

ALGORITMO REGIONAL PARA ESTIMATIVA DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NO BAIXO AMAZONAS

Aline M. Valerio¹, Milton Kampel¹, Vincent Vantrepotte², Nicholas D. Ward³, Henrique O. Sawakuchi⁴,
Diani F.S. Less⁵, Vânia Neu⁶, Alan C. Cunha⁷, Jeffrey E. Richey⁸

¹Divisão de Sensoriamento Remoto, Av. dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos, SP, [aline.valerio, milton.kampel]@inpe.br; ²Laboratoire de océanologie et de géosciences UMR8187 32, Av. Foch 62930, Wimereux, France, vincent.vantrepotte@univ-littoral.fr; ³Marine Science Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, 902 Battelle Blvd, WA, USA, nickdward@gmail.com; ⁴Department of Ecology and Environmental Science, S-901 87 Umea, Sweden, riqueoliveira@yahoo.com.br; ⁵Universidade Federal do Oeste do Para, Av. Mendonça Furtado, Santarém, PA, diani.engambiental@gmail.com; ⁶Universidade Federal Rural da Amazônia, Avenida Presidente Tancredo Neves 2501, Belém, PA, vania.neu@ufra.edu.br; ⁷Departamento do Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP, alancunha@unifap.br; ⁸University of Washington, Seattle, WA 98195, USA, jrichey@uw.edu.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar quais são os intervalos espectrais mais adequados para estimar a concentração do material particulado em suspensão ([MPS]), assim como, testar dois algoritmos regionais para a estimativa da [MPS] na região do Baixo Amazonas. Foram realizadas medidas radiométricas *in situ* e coletadas amostras de água para determinação da [MPS] entre 2014 e 2017. O intervalo espectral entre 655-778 nm demonstrou ser o mais indicado para estimar a [MPS] no Baixo Amazonas ($R^2 > 0,70$, $p < 0,05$). Entre os algoritmos testados, um algoritmo não linear utilizando um único comprimento de onda e com os respectivos coeficientes ajustados para a área de estudo, apresentou o melhor desempenho ($R^2 = 0,81$; RMSE = 15,3 mg L⁻¹).

Palavras-chave — Material particulado em suspensão, Baixo Rio Amazonas, bio-óptica, sensoriamento remoto da cor da água, algoritmo regional.

ABSTRACT

The goal of this study was to assess which spectral intervals are better suitable to estimate the suspended particulate matter concentration ([SPM]) as well as test two regional algorithms to estimate [SPM] at the Lower Amazon. Radiometric in situ measurements and surface water sampling to determine the [SPM] were carried during 2014-2017. The best spectral interval to estimate [SPM] was 655-778 nm when all Lower Amazon samples are considered ($R^2 > 0.70$, $p < 0.05$). Among the tested algorithms, a single wavelength non-linear algorithm with the calibrated coefficients for the study area had the best performance ($R^2 = 0.81$; RMSE = 15.3 mg L⁻¹).

Key words — Suspended particulate matter, Amazon River, bio-optics, water colour remote sensing, regional algorithm.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte do material particulado em suspensão (MPS) da bacia amazônica advém da cordilheira dos Andes, assim como de áreas de várzea e planícies de inundação que armazenam, remobilizam e devolvem MPS aos rios [1]. Uma grande quantidade de MPS disponível na drenagem da bacia amazônica é descarregada no Rio Amazonas e este processo é reconhecido como um dos principais exportadores de sedimento fluvial para o oceano [1]. Os sedimentos transportados e depositados sob o efeito do escoamento das águas pelo rio podem formar bancos de areia e lama e novas ilhas fluviais, alterando o curso do rio ao longo do tempo [2]. Além disso, a construção de hidroelétricas na região amazônica pode alterar a distribuição de MPS fazendo com que estudos sejam necessários para avaliar este impacto.

A complexidade de se amostrar *in situ* o extenso Rio Amazonas e seus tributários evidencia a importância da utilização do sensoriamento remoto como uma ferramenta sinóptica para o estudo de grandes áreas de difícil acesso. Diversos estudos desenvolveram algoritmos regionais para a estimativa da concentração do MPS por sensoriamento remoto em outros rios com alta turbidez, assim como em porções superiores da bacia amazônica [3-6].

Este trabalho tem por objetivo avaliar quais os intervalos espectrais de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) são os mais adequados para estimar o MPS na região do Baixo Amazonas, que compreende além de águas turbidas do Rio Amazonas, águas claras de rios tributários da região. Serão testados e calibrados regionalmente dois algoritmos descritos na literatura [7,8] desenvolvidos para águas turbidas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O Baixo Amazonas compreende a região entre a cidade de Óbidos (01°55,141'S-55°31,543'O), PA, e a cidade de Macapá (00°05,400'S-51°03,200'O), AP. Foram realizadas seis campanhas ao longo deste trajeto de 900 km, durante os

anos de 2014 a 2017. As coletas foram realizadas em águas turbidas do Rio Amazonas, assim como em rios de águas claras como os rios Tapajós, Xingu, Paru e Jari (Figura 1).



Figura 1. Região de estudo no Baixo Amazonas destacando as estações de amostragem *in situ* realizadas entre 2014-2017. O Rio Amazonas possui águas turbidas e os rios tributários Tapajós, Paru, Jari e Xingu possuem águas claras.

Amostras de 150 a 400 mL de água de superfície foram coletadas e filtradas em filtros de acetato de celulose (0,45 µm), armazenados para posterior análise em laboratório. Os filtros foram previamente secos em estufa à 60°C por 72 horas e em seguida pesados (p_1). No laboratório, os filtros com as amostras foram novamente levados à estufa por 72 horas a 50°C e pesados (p_2). A concentração do MPS foi calculada de acordo com a Equação 1 (Van der Linde [9]):

$$\frac{p_1 - p_2}{V} \quad (1)$$

onde p_1 e p_2 são os respectivos pesos do filtro antes e após a filtração e V é o volume de amostra de água do rio filtrada.

Dados radiométricos *in situ* acima da água foram obtidos com uso de um espectrorradiômetro hiperespectral portátil Fieldspec® (ASD Inc). A radiância L ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) foi medida entre 350 e 1100 nm, com resolução de 1nm e campo de visada de 25°. A geometria de aquisição dos dados radiométricos seguiu as recomendações do protocolo da NASA 2003 [10] para evitar sombreamento da água amostrada e a reflexão especular do sol. Foram obtidas 6 a 10 medidas consecutivas da radiância emergente da água (L_a), radiância do céu (L_c) e radiância de uma placa de Spectralon (L_r). Os dados desta placa de referência foram utilizados para calcular a irradiância descendente (E_d , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) (Equação 2).

$$E_d(\lambda) = L_r(\lambda) f_c \pi \quad (2)$$

onde f_c é o fator de correção estimado em laboratório pela razão entre a radiância de outra placa padrão de Spectralon que permanece no laboratório e a placa utilizada no trabalho de campo.

A reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) é calculada de acordo com a Equação 3:

$$R_{rs} = \frac{L_a}{E_d} = \frac{L_u - \rho_{ar-rio} \cdot L_c}{E_d} \quad (3)$$

onde L_u é a radiância emergente da água medida pelo espectrorradiômetro e ρ_{ar-rio} é a correção do brilho do céu (*sky glint*) na superfície da água. Neste estudo foi utilizada a correção do brilho do céu proposta por Ruddick et al. [11], indicada para águas turbidas.

Diferentes comprimentos de onda foram testados para estimar a concentração do MPS, utilizando o intervalo espectral entre o verde e o infravermelho próximo (IVP) (500-900 nm), utilizando o algoritmo não linear de potência ($y = ax^b$). Os comprimentos de onda selecionados representam bandas de sensores remotos da cor da água tais como, *M*edium *R*esolution *I*maging *S*pectrometer (MERIS), *M*ODerate *r*esolution *I*maging *S*pectroradiometer (MODIS), *V*isible *I*nfrared *I*maging *R*adiometer *S*uite (VIIRS), *O*cean and *L*and *C*olour *I*nstrument (OLCI) e *O*perational *L*and *I*mager (OLI).

Além disso, também foram testados dois algoritmos não-lineares desenvolvidos para águas turbidas, sendo eles Nechad et al. [7] (N10) e Martinez et al. [8] (M15).

Nechad et al. [7] desenvolveram o algoritmo N10 para as águas costeiras do Mar do Norte (Equação 4):

$$[MPS] = \frac{A \cdot \rho_w}{1 - \rho_w / C} + B \quad (4)$$

onde ρ_w corresponde a reflectância emergente do corpo de água. Os coeficientes A , B e C são dependentes do comprimento de onda escolhido [7].

Martinez et al. [8] desenvolveram o algoritmo M15 para estimar a concentração do MPS nos rios Madeira, Solimões e Negro na região amazônica utilizando R_{rs} no IVP (Equação 5):

$$[MPS] = A \cdot (R_{rs}(860))^B \quad (5)$$

onde $A = 20,41$ e $B = 1,17$ [8].

O desempenho dos algoritmos foi avaliado com base nas estatísticas: coeficiente de determinação (R^2), erro médio quadrático (RMSE), erro percentual (BIAS) e a média da diferença absoluta (MRAD).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de estudo entre 2014-2017, a concentração do MPS apresentou alta variabilidade, tanto no Rio Amazonas (média = $69,7 \pm 33,8 \text{ mg L}^{-1}$; coeficiente de variação = 53%), quanto nos rios de águas claras ($14,0 \pm 18,1 \text{ mg L}^{-1}$; coeficiente de variação = 124%). O intervalo de variação (máximo – mínimo) obtido no presente estudo foi de $1,8 - 160,8 \text{ mg L}^{-1}$, isto é, dentro do intervalo obtido por outros estudos na bacia amazônica (a montante de Óbidos), entre $\sim 5,5 - 1138 \text{ mg L}^{-1}$ [8,12,13].

Para estimar a concentração do MPS por sensoriamento remoto, muitos autores propõem algoritmos relativamente simples utilizando a R_{rs} no domínio espectral do vermelho e

do IVP em águas túrbidas [5-7, 14]. A relação não linear de potência aqui testada em relação à R_{rs} *in situ* indicou que o intervalo entre 655-778 nm foi o mais indicado (maior R^2) para estimar a concentração do MPS ($R^2 > 0,70$, $p < 0,05$) (Figura 2).

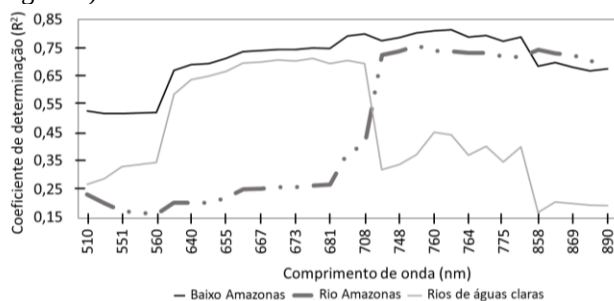


Figura 2. Coeficientes de determinação da relação não-linear entre a [MPS] e a R_{rs} *in situ*.

Este trabalho corrobora estudos anteriores que afirmam que a correlação melhora à medida que aumenta o comprimento de onda [7,14]. O algoritmo não linear de potência apresentou melhor desempenho entre os intervalos 705-708 nm e 753-767 nm ($R^2 \approx 0,80$, $p < 0,05$). O melhor comprimento de onda para estimar a [MPS] foi o 761 nm ($R^2 = 0,81$, $p < 0,05$). Estes comprimentos de onda (705-708 e 753-767) podem ser encontrados nos sensores MERIS (705 e 760 nm) e OLCI (708, 753-767). Entretanto, quando o conjunto de dados é dividido entre o Rio Amazonas e rios de águas claras, observa-se uma diferença, descrita a seguir. A relação $R_{rs} \times [MPS]$ para águas claras apresenta um melhor desempenho no domínio espectral do vermelho entre 667-678 nm ($R^2 \approx 0,71$, $p < 0,05$). Entretanto, para as águas do Rio Amazonas, a melhor correlação foi observada no IVP entre 746-890 nm ($R^2 \approx 0,73$, $p < 0,05$). Deste modo, ao considerar a distinção entre o Rio Amazonas e os rios de águas claras, outros sensores remotos da cor da água como o MODIS, com comprimento de onda centrados em 667,678,748,858 e 869 nm, VIIRS, em 672,746 e 865 nm, e OLI, em 865 nm, também podem ser utilizados para estimar o MPS.

Os resultados aqui obtidos sugerem que a relação entre R_{rs} e MPS pode não ser única na área de estudo. Sabe-se que o MPS apresenta diferentes composições, com uma maior proporção de partículas orgânicas nos rios de águas claras em comparação ao Rio Amazonas. Este último por sua vez, geralmente apresenta uma elevada proporção de sedimentos finos e inorgânicos [15]. As distintas composições do MPS também foram discutidas por Martinez et al. [8] ao estudar águas amazônicas opticamente diferentes. Aqueles autores demonstraram que o MPS em rios ricos em sedimentos como o Madeira e Solimões são compostos por partículas minerais em altas concentrações, enquanto que em rios de águas escuras e planícies de inundação o MPS era composto majoritariamente por uma fração orgânica.

Razões de bandas também foram utilizadas para estimar a concentração do MPS em águas túrbidas [6].

Porém, as razões 672/555; 764/555; 865/555; 858/645 testadas no presente estudo não geraram valores de correlação maiores que os encontrados com a utilização de apenas uma banda espectral. Portanto, os algoritmos de razão de bandas não foram utilizados neste trabalho. Outros autores já haviam documentado que algoritmos baseados em razão de bandas e ajustados para os rios da bacia amazônica não melhoraram as correlações encontradas entre MPS e R_{rs} [3,8].

Estudos recentes demonstraram a utilidade da banda no infravermelho médio (IVM) para estimar a concentração do MPS em águas extremamente túrbidas ($>100 \text{ mg L}^{-1}$) [4], em concentrações similares às do Rio Amazonas durante o período de enchente. Entretanto, o uso do IVM é recomendado apenas quando $R_{rs}(865) > 0,09 \text{ sr}^{-1}$, o que não foi observado nos dados obtidos no presente estudo.

Outros estudos indicam uma relação positiva entre MPS e R_{rs} no domínio do espectro no vermelho e/ou IVP para rios da bacia amazônica utilizando regressões lineares e não lineares [5,6,8]. Como a melhor correlação foi encontrada entre $R_{rs}(761)$ e [MPS], considerando todas as amostras do Baixo Amazonas, o mesmo foi escolhido para o algoritmo não-linear N10 (coeficientes $A = 1750,72$; $B = 1,34$; $C = 0,20$ [7]) apresentado na Figura 3. Os coeficientes também foram calibrados para a área de estudo, onde: $A = 1100$; $B = 5,121$; $C = 0,306$ ($R^2 = 0,81$; $\text{RMSE} = 15,3 \text{ mg L}^{-1}$; $\text{BIAS} = 2,3$; $\text{MRAD} = 22,3$).

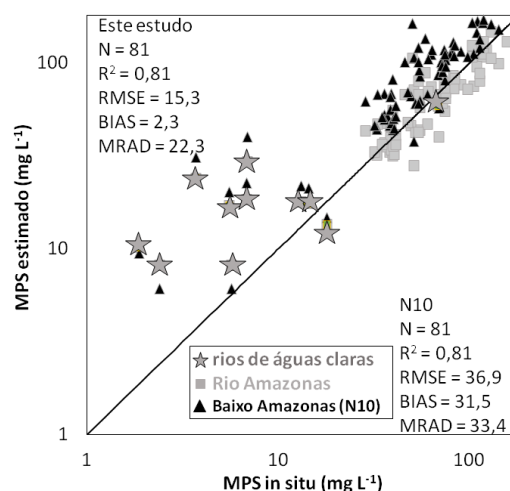


Figura 3. Comparação entre as correlações para estimativas da concentração do material particulado em suspensão como uma função de $\rho_w(761)$ para o Baixo Amazonas, utilizando os coeficientes calibrados para a área de estudo e os apresentados por Nechad et al. [7].

Os coeficientes reportados por Nechad et al. [7] foram estimados com base em dados *in situ* obtidos em águas costeiras do Mar do Norte (intervalo da [MPS] = $1,24 - 110,27 \text{ mg L}^{-1}$; média = $26,16 \text{ mg L}^{-1}$). Quando os mesmos coeficientes de Nechad et al. [7] são aplicados na região do Baixo Amazonas, as concentrações de MPS são superestimadas, apesar de algumas amostras estarem de

acordo com o algoritmo N10 (Figura 3). O resultado da correlação melhora ao se utilizar os coeficientes calibrados para o Baixo Amazonas (Rio Amazonas e rios de águas claras em conjunto), ainda que as estimativas para rios de águas claras tenham sido superestimadas (Figura 3). Essa superestimativa pode estar relacionada ao uso da banda IVP no algoritmo, ao invés de uma banda no vermelho que apresentou melhor desempenho nas águas mais claras (Figura 2). O desempenho do algoritmo M15 aplicado à $R_{rs}(860)$ *in situ* e calibrado para o Baixo Amazonas foi relativamente inferior ao obtido com o algoritmo N10 calibrado para a área de estudo. Apesar do M15 possuir um coeficiente de determinação $R^2 = 0,77$, a concentração do MPS foi subestimada em comparação com os valores medidos *in situ*. Essa subestimativa pode estar relacionada ao intervalo de concentração do MPS no qual o algoritmo M15 foi desenvolvido (2-621 mg.L⁻¹; média = 141 mg.L⁻¹). Ou seja, mais alto do que o intervalo de valores obtidos na área de estudo (1,8 – 160,8 mg.L⁻¹; média = 81,3 mg.L⁻¹). Além disso, ao observar a Figura 2, é possível notar um declínio no R^2 para comprimentos de onda > $R_{rs}(860)$ quando todo o banco de dados é utilizado, e principalmente quando apenas os rios de águas claras são considerados. Outro aspecto a ser considerado é a potencial presença de ruído nas medidas de reflectância obtidas em comprimentos de ondas maiores que 800 nm, que pode ser uma fonte de erros ou a justificativa para as diferenças observadas. Quando o algoritmo M15 é aplicado utilizando os coeficientes calibrados para o Baixo Amazonas (A = 2797,60; B = 0,87) o coeficiente de determinação é relativamente menor ($R^2 = 0,77$; $p < 0,005$; N = 81) que no algoritmo N10 ($R^2 = 0,81$).

5. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que o intervalo espectral mais adequado para a estimativa da concentração do MPS é 655-778 nm, considerando todo o Baixo Amazonas. O algoritmo proposto por Nechad et al. [7] teve um bom desempenho quando calibrado para a área de estudo. As diferenças entre as R_{rs} medidas no Rio Amazonas e em rios de águas claras sugerem que o MPS possui distintas composições de suas partículas. Deste modo, considerar as características intrínsecas do MPS para diferentes massas de água opticamente diferenciáveis na bacia amazônica pode melhorar o desempenho dos algoritmos de sensoriamento remoto. A abordagem proposta por Dogliotti et al. [16] de se considerar diferentes pesos para as R_{rs} utilizadas nos algoritmos pode ser uma alternativa a ser testada para melhorar a acurácia das estimativas na área de estudo. Outra sugestão de trabalho futuro é ajustar os algoritmos com base em uma classificação bio-óptica para diferentes tipos de águas.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Meade, R. H., "Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco Rivers," *Quaternary International*, 21, 29–39, 1994.
- [2] Gupta, A., "Large Rivers: Geomorphology and Management", John Wiley & Sons, 689 pp., 2007.
- [3] Yopez, S.; Laraque, A.; Martinez, J. M.; De Sa, J.; Carrera, J. M.; Castellanos, B.; Gallay, M. e Lopez, J. L. "Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela)," *Comptes Rendus - Geosci.* 350(1–2), 20–30 2018.
- [4] Knaeps, E.; Ruddick, K. G.; Doxaran, D.; Dogliotti, A. I.; Nechad, B.; Raymaekers, D. e Sterckx, S. "A SWIR based algorithm to retrieve total suspended matter in extremely turbid waters," *Remote Sens. Environ.* 168, 66–79, 2015.
- [5] Park E. e Latrubesse, E. M. "Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data," *Remote Sens. Environ.* 147, 232–242, 2014.
- [6] Villar, R. E.; Martinez, J. M.; Le Texier, M.; Guyot, J. L.; Fraizy, P.; Meneses, P. R. e De Oliveira, E. "A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images," *J. South Am. Earth Sci.* 44, 45–54, 2013.
- [7] Nechad, B.; Ruddick, K. G. e Park, Y. "Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters," *Remote Sens. Environ.* 114(4), 854–866, 2010.
- [8] Martinez, J.; Espinoza-Villar, R.; Armijos, E.; e Silva Moreira, L. "The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter," *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 1–14, 2015.
- [9] Van der Linde, D. W. "Protocol for determination of total suspended matter in oceans and coastal zones," *JRC Tech. Note I* 98, 182, 1998.
- [10] Mueller, J. L.; Fargion, G. S. e McClain, C. R. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols*, 2003.
- [11] Ruddick, K. G.; De Cauwer, V.; Park, Y. e Moore, G. "Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters," *Limnol. Ocean.* 51(2), 1167–1179, 2006.
- [12] Carvalho, L. A. S. de; Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L.M. e Rudorff, C. M. "Implications of scatter corrections for absorption measurements on optical closure of Amazon floodplain lakes using the Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S-WETLabs)," *Remote Sens. Environ.* 157, 123–137, 2015.
- [13] Barbosa, C.C.F.; Novo, E. M. L. M.; Melack, J. M.; Gastil-Buhl, M. e Filho, W.P. "Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain," *Limnology* 11(2), 155–166, 2010.
- [14] Doxaran, D.; Cherukuru, R. C. N. e Lavender, S. J. "Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters," *Int. J. Remote Sens.* 26(8), 1763–1769, (2005).
- [15] Dunne, T.; Meade, R. H.; Richey, J. E. e Forsberg, B. R. "Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil," *Geol. Soc. Am. Bull.* 110(4), 450–467, 1998.
- [16] Dogliotti, A. I. I.; Ruddick, K. G. G.; Nechad, B.; Doxaran, D. e Knaeps, E. "A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters," *Remote Sens. Environ.* 156, 157–168 2015.