

## Uso de propriedades ópticas aparentes e inerentes para a classificação da massa d'água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO)

<sup>1</sup>Enner Alcântara  
<sup>2</sup>Renata Nascimento  
<sup>2</sup>Milton Kampel  
<sup>2</sup>José Luiz Stech

<sup>1</sup>Departamento de Cartografia  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT  
Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP  
Campus de Presidente Prudente  
E-mail: enner@fct.unesp.br

<sup>2</sup>Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos, SP  
E-mail: {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 is, interact with light in different ways in function of their nature and concentration. The quantitatively interpretations of the detected signal by remote sensors in terms of water components require to be identified and isolated the effects caused by variations in the incident light field over the remotely detected signal. Optical property of inland water varies spatially and temporally corresponding to change of concentrations of water components. The same water type classified by optical property may have uniform character which may make water components deriving algorithm simpler and accuracy. Thereupon, the water colour modeling aims to express the remote sensing reflectance in terms of Inherent Optical Properties (IOPs), such as total absorption coefficient. The development of models for deriving IOPs from Apparent Optical Properties (AOPs) have been essential for achieving determinations of water IOPs. The study of IOPs is very important because these properties allow to access the water quality and primary production in aquatic systems. The objective of this paper was to use the IOPs and AOPs to classify and explain the water type of the Itumbiara hydroelectric reservoir. The results shows that the Itumbiara's water is dominated by detritus, allowing their classification water type case II.

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

### 1. Introdução

As propriedades ópticas aparentes (POAs) são aquelas que dependem da distribuição angular do campo de luz e da natureza e quantidade das substâncias presentes no meio. Elas mostram feições regulares e estabilidade suficientes para serem úteis na descrição de um corpo d'água. Entre essas propriedades estão a refletância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ ) e o coeficiente de atenuação difusa da irradiância descendente ( $k_d$ ). A  $R_{rs}$  é uma medida de quanto da luz que incide na superfície da água retorna para a atmosfera, permitindo assim a sua detecção por um sensor (Mobley, 1999). Já o  $k_d$  é usado em modelos de penetração da luz, pois define a taxa de diminuição da irradiância descendente com a profundidade (Kampel; Novo, 2005).

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 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 (Kampel; Novo, 2005). As POIs fundamentais são, o coeficiente de absorção ( $a$ ) e o retroespalhamento ( $b_b$ ).

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 (IOCCG, 2000; Kampel; Novo, 2005). Estes são os principais componentes opticamente ativos (COAs) que afetam os coeficientes de absorção e o espalhamento na água.

Essas substâncias presentes na água apresentam comportamentos espectrais diferentes, interferindo assim de maneira diversa nas propriedades ópticas da água. De acordo com Morel e Prieur (1977), os tipos de água podem ser divididos em águas do Caso I e águas do Caso II. Essa classificação foi mais tarde refinada por Gordon e Morel (1983). Pela definição, águas do Caso I são águas em que o fitoplâncton é o principal agente responsável pelas variações nas propriedades ópticas da água. Já as águas do Caso II são influenciadas não só por esse grupo de organismos e partículas relacionadas, mas também por outras substâncias que variam independentemente, principalmente partículas inorgânicas em suspensão e substâncias amarelas (matéria orgânica dissolvida). Com isso, o sensoriamento remoto de águas do Caso II, águas costeiras e continentais, impõe demandas adicionais aos sensores: a relação entre as concentrações dos componentes aquáticos e a cor da água não é linear, e, portanto é necessário explorar pequenas mudanças no sinal para alcançar informações úteis.

Baseado nisto, o objetivo deste artigo é classificar a massa d'água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO).

## 2. Metodologia de Trabalho

### 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).

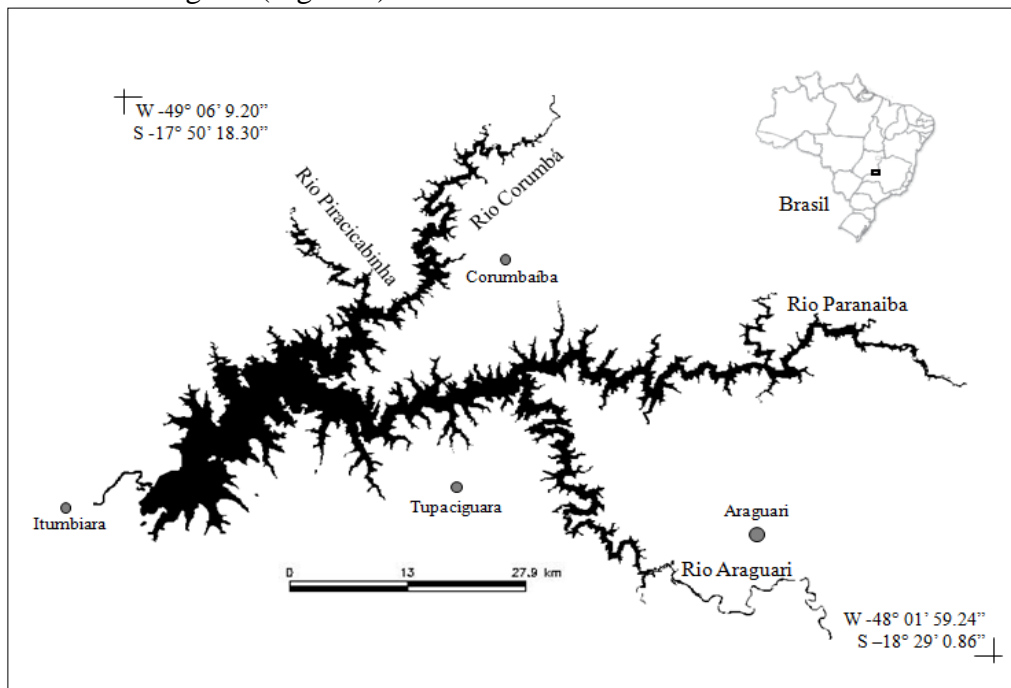


Figura 1: Localização do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO).

Possui forma dendrítica, com 778 km<sup>2</sup> de área inundada e um volume total de 17 bilhões m<sup>3</sup>, podendo ser assim classificado como um reservatório de alta capacidade. A profundidade varia entre 0,5 m e 78 m, com profundidade média de 32 m, sendo que as áreas mais profundas ocorrem próximas à barragem e na região central do corpo principal do reservatório. O clima da região do reservatório é caracterizado por duas estações bem definidas sendo, uma estação seca que vai de abril a setembro e uma estação chuvosa que vai de outubro a março, com precipitação média de 2 mm e 315 mm, respectivamente (Alcântara et al. 2010).

## 2.2. Dados

### 2.2.1. Campanhas de Campo

Dois campanhas de campo foram realizadas na área de estudo, sendo uma no período de cheia do reservatório (12 e 13 de maio de 2009) e outra no período de vazante (9, 10 e 11 de setembro de 2009). Durante as campanhas de campo foram realizadas coletas de água para análise, e medidas radiométricas (Nascimento, 2010).

### 2.2.2. Variáveis Limnológicas

Amostras superficiais de água (25 pontos amostrais em maio e 23 em setembro), em torno de 1 m de profundidade, foram coletadas para a determinação dos seguintes parâmetros: concentração de clorofila-*a*, material em suspensão orgânico e inorgânico, e carbono orgânico e inorgânico dissolvido. Também foi medida a temperatura da água, pH, concentração de oxigênio dissolvido, turbidez, e condutividade através das sondas multiparâmetros YSI e Horiba.

### 2.2.3. Dados Radiométricos

As medidas radiométricas (6 pontos amostrais em maio e 23 em setembro) acima da superfície da água foram realizadas por meio do radiômetro hiperespectral *Fieldspec Hand Held*, seguindo o protocolo de aquisição sugerido por Fougnie et al. (1999), 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 Kampel et al. (2009):

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

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 (calculado de acordo com Mobley, 1999);  $L_u$  é a radiância ascendente que chega ao sensor;  $L_{sky}$  é a radiância incidente proveniente do céu; e  $\rho$  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.

### 2.2.4. Determinação do Coeficiente de Absorção

Amostras de água (25 pontos amostrais em maio e 23 em setembro) foram utilizadas para determinação dos coeficientes de absorção do material particulado (fitoplâncton e detritos), 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).

### 3. Enfoque Metodológico

O coeficiente de absorção espectral  $a(\lambda)$  de um corpo d'água pode ser descrito em termos da contribuição aditiva dos constituintes opticamente ativos da água ( $w$ ), partículas ( $p$ ) e material dissolvido ( $g$ ), conforme a seguinte equação:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_g(\lambda) \quad (2)$$

sendo que o componente particulado ainda pode ser dividido da seguinte forma:

$$a_p(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) \quad (3)$$

Onde  $a_{ph}$  e  $a_d$  são os coeficientes de absorção específicos do fitoplâncton e detritos, respectivamente (IOCCG, 2006).

A partir dos valores dos coeficientes de absorção específicos dos COAs estabelecidos por filtração e leitura de amostras coletadas em campo, foi construído um diagrama triangular indicando a contribuição relativa de cada componente na água do reservatório. Essa classificação é baseada nas contribuições relativas dos três tipos de substâncias e não depende da magnitude das contribuições individuais. A contribuição da água pura não entra na classificação, já que seu coeficiente de absorção é uma propriedade óptica constante.

Assim, as amostras foram classificadas com base nas contribuições relativas dos três componentes opticamente ativos, no comprimento de onda de 440 nm (comprimento de onda no qual todos os componentes são opticamente importantes) (Prieur; Sathyendranath, 1981), e os resultados foram plotados em um diagrama triangular. Esse procedimento foi realizado para 20 pontos amostrais em maio e 23 pontos em setembro.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Caracterização limnológica

Uma estatística descritiva dos dados limnológicos coletados durante os campos de maio e setembro de 2009 é apresentada na Tabela 1. A partir desses resultados é possível identificar uma maior transparência da água no mês de setembro, e consequentemente uma menor turbidez, assim como uma maior concentração de clorofila.

Tabela 1: Estatística descritiva dos dados limnológicos coletados nas campanhas de campo em maio e setembro de 2009 no reservatório de Itumbiara. Onde: Chl-*a*: é a concentração de clorofila ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ), TSS: é o total de sólidos em suspensão ( $\text{mg L}^{-1}$ ), CDOM: é o carbono orgânico dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), CID: é o carbono inorgânico dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), Secchi: é a profundidade Secchi (m), Turb: é a turbidez da água (NTU), Temp: é a temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH: é o potencial hidrogeniônico.

Parâmetros	Mínimo		Máximo		Média		Desvio padrão	
	Maio	Setembro	Maio	Setembro	Maio	Setembro	Maio	Setembro
Chl- <i>a</i>	0,88	0,25	2,70	10,02	1,56	3,93	$\pm 0,41$	$\pm 3,03$
TSS	0,60	0,25	1,54	1,81	1,04	1,12	$\pm 0,25$	$\pm 0,40$
CDOM	0,53	0,99	1,17	2,59	0,78	1,16	$\pm 0,15$	$\pm 0,33$
CID	2,46	3,08	3,22	3,76	2,90	3,27	$\pm 0,16$	$\pm 0,19$
Secchi	2,00	4,00	6,00	7,00	4,18	5,50	$\pm 1,08$	$\pm 0,82$
Turb	1,40	0,46	6,30	1,43	2,68	0,95	$\pm 1,40$	$\pm 0,21$
Temp	25,45	24,8	31,40	25,9	26,79	25,28	$\pm 1,07$	$\pm 0,37$
pH	7,48	6,29	7,90	7,90	7,63	6,99	$\pm 0,13$	$\pm 0,47$

Também há uma maior concentração de carbono orgânico e inorgânico dissolvido. Os valores médios de pH e temperatura da água diminuíram em relação aos valores encontrados em maio. O desvio padrão da concentração de clorofila-*a* é aproximadamente 7 vezes maior em setembro se comparado aos dados de maio. Esse desvio é menor para o total de sólidos em suspensão, mas em setembro o desvio ainda é maior do que em maio. O mesmo acontece para o carbono orgânico e inorgânico dissolvido, e o pH. O desvio padrão só é maior em maio para a profundidade Secchi, a turbidez e a temperatura da água.

#### 4.1. Análise do coeficiente de absorção

A Figura 2 mostra as curvas de absorção encontradas nos meses de maio e setembro. Pode-se observar uma maior homogeneidade nos dados no período de coleta do mês de setembro. Algumas curvas de absorção por detritos e CDOM do mês de maio apresentam maiores valores, se destacando das demais. Na absorção por detritos essas curvas se referem a pontos amostrais localizados próximos à barragem.

Já para a absorção por CDOM, a curva com maiores valores de absorção se refere ao ponto amostral localizado na região do rio Corumbá. Para os dados de absorção do fitoplâncton observa-se a influência de outros pigmentos fitoplanctônicos, além da clorofila-*a*, no mês de maio. Em setembro, esse pigmento é dominante.

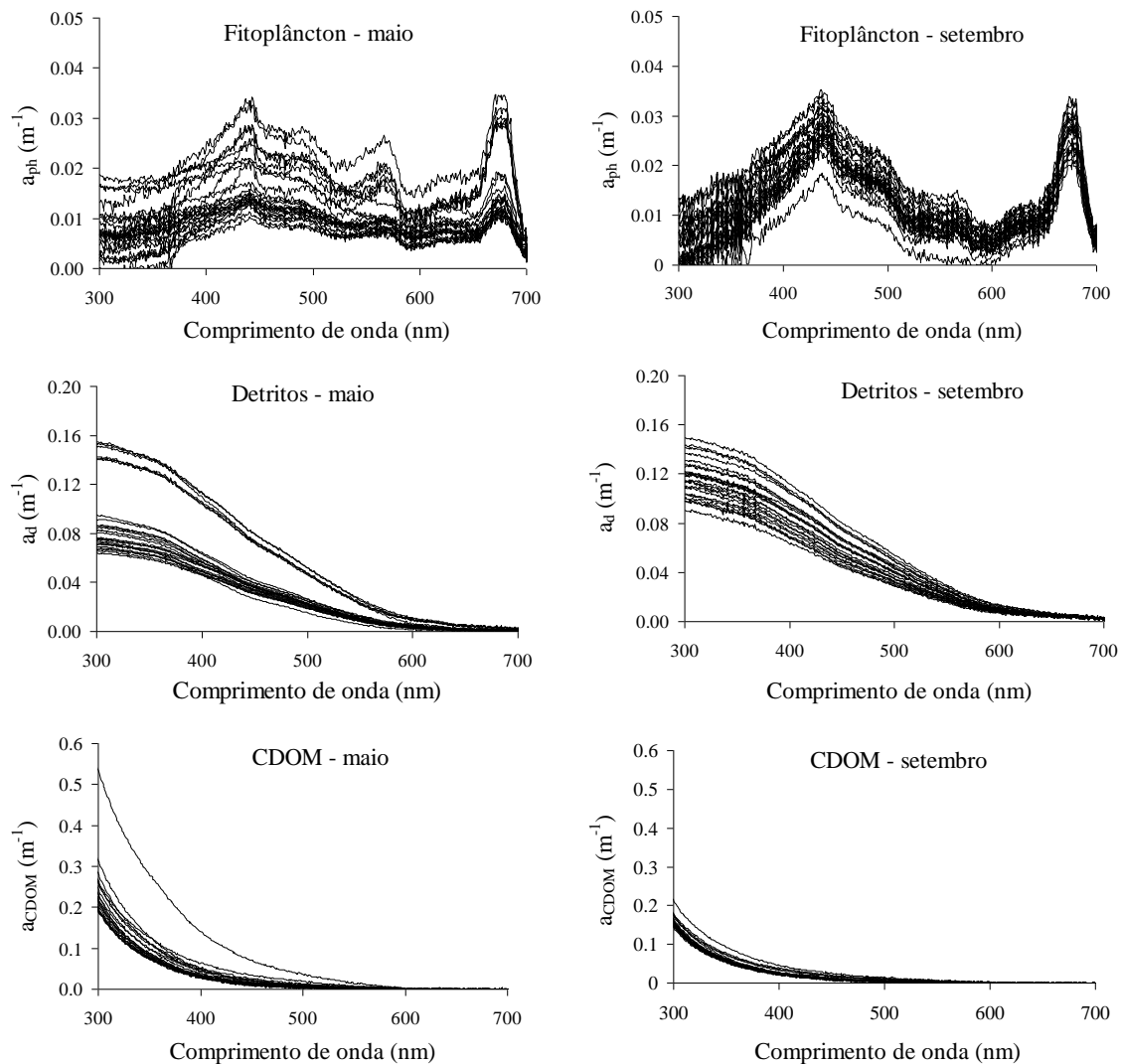


Figura 2. Espectros de absorção dos componentes opticamente ativos no reservatório de Itumbiara, para os meses de maio e setembro de 2009.

#### 4.2. Análise da reflectância de sensoriamento remoto

As curvas de  $R_{rs}$  coletadas em maio e setembro podem ser observadas na Figura 3. Para os dois períodos de coleta, as curvas apresentaram um pico entre 500 e 600  $nm$ , mostrando uma provável influência por sedimentos inorgânicos em suspensão, pois o espectro de águas dominadas por esse componente apresenta um aumento na reflectância, principalmente, na região entre 580 e 680  $nm$  (Novo et al., 1991). A resposta espectral do sedimento em suspensão também varia de acordo com sua granulometria e a origem e cor do sedimento, sendo que no intervalo de 550 a 570  $nm$  é observado um espalhamento maior (Gitelson; Keydan, 1990).

No mês de setembro, observa-se um achatamento do pico; Goodin et al. (1993), demonstraram, ao estudar a resposta fitoplancônica, que as curvas de reflectância sofrem um deslocamento de um pico bem definido em 550  $nm$ , quando a água está pouco turbida, para um pico mais extenso e achatado que vai de 550  $nm$  a 650  $nm$  em águas com níveis mais altos de turbidez. Esse resultado mostra o mascaramento do pico na faixa do verde devido aos sedimentos em suspensão.

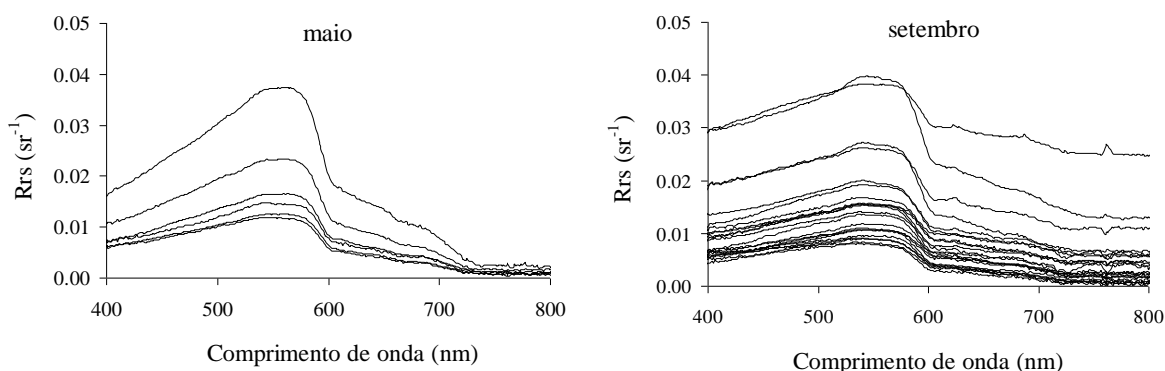


Figura 3. Espectros de  $R_{rs}$  obtidos *in situ* nos meses de maio e setembro de 2009.

#### 4.3. Análise da contribuição relativa dos COAs

A partir dos coeficientes de absorção dos componentes opticamente ativos da água, foi construído um diagrama triangular, indicando as importâncias relativas de cada componente, para as duas saídas de campo. A Figura 4 mostra qual o componente dominante nos dois períodos de coleta.

Nos dois períodos de coleta, fica evidente a dominância por detritos, ou seja, a parte inorgânica do material particulado. No mês de maio algumas amostras indicam uma maior contribuição de matéria orgânica dissolvida. Esse resultado corrobora os dados de  $R_{rs}$  medidos em campo, demonstrados na Figura 3. Em praticamente todas as amostras analisadas, em maio e setembro, os detritos contribuíram com mais de 50% para a absorção total (descontando-se àquela pela água pura).

O fitoplâncton contribui, em média, com um pouco mais de 20% de todas as coletas. O CDOM apresentou a menor contribuição relativa, ficando abaixo dos 40% em maio, e dos 25% em setembro. Essa aparente maior contribuição do CDOM em maio se deve ao fato de duas amostras apresentarem valores altos de contribuição relativa, cujos pontos amostrais se localizam próximos ao rio Corumbá. De acordo com a metodologia proposta por Prieur e Sathyendranath (1981), a água do reservatório de Itumbiara pode ser classificada como do Caso II, dominada por detritos.

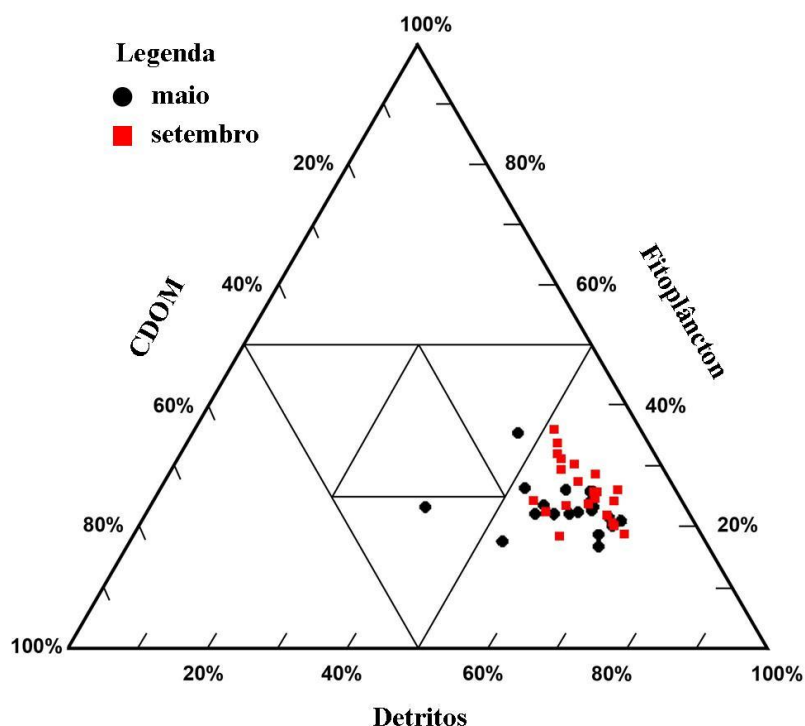


Figura 4. Diagrama ternário indicando a importância relativa de cada componente opticamente ativo. Círculos pretos indicam dados do mês de maio, e quadrados vermelhos indicam dados do mês de setembro.

## 5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo classificar a massa d'água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara por meio das propriedades ópticas aparentes e inerentes.

Os dados limnológicos coletados em campo indicam que o reservatório de Itumbiara apresenta água bastante clara, com pouca concentração de clorofila e sólidos em suspensão. Estes dados também mostram uma forte influência do rio Corumbá no reservatório, principalmente no período de cheia. Já o rio Paranaíba pode ser visto como uma fonte de clorofila para o reservatório, principalmente no período de vazante.

De acordo com os resultados encontrados da análise de dados *in situ*, conclui-se que o componente opticamente ativo dominante no reservatório de Itumbiara é o material particulado inorgânico, nos dois períodos de coleta, cheia e vazante. Isto é demonstrado pelo diagrama triangular, que indica as importâncias relativas de cada COA, construído para os dois períodos. A água do reservatório pode ser classificada como sendo do Caso II.

## Referências Bibliográficas

Alcântara, E.H.; Stech, J.L.; Lorenzetti, J.A.; Bonnet, M-P.; Casamitjana, X.; Assireu, A.T.; Novo, E.M.L.M. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2651-2665. 2010.

Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P. Y. Reduction of Skylight Reflection Effects in the Above-Water Measurement of Diffuse Marine Reflectance. **Applied Optics**, v. 38, n. 18, p. 3844-3856, 1999.

Gitelson, A. A.; Keydan, G. P. Remote sensing of inland surface water quality - measurements in the visible spectrum. **Acta hydrophys**, v. 34, n. 1, p. 5-27, 1990.

Goodin, D. G.; Han, L.; Fraser, R. N.; Rundquist, C.; Stebbins, W. A.; Schalles, J. F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogramm. Eng. Remote Sensing**, v. 59, n. 4, p. 505-510, 1993.

Gordon, H. R.; Morel, A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: A review. **Lecture Notes on Coastal Estuarine Studies**, v. 4, p. 114, 1983.

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 ocean colour in coastal, and other optically-complex waters**. Report Number 3. 2000. 139 p.

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.; Novo, E. M. L. M. O Sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R. B. (ed.) **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 12, p.179-196, 2005.

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, p. 528-541, 2009.

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

Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean colour. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

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. F. F. **Utilização de dados MERIS e *in situ* para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO**. 2010. 113 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.15.18.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3769MUL>>. Acesso em: 17 ago. 2012.

Novo, E. M. L. M.; Steffen, C. A.; Braga, C. Z. F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance total suspended solids. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n. 1, p. 67-72, 1991.

Prieur, L.; Sathyendranath, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 4, p. 671-689, 1981.