

Avaliação do QAA (*Quasi-Analytical Algorithm*) na estimativa do coeficiente de absorção total (a_t) da água do reservatório de Itumbiara (GO)

Enner Alcântara¹
Igor Ogashawara²
Marcelo Pedroso Curtarelli³
Renata Nascimento³
Milton Kampel³
José Stech³

¹Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Campus de Presidente Prudente, SP
enner@fct.unesp.br

²Department of Earth Sciences, Indiana University – Purdue University Indianapolis, Indianapolis, IN, USA.
igoroga@gmail.com

³Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP.
{mpedroso, milton, stech}@dsr.inpe.br; re_ffnascimento@yahoo.com.br

Abstract. The water represents a complex mixture of a variety of dissolved or particulate materials. These materials have different optical properties that interact with light in different ways in function of their nature and concentration. Quantitative interpretations of the detected signal by remote sensors in terms of water materials require that the effects caused by variations in the incident light field should be also considered. Optical properties of inland water vary spatially and temporally corresponding to changes in the concentration of water materials. Thereupon, 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). The development of models for deriving IOPs from Apparent Optical Properties (AOPs) has been essential for achieving determinations of water IOPs. One algorithm used to estimate the (a_t) is the Quasi-Analytical Algorithm (QAA). The aim of this paper was to apply the QAA in a tropical hydroelectric reservoir, during the dry reason, and evaluate their sensibility in estimate (a_t) using the remote sensing reflectance (R_{rs}). The results showed that for shorter wavelengths (443 e 560nm) the absorption was dominated by non-algal particle (a_{NAP}) and for 665 e 700nm the absorption by phytoplankton was dominant (a_{phy}). The QAA tends to underestimate the (a_t) for wavelengths from 450 to 600nm and superestimate for wavelengths from 650 to 700nm. The highest errors were found at wavelengths 400 and 700nm and the lowest at 600-650nm. We can conclude that QAA starts to lose its potential when the concentration of non-algal particle increases.

Palavras-chave: remote sensing reflectance, total absorption coefficient, water type, reflectância de sensoriamento remoto, coeficiente de absorção total, tipo de água.

1. Introdução

As propriedades ópticas de sistemas aquáticos são influenciadas por várias substâncias, dentre elas, três de reconhecida importância, além da água pura: fitoplâncton, material orgânico e inorgânico em suspensão e matéria orgânica dissolvida. Estes são os principais componentes opticamente ativos (COAs) que afetam os coeficientes de absorção e de espalhamento na água.

As interpretações quantitativas do sinal detectado por sensores remotos em termos dos constituintes da água requerem que sejam isolados os efeitos causados pelas variações no campo de luz incidente sobre o sinal detectado. Para isso, é necessário expressar a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) em termos das propriedades ópticas inerentes (POIs).

As POIs são aquelas propriedades que independem de variações na distribuição angular do campo de luz incidente, sendo determinadas somente pelo tipo e concentração das

substâncias presentes no meio (IOCCG, 2006). As POIs fundamentais são, o coeficiente de absorção (a) e espalhamento (b).

O coeficiente de absorção específico do fitoplâncton é a base de muitos modelos de estimativa da concentração de clorofila- a (Chl- a) via dados de sensoriamento remoto (Gilerson et al. 2010; Li et al. 2013); no entanto, a sua estimativa em laboratório é realizada com equipamentos específicos, de alto custo, e necessita de pessoal com treinamento adequado. Alguns autores têm desenvolvido e parametrizado modelos quase-analíticos para estimativa do coeficiente de absorção, utilizando para tanto a R_{rs} .

Um desses modelos é o QAA (*Quasi-Analytical Algorithm*) que foi desenvolvido por Lee et al. (2002) para derivar os coeficientes de absorção e retroespalhamento por meio da inversão espectral da R_{rs} . O QAA foi desenvolvido para ser aplicado em águas do caso I (i.e. águas em que o fitoplâncton é o principal agente responsável pelas variações nas propriedades ópticas da água).

Águas interiores (lagos, reservatórios, rios) são classificadas como águas do caso II, ou seja, são massas d'água influenciadas não só por fitoplâncton e partículas relacionadas, mas também por outras substâncias que variam independentemente, principalmente partículas inorgânicas em suspensão e substâncias amarelas.

Poucos são os esforços, no mundo, quanto a aplicação do QAA em águas interiores, no Brasil, esse esforço é ainda menor. O presente trabalho tem como objetivo, avaliar o potencial do algoritmo QAA em estimar o espectro de absorção total na água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara, utilizando o mês de setembro (período seco) como referência.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de Estudo

O reservatório hidrelétrico de Itumbiara ($18^{\circ} 25' S$, $49^{\circ} 06' W$) está localizado no bioma cerrado, na divisa dos estados de Minas Gerais, no Triângulo Mineiro, e Goiás. Foi formado pelo represamento do Rio Paranaíba, resultando na inundação de seus principais tributários, os Rios Corumbá e Araguari (Figura 1).

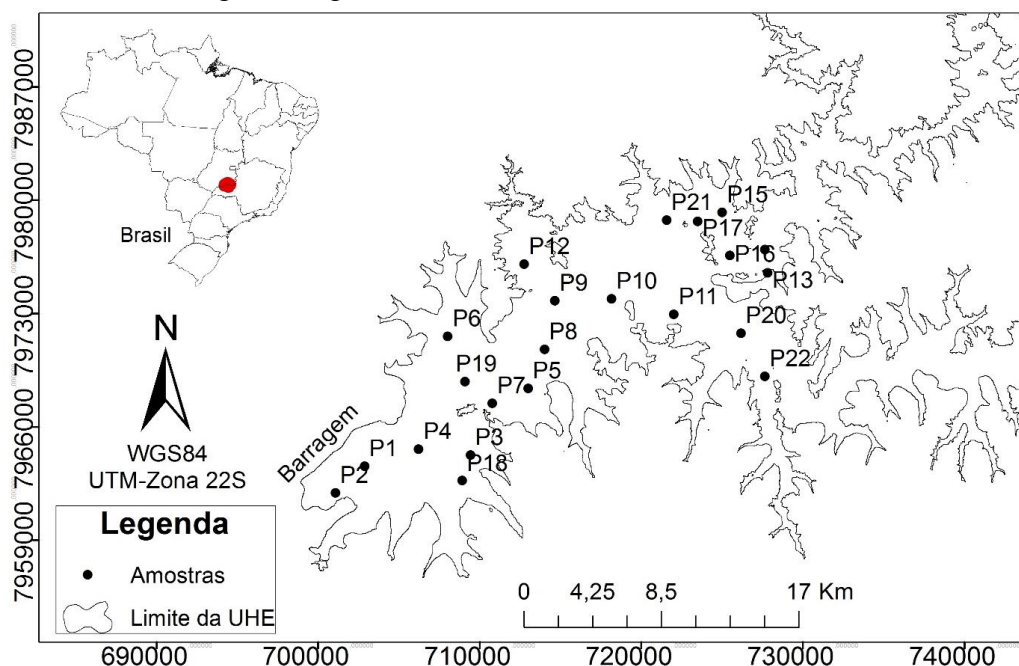


Figura 1. Localização do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO) e a distribuição espacial das 22 amostras realizadas em setembro de 2009.

2.2. Dados

Os dados foram coletados durante o período de vazante no reservatório, entre os dias 9, 10 e 11 de setembro de 2009 (ver Figura 1 para localização das amostras no reservatório). Nessa campanha de campo foram realizadas coletas de água para análise, e medidas radiométricas (Nascimento et al. 2011).

2.2.1. Variáveis Limnológicas

Amostras superficiais de água (~1m de profundidade), foram coletadas para a determinação dos seguintes parâmetros: concentração de Chl-*a*, material em suspensão orgânico e inorgânico, e carbono orgânico e inorgânico dissolvido. Também foram medidos dados auxiliares, tais como a temperatura da água, pH, concentração de oxigênio dissolvido, turbidez, e condutividade por meio das sondas multiparâmetros YSI e Horiba.

2.2.2. Dados Radiométricos

As medidas radiométricas acima da superfície da água (0+) foram realizadas por meio do radiômetro hiperespectral *Fieldspec Hand Held*, seguindo o protocolo de aquisição sugerido por Kampel et al. (2009), sem polarizador. Com o radiômetro *Fieldspec* foram realizadas 3 medidas da água, 3 medidas do céu e 3 medidas da placa de referência, em cada ponto amostral. Dentre essas medidas, foi escolhido o melhor conjunto de dados para o cálculo da R_{rs} , que foi calculada de acordo com Mobley (1999):

$$R_{rs} = \frac{L_w(0+)}{E_d(0+)} = \frac{L_u(0+)\rho L_{sky}(0+)}{E_d(0+)} \quad (1)$$

Onde $L_w(0+)$ é a radiância emergente da água; E_d é a irradiância plana espectral descendente que incide sobre a superfície do corpo d'água; L_u é a radiância ascendente que chega ao sensor; L_{sky} é a radiância incidente proveniente do céu; e ρ é o fator de proporcionalidade que relaciona a radiância medida pelo detector quando apontado para o céu com a radiância do céu refletida medida pelo detector quando este é apontado para a água.

2.3. Determinação dos coeficientes de absorção em laboratório

As amostras de água coletadas *in situ* foram utilizadas para determinação dos coeficientes de absorção do material particulado (fitoplâncton e partículas não algais), e da matéria orgânica dissolvida (CDOM), seguindo os protocolos de análise publicados pelo projeto *SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)*, Hooker; Esaias, 1993) da *National Aeronautics and Space Administration – NASA* (Mueller et al., 2002).

2.4. Estimativa do coeficiente de absorção total

A estimativa do coeficiente de absorção total (a_t) foi realizada por meio do algoritmo QAA_v5 (Lee et al. 2009). Em resumo o algoritmo estima empiricamente o (a_t) em um comprimento de onda de referência (λ_0), e então estima o coeficiente de retroespalhamento do material particulado em um comprimento de onda de referência, $b_{bp}(\lambda_0)$, por meio da relação entre a reflectância de sub-superfície $r_{rs}(\lambda)$ e as IOPs derivadas das equações de transferência radiativa.

2.5. Avaliação da estimativa do coeficiente de absorção total via QAA

A avaliação da estimativa do (a_t) por meio do algoritmo QAA será realizada via três indicadores estatísticos. Esses indicadores são, o erro percentual quadrático médio (%RMSE) em porcentagem, erro percentual absoluto médio (% ϵ) e o viés (δ).

$$\% RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \times \frac{100 \times n}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

$$\% \varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \times 100 \quad (3)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (4)$$

onde x representa o coeficiente de absorção total medido e o y representa o (a_t) estimado pelo QAA.

3. Resultados e Discussão

3.1. Contribuição Relativa dos COAs na Absorção

A Figura 2 mostra que para os comprimentos de onda de 443 e 560nm a componente a_{CDOM} é dominante; no entanto, a a_{phy} se torna importante para o comprimento de onda de 665nm (entre 50-68% de dominância). Para comprimentos de onda de 700nm é possível perceber que o a_{CDOM} já não exerce influência, passando a componente a_{NAP} a dominar a absorção da luz.

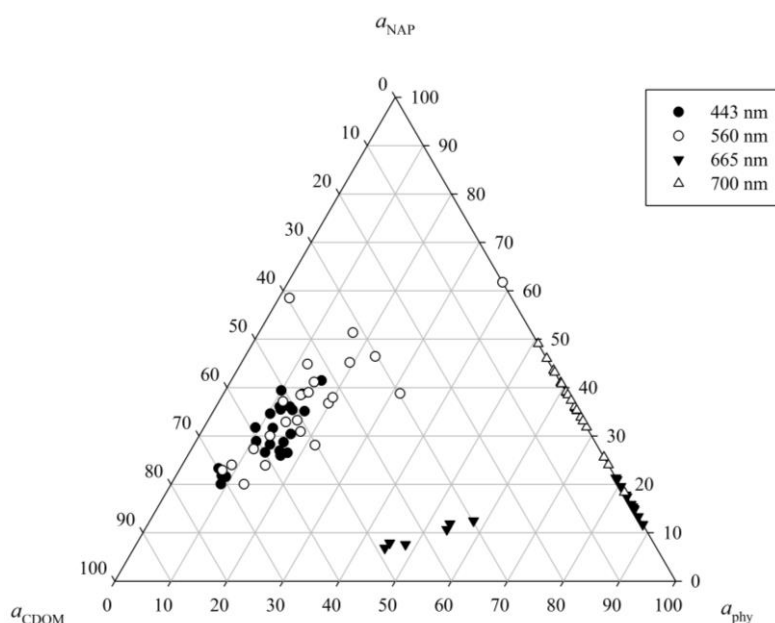


Figura 2. Diagrama ternário indicando a importância relativa de cada componente opticamente ativo para os comprimentos de onda de 443, 560, 665 e 700nm. Onde a_{phy} , a_{CDOM} e a_{NAP} , é a absorção pelo fitoplâncton, pelo material orgânico dissolvido e pelas partículas não algais, respectivamente.

A concentração média de Chl- a no reservatório é de $3,93 \mu\text{gL}^{-1}$, com desvio padrão de $\pm 3,03 \mu\text{gL}^{-1}$; o CDOM apresenta concentrações de $0,99$ a $2,59 \text{mgL}^{-1}$ e o TSS com concentrações médias de $1,12 \text{mgL}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,40 \text{mgL}^{-1}$ (Tabela 1). Os dados de profundidade Secchi (Secchi) mostram que a luz penetra até aproximadamente 7 metros, mas apresenta Secchi média de 5,50 metros. Essa variação na composição da água modula a intensidade e o formato dos espectros de R_{rs} .

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados limnológicos coletados durante a campanha de campo realizada em setembro de 2009 no reservatório de Itumbiara. Onde: Chl-*a*: é a concentração de clorofila (μgL^{-1}), TSS: é o total de sólidos em suspensão (mgL^{-1}), CDOM: é o carbono orgânico dissolvido (mgL^{-1}), Secchi: é a profundidade Secchi (m), Turb: é a turbidez da água (NTU), e pH: é o potencial hidrogeniônico.

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Chl- <i>a</i>	0,25	10,02	3,93	$\pm 3,03$
TSS	0,25	1,81	1,12	$\pm 0,40$
CDOM	0,99	2,59	1,16	$\pm 0,33$
Secchi	4,00	7,00	5,50	$\pm 0,82$
Turb	0,46	1,43	0,95	$\pm 0,21$
pH	6,29	7,90	6,99	$\pm 0,47$

3.2. Reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs})

As curvas de R_{rs} , amostradas em setembro de 2009, podem ser observadas na Figura 3. Os espectros de R_{rs} apresentam um pico entre 500 e 600nm, mostrando uma provável influência por sedimentos inorgânicos em suspensão, pois o espectro de águas dominadas por esse componente apresenta um aumento na R_{rs} , principalmente, na região entre 580 e 680 nm (Novo et al., 1991).

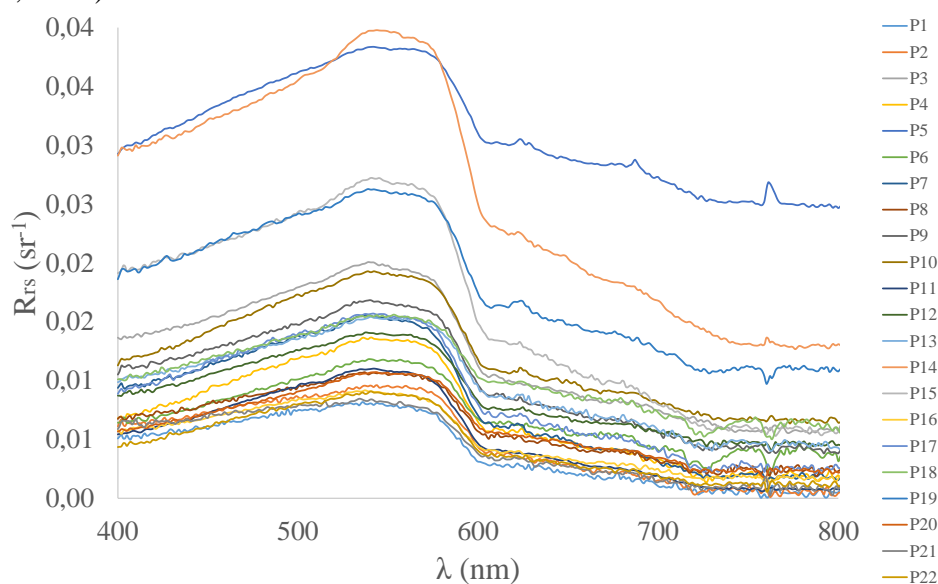


Figura 3. Espectros de R_{rs} obtidos *in situ* em setembro de 2009.

A resposta espectral do sedimento em suspensão também varia de acordo com sua granulometria, a origem e cor do sedimento, sendo que no intervalo de 550 a 570 nm é observado um espalhamento maior.

3.3. Coeficiente de absorção total (a_t) espectral determinado vs estimado

A Figura 4 mostra o (a_t) espectral medido e o estimado pelo algoritmo QAA. Em uma análise visual é possível verificar que o espectro obtido em laboratório (Fig. 4a) possui mais variabilidade entre os pontos em todos os comprimentos de onda; já o estimado (Fig. 4b) essa variabilidade é mais evidente nos menores comprimentos de onda ($\lambda < 550\text{nm}$) e a variabilidade diminui para $\lambda > 550\text{nm}$.

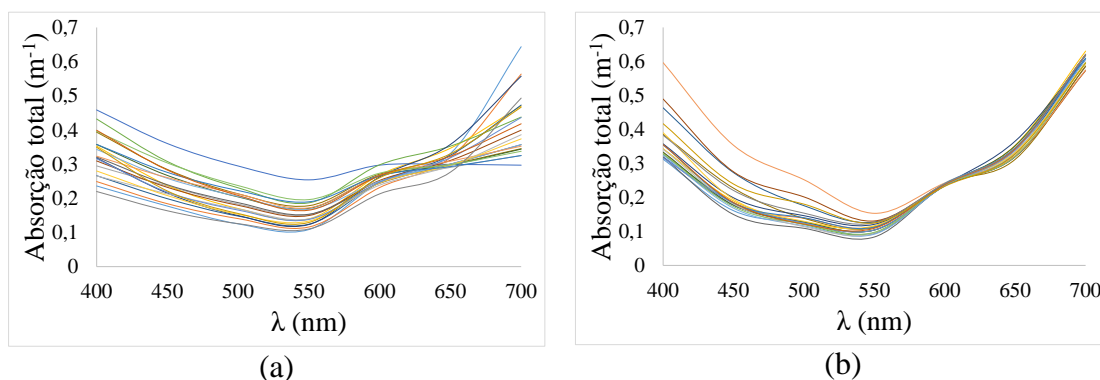


Figura 4. Coeficiente de absorção total determinado em laboratório (a) e o estimado via QAA (b).

A comparação entre a absorção medida e a estimada (Figura 5) por comprimento de onda mostra que o algoritmo QAA tende a superestimar nos comprimentos de onda 450, 500, 550 e 600nm, e a subestimar para os comprimentos de onda de 650 e 700nm.

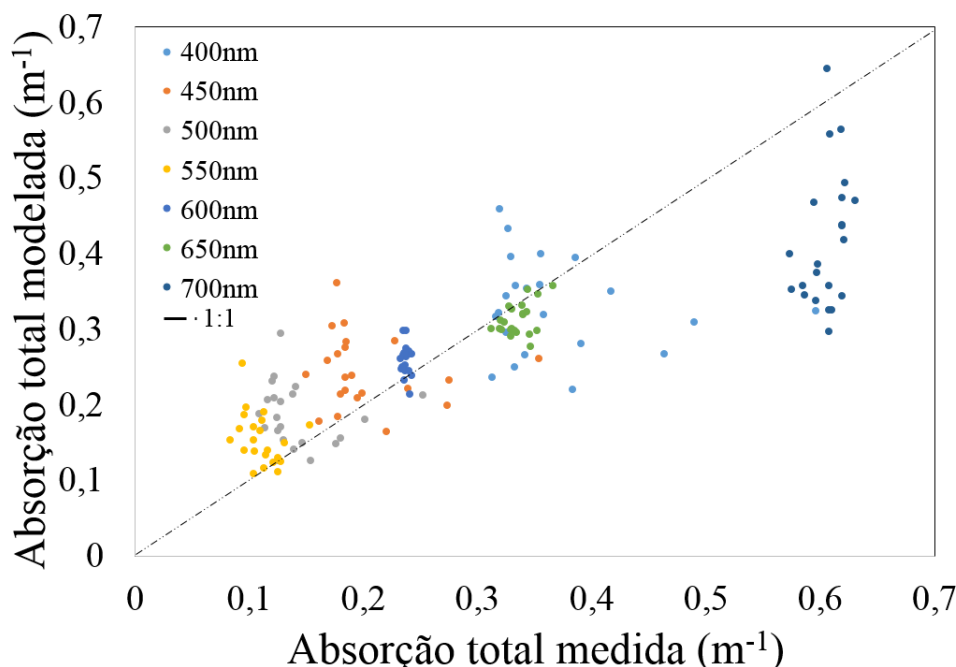


Figura 5. Comparação entre o coeficiente de absorção total medido e o estimado por comprimento de onda.

O comprimento de onda de 400nm apresentam pontos amostrais superestimando e subestimando, com maior dispersão. Já era esperado uma maior dispersão para os comprimentos de onda do azul (400nm) e do infravermelho (700nm), pois a análise qualitativa da Figura 4 mostrou uma diferença significativa para esses dois comprimentos de onda. A análise dos erros (Tabela 2) mostra que o QAA teve um %RMSE médio de 7,4%, um %ε médio de 30,60% e um δ médio de -0,0109, ou seja, em média o QAA subestimou as estimativas do coeficiente de absorção total (m^{-1}). Essa subestimativa está relacionada, em grande parte, pela estimativa para comprimentos de onda acima de 650nm.

O ponto amostral que apresentou o menor %RMSE foi o P1, localizado a aproximadamente 2km de distância da barragem, e o maior %RMSE foi o ponto amostral P5 localizado a aproximadamente 4,5km da barragem (ver Figura 2 para localização dos pontos amostrais).

Tabela 2. Resumo da estatística básica do erro percentual quadrático médio (%RMSE) em porcentagem, erro percentual absoluto médio (% ϵ) e o viés (δ) entre a absorção medida e a estimada via QAA.

	%RMSE	% ϵ	δ
Mínimo	1,73	9,04	-0,0747
Máximo	14,35	86,49	0,0608
Média	7,40	30,60	-0,0109
Desvio Padrão	$\pm 2,9373$	$\pm 19,3953$	$\pm 0,0328$

Esse maior erro no P5 pode estar relacionado à baixa concentração de TSS ($0,25 \text{ mg L}^{-1}$) e baixa concentração de Chl-*a* ($1,43 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$), se comparado ao P1 (TSS = $4,25 \text{ mg L}^{-1}$, Chl-*a* = $1,81 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ e COD = $1,055 \text{ ppm}$). As concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) não parecem exercer tanta influência nesses dois casos, pois os valores foram $1,055 \text{ ppm}$ e $1,056 \text{ ppm}$, para os pontos P1 e P5, respectivamente.

Conforme mostra a Figura 5, os maiores erros estão nas estimativas dos (a_t) para o comprimento de onda de 700nm ; seguido pelo comprimento de onda de 400nm . O erro associado ao comprimento de onda próximo a 400nm pode estar relacionado à absorção pelo CDOM, pois como mostra a Figura 1, para esse comprimento de onda o reservatório é dominado pelo a_{CDOM} . Para o comprimento de onda de 700nm devido à maior absorção da água, o que domina é o processo de espalhamento devido a partículas em suspensão; ou seja, quanto maior a concentração de TSS, maior deve ser a absorção (Dekker, 1993). A Figura 1 mostra que nesse comprimento de onda o a_{NAP} é dominante. Isso mostra que o QAA não tem sensibilidade para resolver esse aumento da absorção, em ambientes com maior turbidez (se comparado a águas do caso I).

Segundo Le et al. (2009) e Yang et al. (2013) existem pelo menos 2 problemas da aplicação do QAA_v5 (Lee et al. 2009) em sistemas aquáticos continentais associados à estimativa da (a_t): (1) o comprimento de onda de referência utilizado para a estimativa da (a_t), $\lambda=555 \text{ nm}$, o qual é obtido via dados sintéticos; (2) a estimativa do parâmetro $Y (= 2 \times (1 - 1,2 \times \exp(-0,9 \times (rrs^{440}/rrs^{555})))$), o qual foi calibrado utilizando dados sintéticos do NOMAD (NASA bio-optical Marine Algorithm Dataset).

O parâmetro Y é utilizado para estimar o retroespalhamento do material particulado (b_{bp}), e consequentemente do espectro de (a_t); o que promove a propagação do erro para os maiores comprimentos de onda. Lee et al. (2002) reportaram que a variação do parâmetro Y deve ter baixa influência na estimativa do espectro de (a_t), no entanto, Yang et al. (2013) mostraram que o uso do comprimento de onda de referência deslocado para o infravermelho, esse parâmetro exerce influência significativa na estimativa do espectro de (a_t).

Le et al. (2009) e Yang et al. (2013) sugerem que para águas interiores o comprimento de onda de referência deve ser deslocado para o infravermelho ($\lambda=780$ e 753 nm , respectivamente). Nos sistemas aquáticos continentais brasileiros ainda não foram realizadas pesquisas com o objetivo de identificar o comprimento de onda de referência para estimativas do espectro de (a_t) com o menor erro possível.

4. Considerações Finais

Esse trabalho levantou a hipótese de que o QAA apresenta sensibilidade para a estimativa do espectro de (a_t), em sistemas aquáticos de baixa produtividade e alta transparência. Os resultados preliminares, obtidos nesse trabalho, mostram que o QAA parece ser adequado para a estimativa do espectro de (a_t) para $\lambda \leq 500\text{nm}$; para comprimentos de onda acima de

500nm, o QAA passa a não apresentar sensibilidade adequada para ambientes do caso II. O componente que domina em λ próximos a 700nm é o a_{NAP} , e conseqüentemente pode ser o responsável pelo maior erro observado para esse comprimento de onda. O QAA não é sensível a ambientes com concentrações elevadas de partículas não algais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão de recursos por meio do processo número 2013/12159-4.

Referências

Dekker, A G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. PhD theses, Free University, Amsterdam, 1993. p.260.

Gilerson, A.A.; Gitelson A.A.; Zhou, J.; Gurlin, D.; Moses, W.; Ioannou, I.; Ahmed, S.A. Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. **Optics Express**. v. 18, n. 23, p. 24109-24125, 2010.

Hooker, S. B.; Esaias, W.E. An overview of the SeaWiFS project. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v. 74, n. 21, p. 241–246, 1993.

International Ocean Colour Coordinating Group - IOCCG. **Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications**. Report Number 5. 2006. 126 p.

Kampel, M.; Lorenzetti, J.A.; Bentz, C.M.; Nunes, R.A.; Paranhos, R.; Rudorff, F.M.; Politano, A.T. Simultaneous Measurements of Chlorophyll Concentration by Lidar, Fluorometry, above-Water Radiometry, and Ocean Color MODIS Images in the Southwestern Atlantic. **Sensors**. v. 9, n. 1, p. 528-541, 2009.

Le, C.F.; Li, Y.M.; Zha, Y.; Sun, D.; Yin, B. Validation of a Quasi-Analytical Algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Taihu Lake, China. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**. v. 47, n. 8, p. 2492-2500. 2009.

Lee, Z.; Carder, K.; Arnone, R.A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. **Applied Optics**. v. 41, n. 27, p. 5755-5772. 2002.

Lee, Z.; Lubac, B.; Werdell, J.; Arnone, R. **An update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA v5)**, available at: <http://www.ioccg.org/groups/Software/OCA/QAA/v5.pdf>, 2009.

Li, L.; Li, L.; Song, K.; Li, Y.; Tedesco, L.P.; Shi, K.; Li, Z. An inversion model for deriving inherent optical properties of inland waters: Establishment, validation and application. **Remote Sensing of Environment**. v. 135, n. 150-166, 2013.

Mobley, C.D. Estimation of the remote sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, v. 38, n. 36, p. 7442-7455, 1999.

Mueller, J. L.; Fargion, G. S.; McClain, C. R. **Oceans optics protocols for satellite ocean color sensor validation**. Revision 4, volume IV: Inherent optical properties. Greenbelt: NASA, 2002. 76 p.

Nascimento, R.; Alcântara, E.; Kampel, M.; Stech, J. Limnological characterization of the Itumbiara hydroelectric reservoir, Goiás, Brazil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 6, n. 2, p. 143-156, 2011.

Yang, W.; Matsushita, B.; Chen, J.; Yoshimura, K.; Fukushima, T. Retrieval of inherent optical properties for turbid inland waters from remote sensing reflectance. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**. v. 51, n. 6, p. 3761-3773. 2013.

Wernand, M.R.; Van der Woerd, H.; Gieskes, W.W.C. Trends in Ocean Colour and Chlorophyll concentration from 1989 to 2000. **Plos One**. v. 8, n. 6, p. 1-20. 2013.