

## Estimativa do coeficiente de absorção total do reservatório de Ibitinga por meio de um modelo quase-analítico re-parametrizado

Caroline Piffer de Andrade<sup>1</sup>  
Ana Carolina Campos Gomes<sup>1</sup>  
Fernanda Sayuri Yoshino Watanabe<sup>1</sup>  
Nariane Marselhe Ribeiro Bernardo<sup>1</sup>  
Thanan Rodrigues<sup>1</sup>  
Enner Alcântara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Campus de Presidente Prudente, SP  
{carol.piffer1, fernandasyw, narianeberbardo, twalesza}@gmail.com  
carol.campos01@hotmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Campus de São José dos Campos, SP  
enner.alcantara@ict.unesp.br

**Abstract.** The water represents a complex mixture of a variety of dissolved or particulate materials having different optical properties that interact with light. The water color modeling aims to express the remote sensing reflectance in terms of Inherent Optical Properties (IOPs), such as total absorption coefficient ( $a_t$ ). Application of quasi-analytic algorithm (QAA), which derives total absorption coefficient ( $a_t$ ) from remote sensing reflectance ( $R_{rs}$ ), in inland waters generally returns inconsistent results and, therefore, some versions were developed aiming to retrieve more accurate values to these environments. A QAA parameterization, named QAA\_BBHR, was developed for Barra Bonita reservoir, belonging to a cascade system situated at Tietê River, São Paulo State, Brazil. This paper aims to assess the applicability of QAA\_BBHR to the data collected in the Ibitinga reservoir, pertaining to the same cascade system. The adjustment was assessed through the statistical analyses, Root Mean Squared Error (RMSE), Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE), bias and the coefficient of determination ( $R^2$ ). Analysis of  $R_{rs}$  spectra, obtained from Ibitinga reservoir data, suggests high chlorophyll -  $a$  concentration (from 1.37 to 119.04 mg.m<sup>-3</sup>), indicating eutrophic condition, as well as presented in Barra Bonita reservoir.  $R^2$  value was 0.74, considering all wavelengths and average NRMSE was 19.07 %. Minimum errors were observed at 665 and 681 nm, whereas the highest errors occurred at 709 nm. The greatest errors at 709 nm probably occur due to inorganic suspended matter scattering and the increasing in pure water absorption. It was possible to conclude, from this, that QAA\_BBHR proved to be applicable to the study area under consideration.

**Palavras-chave:** quasi-analytical model, inherent optical properties, inland waters, modelo quase-analítico, propriedades ópticas inerentes, águas interiores.

### 1. Introdução

O represamento de rios no Brasil tem como principal finalidade a exploração do potencial hidroenergético. Dentre as diversas alterações causadas aos ecossistemas aquáticos artificialmente represados se incluem alterações na drenagem, ocasionando aumento do tempo de residência da água (Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2008). O aumento na disponibilidade de nutrientes, causado pela associação das alterações na drenagem com o despejo de efluentes, favorece a proliferação excessiva do fitoplâncton (Tundisi, 2008). Ademais, processos erosivos comuns nas margens dos reservatórios intensificam o carreamento de sedimentos orgânicos e inorgânicos para o corpo d'água. Todos esses fatores contribuem para que muitos reservatórios se tornem ambientes túrbidos e eutrofizados.

Dentre os componentes opticamente ativos (COAs) de ambientes aquáticos, destacam-se os pigmentos fitoplanctônicos, matéria orgânica dissolvida, bem como de materiais orgânicos e inorgânicos em suspensão. Haja vista que as propriedades ópticas inerentes (POIs) –

coeficiente de absorção ( $a$ ) e o coeficiente de espalhamento ( $b_b$ ) – de um corpo d'água são dependentes da composição do mesmo; a presença desses componentes exerce influência significativa sobre essas propriedades. Segundo Gordon et al. (1988)  $a$  e  $b_b$  estão relacionadas à reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ,  $sr^{-1}$ ) como mostra a Equação 1.

$$R_{rs} = \frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda) + a(\lambda)} \quad (1)$$

O  $a(\lambda)$ , em especial, possui componentes relativos à absorção da radiação eletromagnética causada pela água pura, matéria orgânica colorida dissolvida (CDOM), fitoplâncton e partículas não-algais (Le et al., 2009). Diversos métodos foram desenvolvidos com o intuito de estimar os COAs a partir de dados de  $R_{sr}$ , por meio de abordagens empíricas e semi-analíticas (Odermatt et al. 2012). Por outro lado, Lee, Carder e Arnone (2002) fizeram uma contribuição considerável ao desenvolverem o *Quasi-Analytical Algorithm* (QAA), que deriva POIs a partir de medidas de  $R_{sr}$ . O QAA é composto por apenas dois passos empíricos, sendo os demais passos analíticos ou semi-analíticos. Desde sua criação, o algoritmo tem sido atualizado e atualmente se encontra em sua sexta versão (Lee 2014).

A partir de dados de  $R_{sr}$  o QAA deriva o coeficiente de absorção total ( $a_t$ ) e, em sequência, o coeficiente de absorção do fitoplâncton ( $a_\phi$ ) e do CDOM mais detritos ( $a_{dg}$ ), além do coeficiente de retroespalhamento de partículas suspensas ( $b_{bp}$ ). Por meio dos valores de  $a_\phi$  e  $a_{dg}$  obtidos, utilizando-se de modelos empíricos ou semi-analíticos, é possível obter estimativas das concentrações de clorofila-*a* e CDOM (Carder et al., 1999; Roesler e Perry, 1995), as quais são de extrema relevância no contexto de monitoramento e gerenciamento da qualidade das águas interiores.

Vale destacar que o QAA foi originalmente parametrizado para águas oceânicas e costeiras que apresentam características bio-ópticas distintas de águas interiores. Nesses ambientes, a concentração de COAs é geralmente mais elevada e os tipos de COAs diferem de ambientes oceânicos, alterando significativamente a magnitude e a forma de  $a_t$ . A alta contribuição  $a_\phi$  e  $a_{dg}$  para a  $a_t$  em menores comprimentos de onda é um dos fatores que faz com que QAA para oceanos não apresentem um bom desempenho para águas interiores. Portanto, o deslocamento do comprimento de onda de referência ( $\lambda_0$ ) para  $\lambda$  maiores, resulta em valores mais acurados (Le et al. 2009). Algumas versões do QAA foram desenvolvidas para águas interiores (Le et al. 2009, Li et al. 2013, 2015), especificamente em corpos d'água turbidos e eutrofizados. Watanabe et al. (2016) re-parametrizaram e re-calibraram o QAA para o reservatório de Barra Bonita – SP (QAA\_BBHR), um dos seis reservatórios da cascata do Rio Tietê. O reservatório de Barra Bonita é um ambiente altamente eutrofizado, onde a  $a_\phi$  exibe a maior contribuição para  $a_t$  (> 80% em 675 nm).

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o ajuste do QAA\_BBHR para o reservatório de Ibitinga, também pertencente ao sistema dos reservatórios em cascata do Rio Tietê. A aplicação dessa versão do QAA considerou a proximidade geográfica entre os dois reservatórios, bem como a semelhança em suas características bio-ópticas.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de Estudo

O reservatório hidrelétrico de Ibitinga está localizado no bioma mata atlântica, na região central do Estado de São Paulo (Figura 1). Sua extensão compreende aproximadamente 70 Km ao longo do Rio Tietê, além de 25 Km no rio Jacaré-Guaçu e 25 Km no rio Jacaré-Pepira (LONDE et al., 2016). O reservatório de Ibitinga é o terceiro dos seis reservatórios do

sistema em cascata do Rio Tietê. O entorno do reservatório possui principalmente áreas de cultivo de cana-de-açúcar, pastagem, solo exposto e áreas de floresta.

## 2.2 Dados *in situ*

Os dados espectrais foram obtidos em uma campanha de campo entre os dias 19 e 23 de julho de 2016, estação com baixa precipitação na região, em 30 pontos amostrais distribuídos ao longo do reservatório de Ibitinga conforme apresentado na Figura 1c.

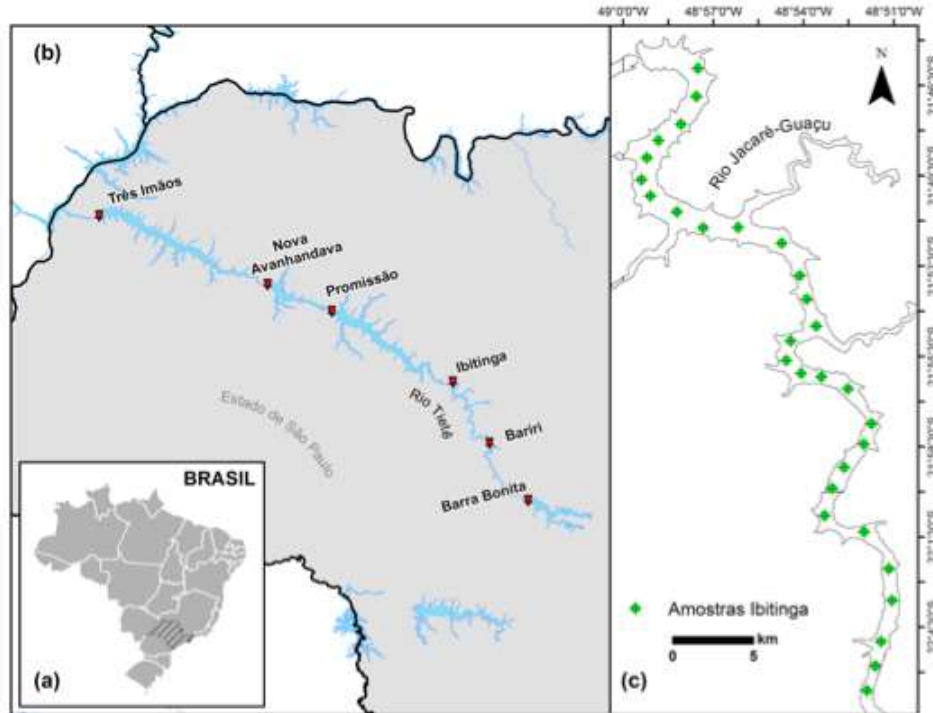


Figura 1. Localização do Estado de São Paulo (a), localização do reservatório de Ibitinga na cascata de reservatórios do Rio Tietê (b), e localização dos 30 pontos amostrados no reservatório de Ibitinga em Julho de 2016 (c).

A coleta foi realizada entre os horários das 10h e 14h, período de maior incidência solar e menor interferência causada pela geometria de iluminação. Foi seguido o protocolo de geometria de aquisição descrito por Mobley (1999), para evitar interferências da sombra do barco e efeitos de espalhamento especular causados pela superfície d'água. As medidas radiométricas foram tomadas na superfície da água com o conjunto de sensores hiperspectrais RAMSES TriOS (Rastede, Alemanha) alocados na plataforma do barco.

Estes sensores operam com um campo de visada de 7°, com resolução espacial de 5,4 cm e resolução espectral de 3,3 nm, coletando as medidas radiométricas entre os comprimentos de onda de 320 a 950 nm.

A partir da alocação dos sensores em plataformas fixas no barco, as grandezas radiométricas obtidas foram radiância total ( $L_t$ ), irradiância total ( $E_d$ ), e a radiância difusa da atmosfera ( $L_s$ ), proveniente do céu. A relação entre elas estabelecida por Mobley (1999) pela Equação 2, permite o cálculo dos valores da reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{sr}$ ,  $sr^{-1}$ ).

$$R_{sr} = \frac{L_t - \rho L_s}{E_d} \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é o fator de proporcionalidade que relaciona a radiância medida pelo sensor quando apontado para o céu com a medida de radiância refletida pelo céu quando o sensor está apontado para a superfície do corpo d'água. Apenas um dos pontos apresentou valores de

$R_{sr}$  inconsistentes e, portanto, foi considerado *outlier*, sendo então retirado das próximas etapas.

Os coeficientes de absorção devida ao material particulado (pigmentos de fitoplâncton e detritos) e devida ao CDOM foram obtidos posteriormente em laboratório conforme procedimento descrito por Tassan e Ferrari (1995,1998) - absorção por material particulado - e Bricaud et al. (1981) e Tilstone et al. (2002) - absorção por CDOM -, a partir de amostras de água coletadas *in situ*. O procedimento incluiu a filtragem das amostras em filtros com microporos de 0,7  $\mu\text{m}$  e 0,2  $\mu\text{m}$  de diâmetro para estimar, respectivamente, absorção devida ao material particulado e absorção por CDOM. As amostras filtradas tiveram valores de transmitância e reflectância em comprimentos de onda entre 280 e 800 nm lidas em espectrofotômetro para cálculo da absorção por material particulado; a absorção por CDOM também foi lida. A partir desses valores, calculou-se  $a_t$  através da soma dos coeficientes obtidos anteriormente.

Os dados de absorção então obtidos foram reamostrados com base nas configurações de banda do sensor *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS), já que o QAA\_BBHR foi parametrizado com base nas bandas do mesmo sensor. Utilizou-se o processo proposto por Lee et. al (2016) para reamostragem dos coeficientes de absorção.

Os valores de  $R_{sr}$  também foram reamostrados de acordo com as bandas do sensor MERIS. Esses valores reamostrados foram os dados de entrada do QAA\_BBHR. Os coeficientes de absorção  $a_\phi$  e  $a_{dg}$  obtidos a partir do modelo QAA\_BBHR foram comparados, por meio de análises estatísticas, com os valores obtidos em laboratório pelas amostras coletadas *in situ*.

As análises utilizadas foram os índices estatísticos raiz do erro médio percentual quadrático (*Root Mean Squared Error* – RMSE – Equação 3), e raiz do erro médio quadrático normalizado (*Root Mean Squared Normalized Error* – NRMSE – Equação 4), que revela, em porcentagem de erro, quanto os valores obtidos pela aplicação do modelo se afastaram dos valores tomados como verdadeiros, e o viés (Equação 5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{estimado} - x_i^{medido})^2} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{máx}^{medido} - x_{mínimo}^{medido}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$$viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{estimado} - x_i^{medido}) \quad (5)$$

Onde  $x_i^{estimado}$  é o valor do coeficiente total de absorção calculado pelo por meio do QAA,  $x_i^{medido}$  é o valor de  $a_t$  obtido em campo e  $n$  é o número de pontos amostrados. Por fim, calculou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) como forma de analisar o ajuste do modelo QAA\_BBHR para os dados referentes ao reservatório de Ibitinga.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Espectros de $R_{sr}$

As curvas de  $R_{sr}$  amostradas no reservatório de Ibitinga podem ser observadas na Figura 2. Observa-se que as regiões do espectro que apresentam maior absorção correspondem as regiões da luz azul, especialmente entre 400 e 450 nm, e da luz vermelha, notadamente em 680 nm. Em aproximadamente 710 nm os valores de  $R_{sr}$  apresentaram ligeiro aumento. Esse comportamento sugere altas concentrações de clorofila-*a*, indicando que o reservatório possivelmente apresenta estado trófico similar ao do reservatório de Barra Bonita, para qual o QAA\_BBHR foi parametrizado.

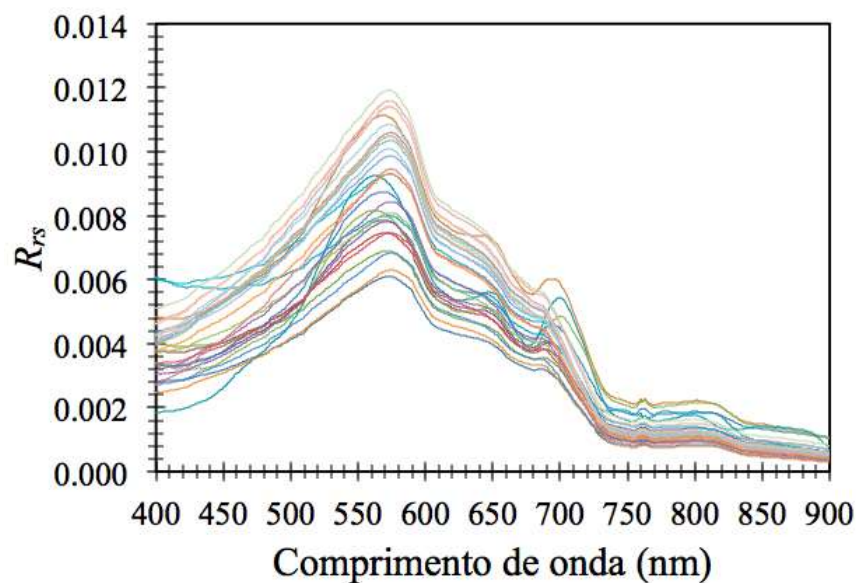


Figura 2. Espectros de  $R_{rs}$  medidos em Julho de 2016.

Os espectros de  $R_{rs}$  também apresentam um pico com valores máximos por volta de 550 e 600 nm, na região do espectro correspondente ao final da luz verde e transição para luz vermelha. Essa feição pode estar associada à presença de material inorgânico em suspensão, já que, segundo Han e Rundquist (1997) a presença desse tipo de material em suspensão está relacionada com o deslocamento de valores mais altos de reflectância em direção aos maiores comprimentos de onda.

### 3.2 Coeficiente de absorção total estimado vs medido

O gráfico elaborado para a comparação entre a absorção estimada e a medida (Figura 3) por comprimento de onda revela que o modelo QAA\_BBHR pode ser considerado, de modo geral, um bom ajuste para o ambiente aquático em questão, com um  $R^2$  de 0,74 e um NRMSE médio de 19,07%.

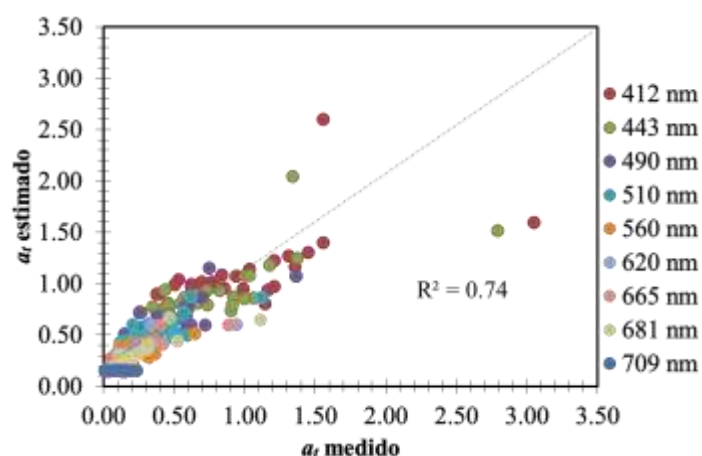


Figura 3. Comparação entre  $a_t$  estimado e medido por comprimento de onda.

Considerando o ajuste do modelo por comprimento de onda, os melhores resultados foram obtidos para 665 e 681 nm com  $R^2$ , respectivamente, 0,7752 e 0,7578. Por outro lado, o pior ajuste ocorreu em 709 nm, com  $R^2$  de 0,0016. A Tabela 1 apresenta a análise dos erros. Os comprimentos de onda que apresentaram estimativas mais acuradas de  $a_t$  foram 681 e 665

nm, com NRMSE de 11,82 e 12,23%, respectivamente; enquanto que o maior NRMSE foi de 36,96% para o comprimento de onda 709 nm.

Tabela 1. Erro percentual quadrático médio (RMSE %), raiz quadrada do erro normalizado (NRMSE%) e o viés entre a absorção medida e a estimada via QAA\_BBHR por comprimento de onda.

$\lambda$ (nm)	RMSE (%)	NRMSE (%)	Viés ( $m^{-1}$ )
412	44,00	15,95	0,10
443	47,55	14,39	0,13
490	52,54	19,88	0,18
510	54,67	20,54	0,16
560	68,80	25,15	0,12
620	79,69	14,77	0,09
665	62,33	12,23	0,07
681	70,41	11,82	0,06
709	93,68	36,96	0,06

O maior erro em 709 nm pode estar relacionado ao espalhamento devido à presença de partículas em suspensão, já que nesse comprimento de onda a absorção pela água é predominante (Dekker, 1993). Como os espectros de  $R_{sr}$  sugerem a presença de sedimentos inorgânicos em suspensão, é possível que o maior erro nesse comprimento de onda esteja relacionado com o material inorgânico suspenso. Resultado semelhante foi obtido por Alcântara et al. (2015), em que os autores utilizaram o QAA\_v5, sem re-parametrização, para estimar a  $a_t$  no reservatório de Itumbiara (GO). Esses autores obtiveram resultados melhores para os menores comprimentos de onda, sendo que o erro aumentava com o aumento do comprimento de onda. Esses resultados mostram a necessidade de realizarmos mais experimentos, com o objetivo de melhor entender e explicar o porquê do maior erro em certos comprimentos de onda. O diagrama ternário, mostrando a contribuição relativa da absorção pelo fitoplâncton, pela matéria orgânica colorida dissolvida, e pelas partículas não-algais, deve ser plotado, com o objetivo de melhor entender a composição da água no momento da amostragem.

#### 4. Considerações Finais

A hipótese testada no presente trabalho foi o ajuste do modelo QAA\_BBHR para um reservatório tropical com características bio-ópticas semelhantes às aquelas apresentadas pela área para qual o modelo foi desenvolvido. Através da comparação entre os valores do  $a_t$  estimado pelo QAA\_BBHR e medido, é possível concluir que o QAA\_BBHR se mostrou adequado para o reservatório de Ibitinga e, portanto, o modelo mostrou-se ser aplicável às águas interiores eutrofizadas. Desta forma, aceita-se a hipótese inicialmente formulada.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Projetos: 2012/19821-1 e 2015/21586-9), bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Projetos: 400881/2013-6 e 472131/2012-5) pela concessão de recursos.

## Referências Bibliográficas

- Alcântara, E. H.; Ogashawara, I.; Curtarelli, M. P.; Fernandes, F.; Kampel, M.; Stech, J. L. Avaliação do QAA (Quasi-Analytical Algorithm) na estimativa do coeficiente de absorção total ( $a_t$ ) da água do reservatório de Itumbiara (GO). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 239-246. On-line. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8jmkd3mgp6w34m/3jm454h>>. Acesso em: 15 Nov. 2016.
- Bricaud, A., Morel, A., Prieur, L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. **Limnology and Oceanography**. v. 26 (1), p. 43–53, 1981.
- Carder K. L. *et al.* Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll-a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. **Journal of Geophysics Research**, v. 104, 5403–5421, 1999.
- Dekker, A G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 260 p. PhD thesis - Free University, Amsterdam, 1993.
- Gordon, H.R. *et al.* A semianalytical radiance model of ocean color. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p.10909 – 10924, 1988.
- Le, C. F. *et al.* Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Taihu Lake, China. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1175-1182, 2009.
- Lee, Z.; Carder, K.; Arnone, R.A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasianalytical algorithm for optically deep waters. **Applied Optics**. v. 41, n. 27, p. 5755-5772. 2002.
- Lee, Z.P. An update of the quasi-analytical algorithm (QAA\_v6). **IOCCG**, 2014. On-line. Disponível em: <[http://www.ioccg.org/groups/Software\\_OCA/QAA\\_v6\\_2014209.pdf](http://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v6_2014209.pdf)>. Acesso em: 15 Nov. 2016
- Lee, Z. *et al.* A semi-analytical scheme to estimate Secchi-disk depth from Landsat-8 measurements. **Remote Sensing of Environment**. v. 177, p. 101-106, 2016.
- Li, L. *et al.* An inversion model for deriving inherent optical properties of inland waters: establishment, validation and application. **Remote Sensing of Environment**. v. 135, p.150-166, 2013.
- Li, L. *et al.* Remote sensing of freshwater cyanobacteria: an extended IOP inversion model of inland waters (IIMIW) for partitioning absorption coefficient and estimating phycocyanin. **Remote Sensing of Environment**. v. 157, p. 9–23, 2015.
- Londe, L. R. *et al.* Efeito de variações no tempo de residência hidráulica sobre a ocorrência de florações de fitoplâncton: estudo de caso no Reservatório de Ibitinga (SP) com o uso de imagens Landsat/TM. **Brazilian Journal of Biology**. v. 76, p. 664- 672, 2016.
- Mobley, C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from abovesurface measurements. **Applied Optics**, v. 38 (36), p. 7442–7455, 1999.
- Odermatt, D.; Gitelson, A.; Brando, V.; Schaepman, M. Review of constituent retrieval in optically deep and complex Waters from satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**. v. 118, p. 116-126, 2012.
- Roesler C. S., Perry M. J. In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance. **Journal of Geophysics Research**, v. 100, p. 13279–13294, 1995.
- Tassan, S., Ferrari, G.M., 1995. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. **Limnology and Oceanography**. v. 40, p. 1358–1368, 1995.
- Tassan, S., Ferrari, G.M. Measurement of light absorption by aquatic particles retained on filters: determination of the optical path length amplification by the ‘transmittance-reflectance’ method. **Journal of Plankton Research**. v. 20, p. 1699–1709, 1998.
- Tilstone, G. H. *et al.* **Regional Validation of MERIS Chlorophyll products in North Sea coastal waters – REVAM Protocols**, 2002. 77 p.



Tundisi, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 7–16, 2008.

Tundisi, J. G.; Matsumura-Tundisi, T. **Linnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631p.

Watanabe F. *et al.* Parametrization and calibration of a quase-analytical algorithm for tropical eutrophic Waters. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 121, p. 28-47, 2016.

Tilstone, G. H. et al. **Regional Validation of MERIS Chlorophyll products in North Sea coastal waters – REVAM Protocols**, 2002. 77 p.