÁLISE DERIVATIVA DE CURVAS HIPERESPECTRAIS

Regina Camara Lins^{1,a}, David M. L. da Motta Marques^{1,b}, Carlos Ruberto Fragoso Júnior^{2,a},
Letícia da Silva Santos^{2,b}, Amesson Marques da Costa^{2,c}, Heloisa Vital Domingos^{2,d}, Rafael dos Santos
Matias^{1,e}

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), Caixa Postal 91501-970, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, reginacamaralins@hotmail.com^a, dmm@iph.ufrgs.br^b

² Universidade Federal de Alagoas, Campus A. C. Simões. Av. Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió, Alagoas, Cep: 57072-970, ruberto@ctec.ufal.br^a; leticia_santos.ufal@hotmail.com^b; amesson.costa@igdema.ufal.br^c; domingos.heloisa@gmail.com^d; rsmatias3@gmail.com^e

RESUMO

A clorofila-a constitui um importante indicador de estado trófico em ambientes aquáticos, sendo, portanto, uma variável de qualidade de água cujo monitoramento torna-se fundamental. A utilização de sensores espectrais e modelagem bio-óptica para o monitoramento da clorofila-a em ambientes continentais, de transição e costeiros vem se desenvolvendo bastante nas últimas duas décadas. Cada ambiente possui propriedades ópticas particulares que necessitam da construção de modelos locais específicos. Desta forma, este trabalho avaliou o desempenho de modelos bio-ópticos empíricos obtidos por análise derivativa em um ambiente estuarino-lagunar turvo e produtivo. Os resultados indicaram modelos bastante promissores ($r^2 = 0,78$) para a estimativa de clorofila-a na área de estudo. Além disto, observou-se a maior estabilidade destes modelos em comparação aos modelos *NIR-Red* de duas e três bandas.

Palavras-chave — modelos bio-ópticos, qualidade de água, estuários.

ABSTRACT

Chlorophyll-a is an important indicator of trophic state in aquatic environments, being therefore a variable of water quality whose monitoring becomes fundamental. The use of spectral sensors and bio-optical modeling for the monitoring of chlorophyll-a in continental, transition and coastal waters has been developing considerably in the last two decades. Each environment has particular optical properties that require the construction of specific local models. Thus, this work evaluated the performance of empirical bio-optical models obtained by derivative analysis in a turbid and productive estuarine-lagoon system. The results indicated promising models ($r^2 = 0.78$) for the estimation of chlorophyll-a in the study area. In addition,

we observed the higher stability of these models compared to the NIR-Red two- and three-bands models.

Key words — *bio-optical models, water quality, estuaries.*

1. INTRODUÇÃO

Um monitoramento adequado de clorofila-a em ambientes estuarinos depende da aquisição de informações com elevada frequência temporal e abrangência espacial. Por se tratar de um pigmento opticamente ativo, presente no fitoplâncton, este monitoramento pode ser realizado através da análise da resposta espectral da superfície da água captada por sensores espectrais portáteis, aerotransportados ou a bordo de satélites [1].

Como não existe, até o momento, um modelo universal capaz de estimar satisfatoriamente a concentração de clorofila-a a partir da resposta espectral da superfície da água em ambientes de transição (zona costeira, estuarina) e águas interiores (lagos, rios, reservatórios, etc), em virtude das particularidades ópticas de cada um, diversas metodologias vem sendo testadas nestes ambientes nos últimos anos [2, 3].

Dentre as metodologias existentes, a análise derivativa tem apresentado bons resultados em águas turvas e produtivas [4, 5]. Esta técnica busca maximizar a identificação das feições espectrais da curva de absorção da clorofila-a a partir da minimização dos efeitos da reflexão especular da luz do sol, da absorção da água pura e os provocados por sedimentos em suspensão na reflectância.

Portanto, o objetivo deste estudo é testar a eficiência de modelos empíricos baseados em análise derivativa de curvas de reflectância de sensoriamento remoto para extração de informações relacionadas a concentração de clorofila-a em um sistema estuarino-lagunar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e aquisição de dados

O Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) está localizado no litoral de Alagoas, entre as latitudes 9°35'00" S e 9°46'00" S e longitudes 35°34'00" W e 35°58'00" W, e é constituído pelas Lagunas Mundaú (27 km²), Manguaba (42 km²) e os canais que as interligam (12 km²). Neste Complexo, foram realizadas seis campanhas de campo (sendo 3 em cada laguna) a bordo de embarcação entre os meses de Maio a Setembro de 2015. Em cada campanha foram coletadas amostras de água e radiometria em 12 pontos distintos. A Figura 1 apresenta os 72 pontos de amostragem levantados no estudo.

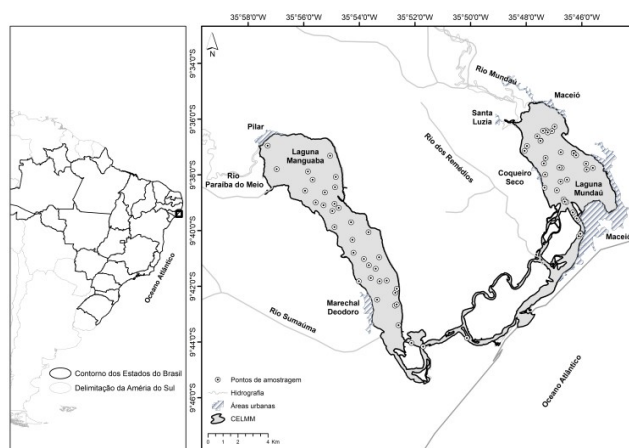


Figura 1. Localização do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) e pontos de amostragem [6].

As medições radiométricas foram realizadas utilizando um conjunto de radiômetros TriOs RAMSES, com resolução espectral de aproximadamente 3,3 nm (faixa espectral operando entre 350-721 nm), seguindo os protocolos recomendados pela NASA [7].

Amostras de água (com volume de 2,0 litros cada) foram coletadas a uma profundidade de 0,2 m da superfície, imediatamente após as medições de radiometria. As amostras foram mantidas no escuro e sob refrigeração para posterior filtragem, utilizando filtros Whatman GF/F (0,45 µm), e análise em laboratório das concentrações de clorofila-a (Chl-a), pelo método tricromático espectrofotométrico [8], e de Sólidos Suspensos Totais (TSS), através da medição gravimétrica após secagem em estufa [8].

2.1. Curvas hiperespectrais de reflectância e suas derivadas

A reflectância de sensoriamento remoto $R_{rs}(\lambda)$ foi calculada pela seguinte equação:

$$R_{rs}(\lambda) = (L_t(\lambda) - \rho \cdot L_s(\lambda)) / E_d(\lambda) \quad (1)$$

onde, R_{rs} : reflectância de sensoriamento remoto (sr⁻¹); L_t : radiância total acima da superfície da água (W.m⁻².sr⁻¹); L_s : radiância proveniente do céu (W.m⁻².sr⁻¹); E_d : Irradiância descendente na coluna d' água (W.m⁻²); ρ : Fator de correção (0,028).

Sabe-se que a análise derivativa é muito sensível a ruídos nas curvas de R_{rs} [4], portanto o método kernel de regressão foi utilizado como um pré-tratamento destas curvas a fim de minimizar os efeitos negativos dos ruídos.

Após o pré-tratamento das curvas de R_{rs} , o cálculo da primeira e segunda derivada de cada curva foi realizado de acordo com as equações abaixo:

$$R_{rs}'(\lambda_i) = (R_{rs}(\lambda_{i+1}) - R_{rs}(\lambda_i)) / (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (2)$$

$$R_{rs}''(\lambda_i) = (R_{rs}'(\lambda_{i+1}) - R_{rs}'(\lambda_i)) / (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (3)$$

onde, λ_{i+1} e λ_i são comprimentos de onda adjacentes, e $R_{rs}(\lambda_i)$, $R_{rs}'(\lambda_i)$ e $R_{rs}''(\lambda_i)$ constituem a reflectância de sensoriamento remoto original, a derivada de primeira ordem da R_{rs} original e a derivada de segunda ordem da R_{rs} original no comprimento de onda λ_i , respectivamente.

2.1. Determinação e avaliação dos modelos empíricos derivativos

Baseado em análises de relação entre os dados de concentração de clorofila-a e as derivadas de primeira e segunda ordem das curvas de reflectâncias de sensoriamento remoto, os melhores comprimentos de onda para o ajuste dos modelos empíricos foram selecionados considerando o máximo coeficiente de determinação (r^2) e o mínimo erro médio quadrado (RMSE), nesta ordem.

A fim de avaliar a precisão e estabilidade dos melhores modelos, o conjunto de dados CELMM foi dividido em dois subconjuntos independentes para calibração e validação. Os modelos foram calibrados utilizando dados coletados de 2/3 do número total de estações (N = 48), correspondente às duas primeiras campanhas de campo em cada laguna, e foram validados usando dados coletados de 1/3 das estações (N = 24), o que correspondeu à última campanha de campo realizada em cada laguna.

Os resultados obtidos com os modelos empíricos derivativos foram comparados aos resultados de modelos semi-empíricos *NIR-Red* de duas e três bandas encontrados por Lins e colaboradores [6].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A faixa das concentrações de clorofila-a (Chl-a) e sólidos suspensos totais (SST) foram bem amplas no CELMM, variando entre 0,97 e 117,5 mg/m³ (média de 27,81 mg/m³) para clorofila-a, e entre 9,0 e 61,0 mg/L (média de 27,83 mg/L) para SST, caracterizando o sistema como turvo e produtivo.

Com relação às curvas de reflectância, foi possível identificar feições espectrais semelhantes aos espectros de reflectância previamente estudados para águas turvas produtivas [9, 10], quais sejam: uma ligeira depressão a 440 nm; um pico proeminente em torno de 565 nm; uma depressão proeminente a 670 nm seguido por um pico proeminente próximo a 705 nm [6].

A Figura 2 apresenta os coeficientes de determinação (r^2) entre a clorofila-a e as derivadas de primeira e segunda ordem das R_{rs} dos modelos gerados na faixa de comprimento de onda de 400 a 721 nm. Verifica-se que os melhores ajustes para a primeira e segunda derivadas são encontrados entre 690 e 705 nm, também verificados em estudos anteriores [4, 5, 11]. Além disto, nota-se para a segunda derivada que, mesmo após o pré-tratamento das curvas de reflectância, há uma maior sensibilidade destas curvas aos ruídos, provovendo uma certa instabilidade na precisão dos modelos em comprimentos de onda próximos.

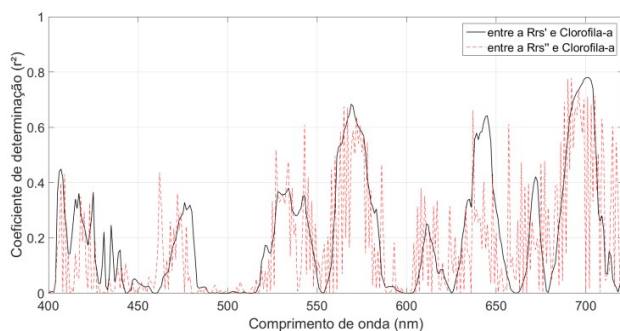


Figura 2. Coeficiente de determinação (r^2) entre a clorofila-a e a primeira (linha contínua) e segunda (linha tracejada) derivada das curvas de reflectância de sensoriamento remoto.

Analisando-se o desempenho dos melhores modelos empíricos obtidos através da análise derivativa (Tabela 1), verifica-se para a primeira derivada que o melhor ajuste aos dados de clorofila-a ocorre no comprimento de onda correspondente a 701 nm ($r^2 = 0,78$; $RMSE = 10,29$). Nesta região de pico, a reflectância original (R_{rs}) pode estar captando tanto os efeitos da fluorescência da clorofila-a quanto a combinação destes com o aumento da absorção da água [12, 13]. Ao utilizar a primeira derivada (R_{rs}'), os efeitos provocados pela água pura são diminuídos [4], o que implica uma melhor percepção da resposta espectral da clorofila-a neste comprimento de onda.

Com relação à segunda derivada (R_{rs}''), estudos anteriores revelam que esta é capaz de amenizar os efeitos provocados pela turbidez na reflectância [4, 5]. Desta forma, observa-se que o melhor ajuste ocorre no comprimento de onda 692 nm ($r^2 = 0,78$; $RMSE = 10,33$), caracterizado por uma região onde ocorre fluorescência da clorofila-a mas que ainda sofre interferência de SST na resposta espectral original (Tabela 1).

Porém, apesar dos dois modelos terem tido resultados muito semelhantes na fase de calibração (cal), no que tange ao r^2 e $RMSE$, verifica-se na validação (val) que o modelo

obtido utilizando a derivada de segunda ordem é um pouco mais preciso e estável (maior r^2 e menor $RMSE$).

Ao se comparar a calibração dos modelos empíricos obtidos através da análise derivativa com os modelos semi-empíricos *NIR-Red* de duas e três bandas, testados para os mesmos dados [6], verifica-se que estes últimos apresentaram maior acurácia (maior r^2 e menor $RMSE$). Entretanto, esta situação se inverte na etapa de validação, onde os modelos obtidos por análise derivativa mostraram-se mais precisos e estáveis, sugerindo que menos bandas em um modelo podem ajudar a aumentar a precisão na validação [4, 9].

Tabela 1. Inclinações (p) e os interceptos (q) da função de melhor ajuste linear entre a clorofila-a observada e a estimada com o correspondente coeficiente de determinação (r^2) e o erro quadrático médio ($RMSE$) obtidos nas etapas de calibração (cal) e validação (val).

Modelos	p	q	r^2	$RMSE$ (mg/m^3)
R'_{701} (cal)	1.28e+06	23,12	0,78	10,29
R'_{701} (val)			0,74	10,78
R''_{692} (cal)	6.58e+06	21,63	0,78	10,33
R''_{692} (val)			0,82	8,86
* R_{721}/R_{660} (cal)			0,84	8,78
* R_{721}/R_{660} (val)	39,52	-12,90	0,66	12,25
* $(R_{690}^{-1}-R_{717}^{-1}) \cdot R_{721}$ (cal)			0,86	8,32
* $(R_{690}^{-1}-R_{717}^{-1}) \cdot R_{721}$ (val)	56,70	27,53	0,73	11,06

* calculados por [6]

4. CONCLUSÕES

Os modelos empíricos obtidos através da análise derivativa das curvas de reflectância de sensoriamento remoto mostraram-se bastante promissores para a estimativa de clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). A menor quantidade de parâmetros associadas a estes modelos, resultou em uma maior estabilidade quando aplicados a outro conjunto de dados, em comparação aos modelos *NIR-Red* de duas e três bandas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pela bolsa PDJ concedida à primeira autora. A concessão das bolsas PIBIC/CNPq aos autores 2,d e 2,e e da bolsa PET/MEC à autora 2,b. Agradecem também ao CNPq (Edital MCTI/CNPq/2013 – Universal) e a FINEP (Edital No. 01.13.0419.0) que possibilitaram a compra dos radiômetros utilizados em campo, através dos referidos editais. Ao IMA/AL pela embarcação concedida para a realização das campanhas de campo realizadas.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Tyler, A.N. et al. “Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters”, *Science of The Total Environment*, 2016.
- [2] Matthews, M.W. “A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters”. *International Journal of Remote Sensing*, volume (32), número (21), páginas (6855-6899), 2011.
- [3] Giardino, C. et al. “Imaging spectrometry of inland and coastal waters: State of the art, achievements and perspectives”, *Surv Geophys*, <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9476-0>, 2018.
- [4] Cheng, C. et al. “Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid lake using spectral smoothing and derivative analysis”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, volume (10), páginas (2979-2994), 2013.
- [5] Shi, H.Y.; Xing, Q.G.; Chen, C.Q.; Shi, P.; Tang, S.L. “Using second-derivative spectrum to estimate chlorophyll-a concentration in turbid estuarine waters”, in Proceedings of SPIE, Wuhan, China, 15–17 November 2007.
- [6] Lins, R.C.; Martinez, Jean-Michel; Motta Marques, D.M.L; Cirilo, J.A.; Fragoso Jr, C.R., “Assessment of chlorophyll-a remote sensing algorithms in a productive tropical estuarine-lagoon system”, *Remote Sensing*, volume (9), número (6), 2017.
- [7] Mueller, J. et al. “Above-Water Radiance and Remote Sensing Reflectance Measurement and Analysis Protocols”, páginas (21-31), 2003.
- [8] American Public Health, A. et al. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005. ISBN 0875530478 9780875530475.
- [9] Gurlin, D.; Gitelson, A. A. e Moses, W. J. “Remote estimation of chl-a concentration in turbid productive waters — return to a simple two-band nir-red model?”, *Remote Sensing of Environment*, volume (115), número (12), páginas (3479-3490), 2011.
- [10] Le, C. et al. “A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China”, *Remote Sensing of Environment*, volume (113), número (6), páginas (1175-1182), 2009.
- [11] Han, L.; Rundquist, D.C.; Liu, L.L.; Fraser, R.N.; Schalles, J.F. “The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment”, *Int. J. Remote Sens*, volume (15), páginas (3707–3718), 1994.
- [12] Gower, J.F.R.; Doerffer, R.; Borstad, G.A. “Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS”, *Int. J. Remote Sens*, volume (20), páginas (1771–1786), 1999.
- [13] Gitelson, A.A. “The peak near 700 nm on reflectance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration”, *Int. J. Remote Sens*, volume (13), páginas (3367–3373), 1992.