

RELAÇÃO ENTRE O TOTAL DE SÓLIDOS SUSPENSOS EM CORPOS HÍDRICOS DO ALTO RIO PARANÁ E IMAGENS MSI/SENTINEL-2: ESTUDO PRELIMINAR

Rodrigo Blaudt Lima da Silva¹, Otávio Cristiano Montanher¹, Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo², Cláudio Clemente Faria Barbosa², Daniel Andrade Maciel², Felipe Menino Carlos²

¹Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Geografia, Av. Colombo, 5.790, Jardim Universitário, Maringá, PR, Brasil, rodrigo.blaudt@outlook.com; otaviocmontanher@yahoo.com.br; ²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010, evlyn@dsr.inpe.br; claudio@dpi.inpe.br; damaciel_maciel@hotmail.com; felipe.carlos@fatec.sp.gov.br

RESUMO

Imagens do sensor Sentinel-2/MSI, lançado em 2015, apresentam características promissoras para o monitoramento da qualidade d'água. Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo empírico que permitisse estimar as concentrações de sólidos totais suspensos (TSS) em superfície, nos rios Paraná, Paranapanema e Tietê, a partir de imagens do sensor MSI. Para a calibração do modelo foram utilizados dados in situ disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Para isso, as imagens foram submetidas à correção atmosférica usando o modelo 6S. O melhor desempenho foi obtido no modelo regionalizado para o Rio Paraná ($R^2_{ajus} = 0,71$; $RMSE = 46,47\%$).

Palavras-chave — Sentinel-2, qualidade d'água, CETESB, modelagem empírica, águas interiores.

ABSTRACT

Images of the sensor Sentinel-2/MSI, launched in 2015, shows promising features for water quality monitoring. This preliminary study aims develop an empirical model that allows estimate the concentration of total suspended solids (TSS) in water surface, from MSI sensor. For model calibration, it was used in situ data from Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Atmospheric correction was performed with 6S model. The best performance was found in the regionalized model for the Rio Paraná ($R^2_{adju} = 0,71$, $RMSE = 46,47\%$).

Key words — Sentinel-2, water quality, CETESB, empirical modeling, inland waters.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto aplicado ao estudo de corpos hídricos tem avançado nas últimas duas décadas devido à disponibilidade de sensores com maior resolução radiométrica e espectral. A constelação de satélites Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia (ESA) possui o sensor MSI, com bandas no visível, infravermelho próximo, de ondas

curtas que podem ser aplicadas para estudos de qualidade d'água, com resolução espacial variando entre 10, 20 e 60 m e resolução radiométrica de 12 bits. Ainda, a resolução temporal de cinco dias (combinada a partir dos dois satélites), permite o monitoramento das mudanças temporais com grande detalhe.

Diversos estudos envolvem tentativas de correlação entre as bandas do sensor MSI e parâmetros de qualidade de águas interiores, como o total de sólidos suspensos (TSS), Chl-*a*, matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) e o carbono orgânico dissolvido [1-4].

O programa de monitoramento de qualidade d'água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), iniciou-se em 1974 com o objetivo de realizar diagnósticos da qualidade das águas superficiais do estado, analisando o histórico e sua evolução temporal, identificando áreas prioritárias e manejando assim, medidas de gestão pública. Em 2017, totalizou-se 461 pontos de coleta da rede básica de monitoramento, que realiza levantamento bimestral de cerca de 60 variáveis físicas, químicas e biológicas [5]. As estações de coleta são divididas em Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), classificadas a partir do macro uso do solo.

Este trabalho teve como objetivo geral analisar a relação entre a reflectância, medida em diversas bandas espectrais do sensor MSI e o TSS (mg/l) presente em rios e reservatórios do alto rio Paraná. Devido a diversidade de ambientes para os quais os dados são disponíveis (rios e reservatórios) a pesquisa buscou também avaliar a viabilidade de obter um modelo empírico geral que pudesse ser aplicado ao conjunto dos sistemas aquáticos em estudo, ou se seria necessário, modelos específicos em função dos diferentes tipos de sistema aquático.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo envolve uma série de estações de medidas de parâmetros de qualidade d'água em campo, realizadas pela CETESB, nos rios: Paraná, Paranapanema e Tietê (Figura 1). Os dados de campo são fornecidos livremente pela CETESB em: (<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>)

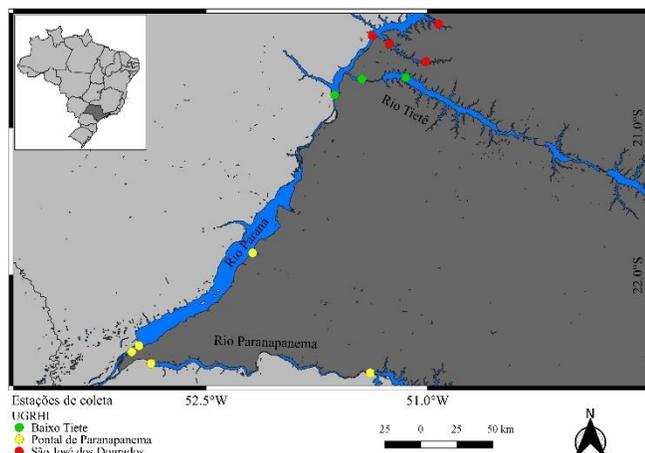


Figura 1. Localização dos pontos de coleta da CETESB.

2.1. DADOS

Ao todo, foram utilizados 52 valores de TSS com um máximo de 10 dias de defasagem entre as coletas de campo e o imageamento, abrangendo rios e reservatórios do alto Paraná, em períodos de seca e chuva (Tabela 1).

Tabela 1. Número de dados utilizados por período (seco ou chuvoso), estação e tipo de corpo d'água.

UGRHI	Estações	Corpo d'água	Dado por período
Baixo Tietê	PARN02110	Rio Paraná (Jusante UHE Jupuíá)	2 chuvoso
			2 seco
	TIET02900	Rio Tietê	5 chuvoso
			5 seco
	TITR02800	Reservatório Três Irmãos	4 chuvoso
			4 seco
São José dos Dourados	ISOL02995	Reservatório Ilha Solteira	3 chuvoso
			2 seco
	BSJD02900	Rio São José dos Dourados	3 chuvoso
			2 seco
	BSJD02200	Rio São José dos Dourados	2 chuvoso
			1 seco
BPEN02400	Rio Rib. Ponte. Pensa	2 chuvoso	
		1 seco	
Pontal Paranapanema	PARN02740	Rio Paraná	2 chuvoso
			1 seco
	PARN02900	Rio Paraná	2 seco
	PARN02910	Rio Paraná	2 seco
	PARP02900	Rio Paranapanema	2 seco
	PARP02750	Rio Paranapanema	3 chuvoso
3 seco			
TOTAL	12	10 rios	26 chuvoso
		2 Reservatórios	27 seco

As imagens do sensor MSI são disponibilizadas tanto no portal da ESA (<https://scihub.copernicus.eu>) como no banco de dados da USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), sendo este a fonte de aquisição de imagens do presente trabalho. Para elaboração dos modelos empíricos foram adquiridas 29 imagens do MSI disponibilizadas em reflectância no topo da atmosfera (TOA). Para a correção dos efeitos atmosféricos das imagens foi utilizado o código de transferência radiativa 6S [6], através de um sistema de correção desenvolvido no LabISA (www.dpi.inpe.br/labisa/) por Martins, V., e Menino, F. Para determinar os parâmetros atmosféricos vapor d'água, ozônio e AOT, utilizou-se de dados do sensor MODIS.

Todas as bandas foram então reamostradas para 10 m. O valor da reflectância das bandas espectrais foi obtido a partir de amostragens de 4x4 pixels próximos às áreas de coleta dos dados em campo. Foram calculadas médias a partir dessas amostras, semelhante ao procedimento feito por Montanher et al. [7] e Cremon et al. [8]. No entanto, não foram excluídos outliers para obtenção das médias devido à maior resolução radiométrica e melhor calibração do sensor MSI em relação ao sensor TM, bem como a correção do *sun glint*.

A banda 11 - região do infravermelho de ondas curtas, não apresenta informações sobre os COA, mas possui relação com o sinal refletido pela interface da água, cujo efeito visual nas imagens é denominado como *sun glint*. Levando esse princípio físico em conta, para minimizar o efeito do *sun glint* nas bandas do visível e infravermelho próximo, realizou-se a subtração de cada banda pela banda 11. Para isso, adotou-se a aproximação de que o *sun glint* varia pouco entre para a faixa espectral entre 400 e 1600 nm.

Após a obtenção das médias de reflectância e seu tratamento com relação ao efeito *sun glint*, os valores de reflectância foram adotados como variáveis preditoras do TSS, bem como as seguintes razões entre bandas: B4/B3 e B3/B2, as quais envolvem a região espectral do visível. Como as concentrações são baixas ($0 \leq \text{TSS} \leq 46$), não foram feitos testes com razões entre bandas do infravermelho próximo.

A seleção de quais variáveis seriam utilizadas para cada modelo foi feita de modo semiautomático no software Statistica, primeiramente com a seleção de atributos por *stepwise (forward)* e por meio da avaliação da significância (teste t sobre os coeficientes angulares) de cada um dos atributos selecionados. Foram executadas ao todo três análises de regressão, uma para todo o conjunto de dados e duas para modelos regionalizados. Neste estudo preliminar, não foi feita a validação dos modelos. Para cálculo do RMSE de cada um dos modelos foi utilizado a média, e apresentado tanto na Figura 2 (mg/L e nRMSE), como na Tabela 3 (nRMSE).

3. RESULTADOS

Os dados de campo dos corpos hídricos da bacia do Paraná mostram condições de baixas concentrações quando comparadas com outras águas interiores, como alguns rios e lagos amazônicos [3,7] (Tabela 2).

Tabela 2. Estatísticas descritivas dos dados de campo

Parâmetro	TSS (mg/l)
n	52
Média	8,13
Mínimo	0
Máximo	46

O modelo geral para estimativa do TSS não apresentou bom desempenho (Tabela 3), de modo que a partição dos dados em dois subconjuntos, um para o rio Paraná e outro para os maiores afluentes (Paranapanema e Tietê), levou a um aumento na precisão das estimativas. Apesar da redução do número amostral (n) para os dois subconjuntos em relação ao modelo geral, as análises de regressão continuaram significativas (teste F para todos os modelos possuíram valor- $p < 0,001$). Os testes de Shapiro-wilk ($N < 30$) e o Kolmogorov-smirnov ($N > 30$) foram aplicados para testar a normalidade dos resíduos. Nos três casos pode-se assumir a distribuição normal para os resíduos considerando um nível de significância de 5%.

Tabela 3. Resultados das análises de regressão para estimativa do TSS

Abrangência	r^2	r^2_{ajus}	p	n	k	nRMSE (%)
Modelo geral	0,58	0,54	<0,001	52	4	66,68
Rio Paraná	0,76	0,71	<0,001	27	5	46,47
Paranapanema e tietê	0,68	0,62	<0,001	25	4	59,08

O desempenho dos modelos e as bandas utilizadas em cada um podem ser observados em detalhe nas Tabelas 4, 5 e 6. Não só os valores dos coeficientes angulares se alteraram entre o modelo geral e os dois regionais, quanto também as variáveis que foram selecionadas, o que pode sugerir diferenças nos componentes opticamente ativos em cada área, devido a suas composições e distribuição de tamanhos. A dispersão entre os valores observados *in situ* e estimados de TSS para cada modelo podem ser observados na Figura 2.

Tabela 4. Modelo geral para estimativa do TSS

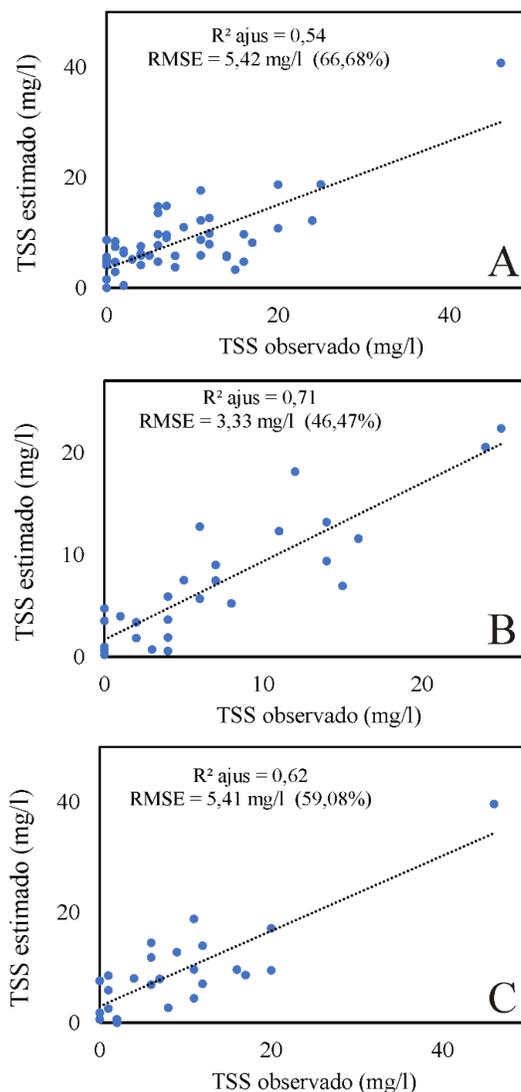
Variável	Coefficiente	Valor-p (teste t)
Intercepto	5,88	< 0,0001
B4	-1107,54	< 0,0001
B5	1244,72	0,0018
B7	762,66	0,0007
B9	-176,75	0,0101

Tabela 5. Modelo para estimativa do TSS para o rio Paraná

Variável	Coefficiente	Valor-p (teste t)
Intercepto	-0,66	0,83
B1	-1062,57	< 0,0001
B3	617,79	0,0001
B5	-898,29	0,0002
B6	3294,26	< 0,0001
B8	-1722,92	0,0013

Tabela 6. Modelo para estimativa do TSS para os rios Paranapanema e Tietê

Variável	Coefficiente	Valor-p (teste t)
Intercepto	4,26	0,0438
B4	-1412,62	0,0021
B5	1735,46	0,0057
B8	701,7	0,0242
B9	-128,14	0,1147

**Figura 2.** Dispersão entre valores observados e estimados pelos modelos de regressão: geral (A); rio Paraná (B); Paranapanema e Tietê (C).

4. DISCUSSÃO

Os modelos utilizaram bandas tanto do visível quanto do infravermelho próximo, mas as bandas do visível (bandas 3 e 4), de modo geral, possuem uma relação mais robusta com o TSS, como por ser visto pelo teste t aplicado sobre essas variáveis (tabelas 4, 5 e 6). Em baixas concentrações os menores comprimentos de onda são mais sensíveis às

variações do TSS, enquanto em maiores concentrações as bandas do infravermelho são mais úteis Lodhi et al [9].

Apesar de as bandas da região visível terem sido as mais significativas, as bandas espectrais da região do infravermelho próximo estiveram presentes em todos os modelos, inclusive em maior quantidade do que as do visível. Possivelmente tais bandas, principalmente a banda 5, foram selecionadas para tratar efeitos de espalhamento relacionados com o fitoplâncton. A banda 5 situada ao redor de 705 nm, por exemplo, foi a única banda espectral presente em todos os modelos. O fitoplâncton apresenta um importante pico de reflexão nesta faixa espectral devido ao espalhamento celular.

Com relação às razões entre bandas, elas não foram selecionadas nos modelos, possivelmente pelo fato de que a base de dados trata de baixas concentrações. Em amplitudes maiores de concentrações os efeitos não-lineares entre o TSS e a reflectância espectral podem ser tratados por razões entre bandas, o que não foi o caso deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados das análises de regressão, nos valores de R^2 , RMSE obtidos e nas análises gráficas de dispersão entre valores observados e estimados, considera-se que os modelos apresentados para estimativa do TSS poderiam ser aplicados na prática, caso fossem aceitos erros na ordem de 5 – 10 mg/l para a faixa de baixas concentrações, erros que percentualmente são expressivos.

Os resultados preliminares dos modelos para estimativa da TSS para rios e reservatórios do alto rio Paraná, com base em dados de sensoriamento remoto obtidos pelos sensores MSI, forneceram resultados satisfatórios até o presente momento. A regionalização dos modelos teve efeito de melhora no desempenho dos modelos.

A estrutura das variáveis dos modelos aparentam possuir algum significado físico, de forma que as bandas do visível possuíam relações mais significativas e também que foram incluídas bandas do infravermelho próximo, essencialmente a banda 5, em todos os modelos.

Pretende-se, com uma quantidade maior de dados, dar continuidade ao estudo, utilizando outros parâmetros de qualidade de água presentes no banco de dados da CETESB, como clorofila-a, feofitina, CDOM e carbono orgânico dissolvido.

6. REFERÊNCIAS

[1] Toming, K.; Kutser, T.; Laas A.; Sepp, M.; Paavel.; Noges, T., “First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery”, *Remote Sensing*, v. 8, pp. 640, 2016.

[2] Bicca, I.A.; Kramer, G.; Pereira Filho. W.; Barbosa, C.C.F. “Simulação de bandas do sensor MSI/Sentinel-2 em lagos da Amazônia e Rio Grande do Sul”, *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 2017. Disponível em: <<http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/30332/15863>>.

[3] Ferreira, R. M. P.; Barbosa, C. C. F.; Martins, V. S.; Carvalho, L. A. S.; Jorge, D. S. F.; Silva, M. P. “Aplicação do sensor MSI/Sentinel-2 na estimativa de componentes óticamente ativos em lagos de planície de inundação amazônica”, *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais*. São José dos Campos: INPE, pp. 3687-3694, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3PSLTD4>>.

[4] Liu, H.; Li, Q.; Shi, T.; Hu, S.; Wu, G.; Zhou, Q. “Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake”, *Remote Sensing*, v. 9, pp. 761, 2017.

[5] CETESB. Relatório de qualidade de água interiores do Estado de São Paulo 2017. São Paulo: Cetesb, 2018. 303 p. (Série Relatórios).

[6] E. F. Vermote, D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman, and J.-J. Morcrette, “Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 3, 1997, pp. 675-686.

[7] Montanher, O.C., et al., “Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 29, pp. 67-77, 2014. doi: 10.1016/j.jag.2014.01.001.

[8] Cremon E.H.; Montanher, O.C.; Bayer, M, “Viabilidade de estimativa de sedimentos suspensos com dados TM/Landsat-5 para o rio Araguaia”, *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais*. São José dos Campos: INPE, pp. 2948-2954, 2017.

[9] Lodhi, M.A.; Rundquist, D.C.; Han, L.; Kuzila, M.S. The Potential for Remote Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters. *Journal of the American Water Resources Association*. v. 33, n. 1, p. 111 – 117, 1997