

COMPARTIMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO BIO-ÓPTICA POR SATÉLITE DAS ÁGUAS DE SUPERFÍCIE DO RESERVATÓRIO DE ITUMBIARA (GO)

Gabriel Moiano CESAR¹

Milton KAMPEL²

José Luiz STECH³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a bio-óptica e a compartimentação das águas de superfície do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO), do sistema FURNAS. Dados *in situ* de turbidez e concentração de clorofila coletados concomitantes com dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) foram utilizados para gerar modelos empíricos de estimativa destas variáveis limnológicas. A aplicação destes modelos e de testes estatísticos permitiu compartimentar o reservatório em 3 regiões: Corpo do reservatório, Braço do rio Araguari e uma terceira formada pelos braços dos rios Corumbá e Paranaíba. Uma série temporal de 18 meses de imagens MODIS médias de 8 dias foi analisada pela técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) de modo a diferenciar os componentes opticamente ativos (COA) nas águas do reservatório. Os resultados obtidos por esta análise indicaram que no período de seca há dominância de matéria orgânica dissolvida colorida e no período de cheia houve variação da dominância dos COA. O uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimativas indiretas de variáveis limnológicas como turbidez e clorofila se mostrou eficiente para a caracterização e compartimentação das águas superficiais de um reservatório tropical.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. MODIS. Reservatório tropical. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Modelo empírico.

Abstract

Partitioning and bio-optical characterization through satellite of the Itumbiara reservoir surface water (GO, Brazil)

The aim of this work is the bio-optical characterization and partitioning of the Itumbiara hydroelectric reservoir surface water (Goiás State, Brazil) of FURNAS System. In situ data of turbidity and chlorophyll concentration collected concurrently with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor data were used to generate empirical models for estimating these limnological variables. The application of these models and statistical tests allowed a partitioning of the reservoir in three compartments: Reservoir Body, Araguari river arm and a third area formed by the arms of Corumbá and Paranaíba rivers. A series of 18 months of MODIS 8 days composition reflectance was analyzed by the technique of spectral linear mixture analysis (SLMA) to distinguish the optically active components in the water of the reservoir. The results of this analysis indicated that during the dry season there is dominance of colored dissolved organic matter and during the rainy season there is a significant variation of the dominance of optically active components. The use of remote sensing techniques for indirect estimation of limnological variables such as turbidity and chlorophyll concentration proved efficient for the characterization and partitioning of surface water from a tropical reservoir.

Key words: Remote sensing. MODIS. Tropical reservoir. Spectral linear mixture analysis (SLMA). Empirical model.

¹ Mestre em Sensoriamento Remoto pelo programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. E-mail: moiano@dsr.inpe.br

² Pesquisador - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação Geral de Observação da Terra, Divisão de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. E-mail: milton@dsr.inpe.br

³ Pesquisador - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação Geral de Observação da Terra, Divisão de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos - SP. Av dos Astronautas, 1.758, São José dos Campos - SP. CEP: 12227-010. E-mail: stech@dsr.inpe.br

INTRODUÇÃO

Uma questão importante para a compreensão de padrões em reservatórios é a caracterização bio-óptica de suas massas d'água opticamente diferenciáveis (NASCIMENTO et al., 2011). De acordo com Thorton (1990), os reservatórios podem ser divididos em zona de influência do rio, zona de transição e zona lacustre. Deve-se enfatizar que os limites entre essas zonas são freqüentemente difíceis de delimitar e esses locais muitas vezes são instáveis em diferentes períodos. A fluidez da água e a heterogeneidade das respostas às variações sazonais das condições ambientais nas diferentes zonas que compõem o reservatório dificultam a definição de compartimentos dentro desses ambientes.

Na zona de transição dos reservatórios ocorre redução na velocidade da água e conseqüente sedimentação de material carregado pelo fluxo. À medida que se aproxima da barragem, observa-se uma diminuição da concentração de sedimentos estabelecendo-se um gradiente longitudinal tipicamente observado nos períodos de chuvas (LEITE, 1998; MENDONÇA, 2007; ZANATA; ESPINDOLA, 2002).

De modo geral, os ecossistemas lóticos são caracterizados por gradientes longitudinais havendo interferência da morfologia, velocidade do fluxo, temperatura da água e tipo de substrato que formam a bacia. Já os gradientes verticais de luz, temperatura, substâncias dissolvidas, processos de produção e decomposição são fatores primários que interferem nas características de ambientes lênticos. Em virtude da natureza híbrida dos reservatórios, estes apresentam gradientes horizontais e verticais dos fatores abióticos que delimitam sua produção primária, que pode ser definida como a quantidade de matéria orgânica sintetizada pelos organismos fotossintéticos (i.e. concentração de clorofila). É importante ter noção dessa característica híbrida dos reservatórios para se fazer interpretações quanto à heterogeneidade espacial das variáveis limnológicas observadas nesses ambientes (THORNTON, 1990).

A compartimentação aquática é uma forma de individualizar áreas em reservatórios que contenham um mesmo padrão limnológico. A compreensão da compartimentação aquática é fundamental para o planejamento da amostragem e elaboração de modelos (TUNDISI, 1988). O comportamento espectral de águas naturais varia em função dos componentes opticamente ativos presentes nela, sendo os principais: clorofila (CLO), material particulado inorgânico em suspensão (MPI) e matéria orgânica dissolvida colorida (MOD).

A turbidez é uma variável limnológica que pode ser empregada para medir a capacidade de dispersão da radiação incidente em um corpo de água, estando relacionada à presença de material em suspensão. Pode ser considerada também, como o oposto da transparência. O coeficiente de atenuação vertical da luz calculado em função dos valores de transparência é uma medida indireta da atenuação da radiação solar que penetra a água e varia em função dos compostos dissolvidos ou em suspensão na mesma (WETZEL, 2001). O sensoriamento remoto tem contribuído na realização de estudos de ambientes aquáticos permitindo identificar a gênese e o deslocamento dessas substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas nesses ambientes (RUDORFF, 2006).

Apesar da grande quantidade de reservatórios brasileiros, ainda existe relativa escassez de trabalhos sobre compartimentação e caracterização bio-óptica. Os dados orbitais representam uma importante ferramenta para esse tipo de estudo, pois disponibilizam informações que facilitam o entendimento de padrões, tendências e interações sobre extensas áreas. É importante notar que apesar de todas as vantagens do uso do sensoriamento remoto, as informações colhidas em campo são essenciais para a validação dos dados orbitais. Além das campanhas convencionais, os dados de boias e plataformas de coleta de dados desempenham um papel fundamental nesse tipo de trabalho.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é caracterizar bio-opticamente um reservatório tropical, utilizando uma série temporal de dados orbitais do sensor *Moderate Resolution*

Imaging Spectroradiometer (MODIS) e dados *in situ* para descrever os padrões sazonais de compartimentação observados entre 09/2009 e 03/2011.

ÁREA DE ESTUDO

Para a realização deste estudo, foi selecionado o reservatório de Itumbiara (GO), localizado na região do Cerrado brasileiro, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Goiás (18°25'S-49°06'W). O reservatório de Itumbiara é formado pelo represamento dos rios Paranaíba, Araguari e Corumbá. Possui forma dendrítica, com 778 km² de área inundada (Figura 1). Localizada no rio Paranaíba, entre os municípios de Itumbiara (GO) e Araporã (MG), a Usina Hidroelétrica de Itumbiara é a maior usina do sistema FURNAS. A região do reservatório está contida na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. O relevo dessa bacia é marcado por altiplanos cuja altitude varia entre 1.000 e 1.100 m e pelo divisor de bacias localizado entre a Chapada da Ponte Firme e a Serra da Canastra, ambas no noroeste de Minas Gerais. Nesta área montanhosa da bacia estão as principais nascentes dos rios de Planalto, tais como o rio Corumbá, o rio São Marcos e o Araguari. A construção do reservatório iniciou-se no ano de 1974, foi finalizada em 1979 e as operações se iniciaram em 1980 (www.furnas.com.br).

COMPONENTES OPTICAMENTE ATIVOS (COA)

A água pura tem um comportamento espectral determinado basicamente pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. No caso de corpos de água naturais, a reflectância também varia em função dos componentes opticamente ativos presentes no meio, podendo-se agrupá-los em: fitoplâncton, material inorgânico em suspensão e substâncias amarelas (IOCCG, 2000; KAMPEL; NOVO, 2005).

O fitoplâncton inclui as algas unicelulares clorofiladas e outros organismos microscópicos. A denominação como fitoplâncton é adotada por conveniência, já que o mesmo possui maior influência sobre as propriedades ópticas (KAMPEL; NOVO, 2005). O material em suspensão representa todo o material particulado inorgânico não incluso no componente fitoplâncton. Em águas costeiras rasas e rios, a ação dos fluxos e correntes pode trazer sedimentos do fundo para a superfície, modificando significativamente a cor da água. Rios lamacentos, estuários e águas oceânicas influenciadas pela desembocadura de rios são exemplos de regiões onde o material particulado em suspensão desempenha um papel importante na determinação das propriedades ópticas da água. Diferentemente do constituinte fitoplâncton, a influência do material particulado em suspensão está limitada a certas áreas costeiras e corpos de águas interiores. É importante frisar que o termo "material em suspensão" não se aplica a apenas um tipo de material, mas a um grupo de materiais com suas propriedades características individuais. Por exemplo, a areia branca de regiões costeiras, quando em suspensão, terá uma influência diferente na cor da água do que a argila vermelha em suspensão nas proximidades da foz de um rio (SIPELGAS, 2004; IOCCG, 2000).

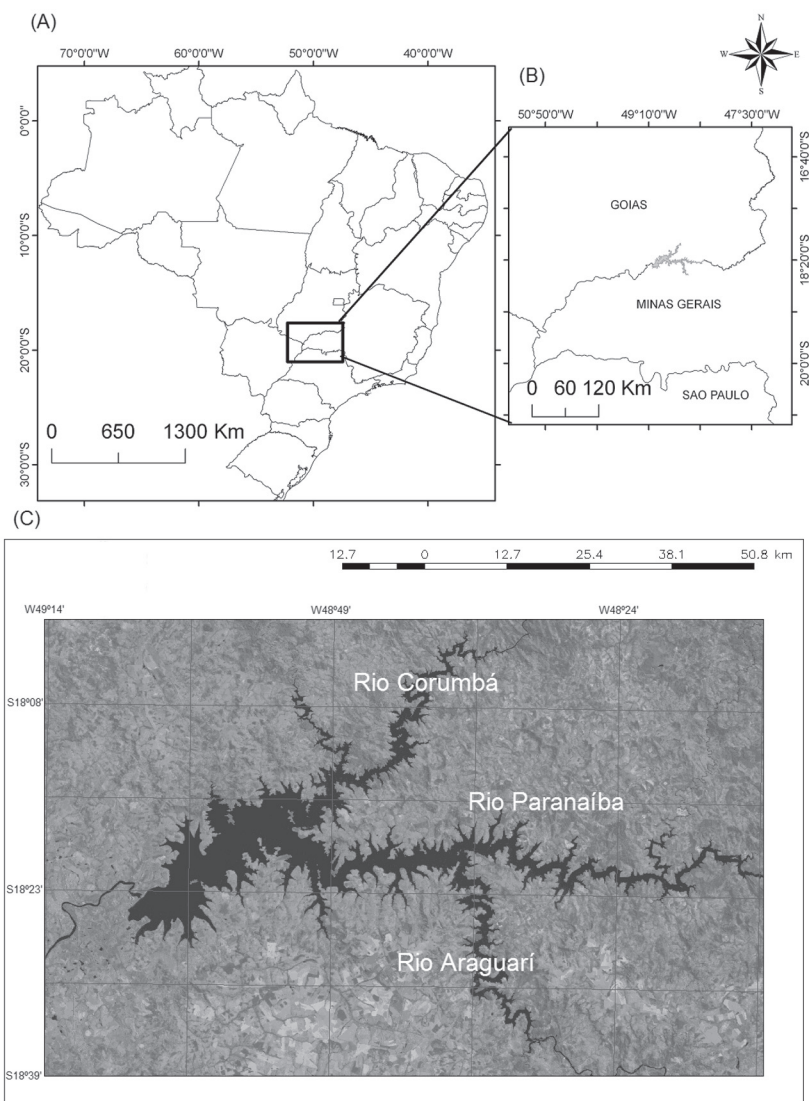


Figura 1 – Área de estudo: reservatório de Itumbiara em Goiás, Brasil (a), Contexto estadual (b) Em escala regional (c) Imagem ETM Landsat 7 de 02-04-2002, mostrando a área inundada do reservatório

Além do material em suspensão deve-se destacar a matéria orgânica dissolvida colorida (substâncias amarelas) que representa um grupo de substâncias dissolvidas orgânicas, compostas por ácidos húmicos e fúlvicos. Podem ter origem local, por exemplo, da degradação de células e partículas orgânicas, ou podem ser trazidas até uma localidade a partir de uma fonte distante. No caso de rios que fluem dentro de matas fechadas e/ou sobre solos ricos em matéria orgânica, estes acumulam carga de substância amarela em seu curso.

Locais onde a substância amarela é acumulada de fontes distantes têm uma concentração maior do que regiões onde a substância amarela é formada localmente. Ainda, o espectro de absorção de detritos é bem parecido com o espectro de absorção da substância amarela. Por isso, por praticidade, em parecimento remoto, esse componente é muitas vezes associado com a componente substância amarela (FERRARI; TASSAN, 1991).

MODELO DE MISTURA ESPECTRAL (MLME)

O MLME aplicado a dados hiperespectrais ou multiespectrais pode identificar a relativa contribuição entre diferentes substâncias na composição de um pixel. Os espectros de reflectância das substâncias que compõem a mistura dos pixels em uma cena podem ser medidas individualmente no estado "puro", usando espectrorradiômetros em laboratório ou em campo. Mas também, podem ser extraídos das próprias imagens (ASPINALL et al., 2002). Estas medidas de espectros de reflectância são chamadas de membros de referência (*endmembers*) e apresentam características espectrais peculiares da substância que cada um representa.

Cabe mencionar, as contribuições de fatores considerados espúrios que contribuem à mistura do sinal entre pixels. Em particular, aqueles devido à contaminação atmosférica e variações na geometria de aquisição (FERREIRA, 2003).

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados Orbitais

Todas as imagens utilizadas no presente trabalho foram adquiridas pelo sensor MODIS-Aqua, por meio do Warehouse Inventory Search Tool - WIST (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>). Esse sensor possui 36 bandas espectrais (459-1390nm) e gera imagens de 250 m, 500 m e 1 km de resolução espacial. Foram compiladas 475 imagens diárias de reflectância da superfície e 72 composições médias de 8 dias compreendendo o período entre 20/09/2009 e 30/03/2011. O MODIS Reprojection Tool - MRT (DWYER; SCHMIDT, 2006) foi utilizado para converter os dados para coordenadas planares (UTM, WGS-84). Foram utilizadas 7 bandas espectrais no intervalo 459-2155 nm. As bandas 3 (459 nm – 479 nm), 4 (545 nm – 565 nm), 5 (1230 nm – 1250 nm), 6 (1628 nm – 1652 nm) e 7 (2105 nm – 2155 nm) com 500 m de resolução espacial original, foram reamostradas para 250 m conforme as bandas 1 (620-670 nm) e 2 (841-876 nm). Os diferentes processamentos digitais, a serem mencionados a seguir, foram realizados no ambiente de análise de imagens ENVI® (ITT, 2009), no Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) e no ArcGIS (ESRI, 2004).

Dados in situ

Uma importante fonte de dados *in situ* foi o Sistema Integrado de Monitoração Ambiental (SIMA). Esse sistema foi desenvolvido pelo INPE em colaboração com outras organizações, para fornecer uma ferramenta útil ao gerenciamento e controle ambiental de recursos hídricos (STECH et al., 2006). Os dados coletados em intervalo de tempo pré-programado são transmitidos via satélite por meio de telemetria e estão disponibilizados através do portal do

Projeto Balanço de Carbono, Reservatórios de Furnas Centrais Elétricas S.A. (<http://www.dsr.inpe.br/projetofurnas/>). Foram utilizados dados referentes às variáveis ambientais turbidez (Nephelometric Turbidity Unit - NTU) e concentração de clorofila ($\mu\text{g/l}$). Apesar do conjunto de dados apresentar lacunas, foram utilizadas séries de dados *in situ* concomitantes com os dados MODIS na geração de modelos empíricos para estimativa das variáveis de interesse.

Dados *in situ* de turbidez e clorofila provenientes de duas campanhas de campo realizadas no reservatório de Itumbiara, sendo uma no período de cheia (12-13/05/2009) e outra no período de vazante (9-11/09/2009), também foram utilizados na geração de modelos empíricos (NASCIMENTO et al., 2011).

Razão de bandas

Valores estimados através da razão de bandas MODIS foram comparados aos dados da boia SIMA e obtidos em campanhas de campo (Nascimento, 2011). Estas comparações procuraram identificar um meio empírico para estimar as variáveis turbidez e concentração de clorofila. A comparação foi realizada pela análise estatística de regressão.

Análise de compartimentação do reservatório

Com base em uma análise qualitativa da série temporal de imagens MODIS médias de 8 dias, dividiu-se a área do reservatório de Itumbiara em 4 regiões, definidas como: Araguari, Corumbá, *Corpo do reservatório* e Paranaíba. Em cada uma dessas regiões, foram gerados 100 pontos aleatórios que serviram como pontos amostrais sintéticos para estimar a turbidez e a clorofila por modelos empíricos de sensoriamento remoto. A seguir, foram calculados os valores médios dos 100 pontos referentes a cada região, para todas as 72 imagens médias de 8 dias. Estes valores médios foram comparados entre si estatisticamente aplicando-se os testes de Scheffe, Bonferroni e Fisher LSD.

Caracterização bio-óptica por sensoriamento remoto

No presente trabalho, foram gerados mapas de abundância relativa dos COA presentes nas águas do reservatório de Itumbiara, pela aplicação da técnica de MLME à série temporal de imagens médias de 8 dias. Através dessas imagens foram selecionadas as curvas espectrais mais parecidas com os espectros típicos de cada COA, encontrados na literatura (KIRK, 1994; IOCCG, 2000; MOBLEY, 2004). Depois de criada uma biblioteca espectral para cada imagem, a aplicação da técnica MLME tem como resultado uma imagem da abundância de COA (RUDORFF et al., 2011). As seleções dos *endmembers* foram feitas utilizando-se as próprias imagens, e foram selecionados os pixels que continham curvas espectrais que melhor expressassem a composição óptica da água do reservatório levando em consideração a presença de clorofila, matéria orgânica dissolvida e sedimentos.

O problema descrito pelo modelo físico pode ser simplificado por um modelo matemático que permita sua inversão ou a separação das componentes da mistura. O MLME considera que o espectro de reflectância (R_λ) observado em um pixel (um vetor) pode ser reproduzido por meio do produto de multiplicação do conjunto de Membros de Referência (MR) (uma matriz) pela abundância fracional que cada MR representa (um vetor). O algoritmo é expresso pela equação:

$$R_{pi} = \sum f_{rij} + \varepsilon_i$$

onde, R_{pi} é a reflectância do pixel p na banda i ; f_{ij} é a abundância fracional do MR j ; r_{ij} é a reflectância na banda i do MR j ; e ε_i é o erro no comprimento de onda i (NOVO; SHIMABUKURO, 1994; RUDORFF, 2006; RUDORFF et al., 2011).

A solução para este modelo linear é baseada em duas premissas: (a) a soma de f deve ser igual a 1; (b) os valores de f serão sempre entre 0 e 1, se os MRs forem espectralmente puros entre os mesmos. O processo de inversão do modelo determina o valor de f_{ij} para cada MR j . A abundância fracional calculada para cada pixel da imagem é então rearranjada espacialmente e reproduzida na forma de imagens.

A partir dos valores de abundância de cada COA, foi construído um diagrama triangular indicando a contribuição relativa de cada componente no reservatório. Essa classificação é baseada nas contribuições relativas dos três tipos de componentes 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. Cada amostra pode assim ser caracterizada bio-ópticamente por um ponto único no diagrama triangular, no qual cada eixo representa a contribuição proporcional de cada COA. Se a contribuição de um único componente é dominante, o ponto representando a respectiva amostra se moverá para o vértice correspondente do triângulo. Porém, se a contribuição dos três constituintes for equivalente, o ponto se moverá para o centro do triângulo equilátero (PRIEUR; SATHYENDRANATH, 1981). Aqui, foram utilizadas as contribuições referentes ao conjunto de 100 pontos aleatórios que serviram como pontos amostrais sintéticos. Assim, cada ponto no diagrama triangular representa a média dos 100 pontos do *corpo do reservatório*, em cada data (imagem média de 8 dias).

Classificação por fatiamento

Além do diagrama triangular, de maneira complementar para melhorar a visualização das contribuições relativas de cada COA foi utilizada a técnica de geoprocessamento de classificação por fatiamento. Os resultados do MLME foram transformados em mapas de classificação de abundância regulares, as classes foram separadas em intervalos de abundância para cada fração gerada pelo MLME nos intervalos de: 0 a 19% (Azul); 20 a 39% (Amarelo); 40 a 59% (Laranja); 60 a 79% (Rosa) e 80 a 100% (Vermelho). Nesse caso a classe que contem os valores de maior abundância foi usada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelo empírico

Dentre as comparações feitas entre os dados orbitais e os dados *in situ*, os melhores resultados obtidos para a variável clorofila foram obtidos com a razão entre as bandas 3 (459 - 479 nm) e 4 (545 - 565 nm). As razões entre as bandas espectrais azul/verde são muito utilizadas para estimar clorofila (CANNIZZARO; CARDER, 2005; PEREIRA, 2008). Os trabalhos pioneiros de estimativa de clorofila, como por exemplo, em Gordon (1983) já utilizavam a razão entre essas bandas.

Para a variável turbidez, a comparação mais consistente com os dados *in situ* foi conseguida com a razão entre as bandas 2 (841-876 nm) no infravermelho- próximo e 1 (620

- 670 nm) na região do vermelho. Na tabela 1, estão listados os números de pontos que puderam ser comparados para as duas variáveis, assim como os melhores valores de R^2 e erro médio quadrático (EMQ) da comparação entre os dados de campo e os dados de satélite. Observa-se que somente a comparação dos dados de clorofila com os dados SIMA na época de cheia não se apresentaram significativos ao nível de 95%.

Tabela 1 – Validação dos dados estimados pela razão de bandas com dados *in situ*. Valores em negrito: coeficientes de determinação significativos ao nível de 95%

Período	Campanha de campo		Boia SIMA	
	maio	setembro	novembro até março	março até maio
Número de pontos Clorofila	14	21	11	7
Clorofila (R^2)	0.5	0.68	0.74	0.28
EMQ	0.12	0.19	0.36	0.10
Período	maio	setembro	outubro até fevereiro	abril até junho
Número de pontos turbidez	14	19	9	9
Turbidez (R^2)	0.87	0.63	0.87	0.52
EMQ	0.17	0.07	0.17	0.54

Os dados de clorofila e turbidez estimados por meio dessa técnica foram essenciais para as análises de compartimentação do reservatório. Apesar desses modelos gerarem dados comparáveis às medidas coletadas *in situ* é necessário realizar uma série de procedimentos para que um algoritmo forneça resultados precisos. Isto ocorre mesmo que a base teórica dos algoritmos empíricos seja válida e sua aplicação prática possível, como foi mostrado em vários trabalhos (MUHAIRI et al., 2009; OUIILLON et al., 2008; PEREIRA, 2008).

Para a clorofila, a razão entre a banda de absorção na região do vermelho e a banda da região do infravermelho próximo, em aproximadamente 700 nm, conhecida como "NIR/Red" é bastante citada na literatura. Para a banda azul, a região em 440 nm é caracterizada pelo pico de absorção máximo da clorofila e a região entre aproximadamente 550 e 555 nm é caracterizada pela absorção mínima do fitoplâncton. Por isso, tais regiões são geralmente selecionadas para o teste de algoritmos empíricos neste tipo de aplicação (CANNIZZARO; CARDER, 2006).

Segundo Kirk (2004) e Hoge et al. (1987), a utilização da razão espectral nos intervalos da região do azul (400 a 551 nm) e do verde (515 a 600 nm) tem gerado resultados bastante robustos para a estimativa de concentração de componentes opticamente ativos na água.

Com a série de imagens médias de 8 dias foi possível verificar que em quase todos os meses do ano o reservatório permaneceu compartimentado. No entanto, no inverno (estação seca), a zona de influência dos rios apresentou águas menos turbias do que na estação chuvosa. Isso pode ser explicado pelo fato de que quando existe muita precipitação ocorre aporte de material alóctone e material em suspensão, aumentando a turbidez dessas áreas. De maneira oposta, na estação seca, ocorre menor quantidade de material carregado pelos rios e assim a transparência das águas nessa época é maior.

Com essa análise visual do reservatório de Itumbiara, foi possível estabelecer que o *corpo do reservatório* apresenta um comportamento diferenciado em relação aos braços

dos rios que o formam. Nascimento (2011) divide o reservatório de Itumbiara em dois compartimentos: *Corpo do reservatório* e rio Corumbá. Contudo, os braços dos rios Araguari e Paranaíba não foram considerados naquela análise. Portanto, buscou-se estabelecer compartimentos com os dados turbidez e clorofila estimados empiricamente pela razão de bandas que podem ser vistos na figura 2. Foram consideradas 4 regiões de interesse: Araguari, Corumbá, *Corpo do reservatório* e Paranaíba.

No período estudado, a turbidez do rio Araguari apresentou a maior média e a maior variação de valores (Figura 2A). A partir do teste de Scheffe, de comparação de pares de médias, foi possível verificar que a média da turbidez desse rio é estatisticamente diferente dos demais compartimentos. Os braços dos rios Corumbá e Paranaíba, obtiveram médias estatisticamente iguais e a região do *Corpo do reservatório* apresentou a menor média, também considerada estatisticamente diferente das demais. Os mesmos resultados foram encontrados nos testes de Bonferroni (diferenças entre as médias) e Fisher LSD.

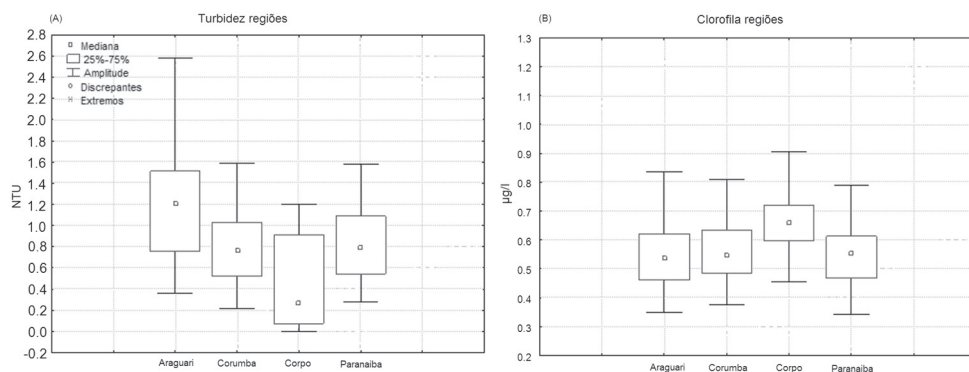


Figura 2 - Comparação dos valores estimados para a variável turbidez (A) e clorofila (B). Os valores utilizados são da série temporal de imagens MODIS média de 8 dias

Para os dados de clorofila estimados (Figura 2B), com a utilização dos mesmos testes, obteve-se que o compartimento *Corpo do reservatório* apresenta valores estatisticamente diferentes comparados aos demais compartimentos. A média da clorofila nessa região foi maior do que nas outras.

As zonas de influência dos rios em reservatórios operam como um rio largo e turbulento, no qual a turbulência, a instabilidade no aporte de sedimentos e a atenuação da luz disponível impedem a fotossíntese, apesar da alta carga de nutrientes disponíveis nesses locais (THORTON, 1990).

Esta maior concentração de clorofila no compartimento *Corpo do reservatório* pode estar associada à precipitação dos sedimentos antes de chegar à barragem, possibilitando maior penetração de luminosidade na água e aumentando a zona eufótica, o que propicia o surgimento de uma maior concentração de clorofila. Este fato está associado à precipitação gradual de sedimentos devido à redução da velocidade do fluxo da água. Dessa forma, com as variáveis estimadas por meio das imagens de satélite, pode-se concluir que o reservatório estudado é dividido em três compartimentos: Região *Corpo do reservatório*, Região Araguari e Região Corumbá/Paranaíba.

Modelo Linear de Mistura Espectral

A aplicação do MLME permitiu gerar mapas de abundância relativa dos COA presentes na série de 72 imagens médias 8 dias referentes ao período de estudo. Na figura 3 são apresentadas as médias dos valores de reflectância dos *endmembers* selecionados para a série de imagens usadas na aplicação do MLME.

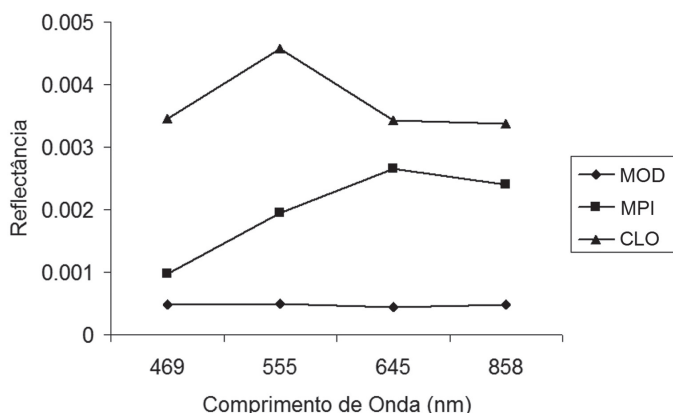


Figura 3 - Média dos valores de reflectância dos *endmembers* selecionados para a série de imagens. O eixo X representa o comprimento de onda (nm) das amostras e o eixo Y representa a média das respostas espectrais dos COA: MOD (matéria orgânica dissolvida colorida), MPI (material particulado inorgânico) e CLO (clorofila)

O MLME gerou imagens-fração onde a contribuição de cada COA selecionado varia entre 0 e 1. Para exemplificar o resultado da aplicação do MLME, foi selecionada a imagem média de 8 dias referente ao período de 14-21 de abril de 2010. Os mapas resultantes de cada fração - matéria orgânica dissolvida colorida (MOD), clorofila (CLO) e material particulado inorgânico (MPI), estão nas figuras 4(A), 4(B) e 4(C), respectivamente. Também foi realizada uma composição RGB com os mapas dessas frações 4(D) para uma melhor visualização dos resultados, sendo MPI na banda do vermelho, CLO na banda do verde e (MOD) na banda do azul.

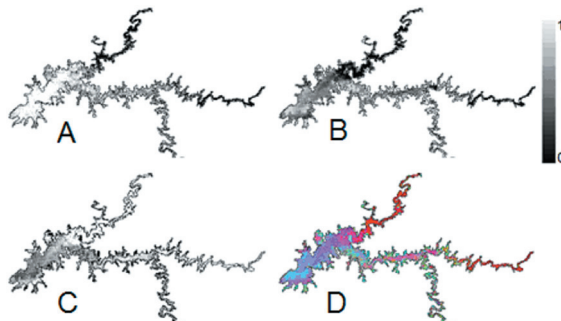


Figura 4 - Imagens fração e composição colorida da imagem MODIS média de 8 dias de 14-21 de abril de 2010. (A) Abundância de MOD, (B) CLO, (C) MPI e (D) composição colorida R(A) G(B) B(C)

RUDORFF et al. (2011) em um estudo sobre a pluma do rio Paraíba do Sul observaram que a técnica do MLME mostrou-se mais vantajosa em relação às outras metodologias. Essa técnica também foi eficiente quando aplicada em ambientes de várzea (NOVO et al. 2006; ALCÂNTARA et al., 2008) e útil para a separação dos COA no Reservatório de Manso (VALERIO et al. 2011). No presente trabalho a técnica foi aplicada em uma série temporal, isso permitiu observar as variações sazonais dos componentes.

Classificação por Fatiamento

Em algumas imagens a seleção dos *endmembers* não foi trivial, já que a reflectância da água do reservatório era muito baixa em todas as bandas aqui utilizadas. Isso fez com que o MLME superestimasse a abundância dos elementos em algumas imagens. Uma solução para esse problema foi a aplicação de uma classificação por fatiamento em cada fração. Assim, o intervalo de valores pôde ser padronizado. A figura 5 mostra o resultado da classificação por fatiamento da fração MPI gerada no MLME da imagem MODIS média de 8 dias de 14-21 de abril de 2010. O tamanho de cada pixel na imagem equivale a 231,65 m. Dessa forma, a área do reservatório é representada por 9.370 pixels. Nesse caso, 4.509 pixels foram incluídos na classe vermelho, ou seja, em quase 50% da imagem há contribuição de 80 a 100% do elemento MPI.

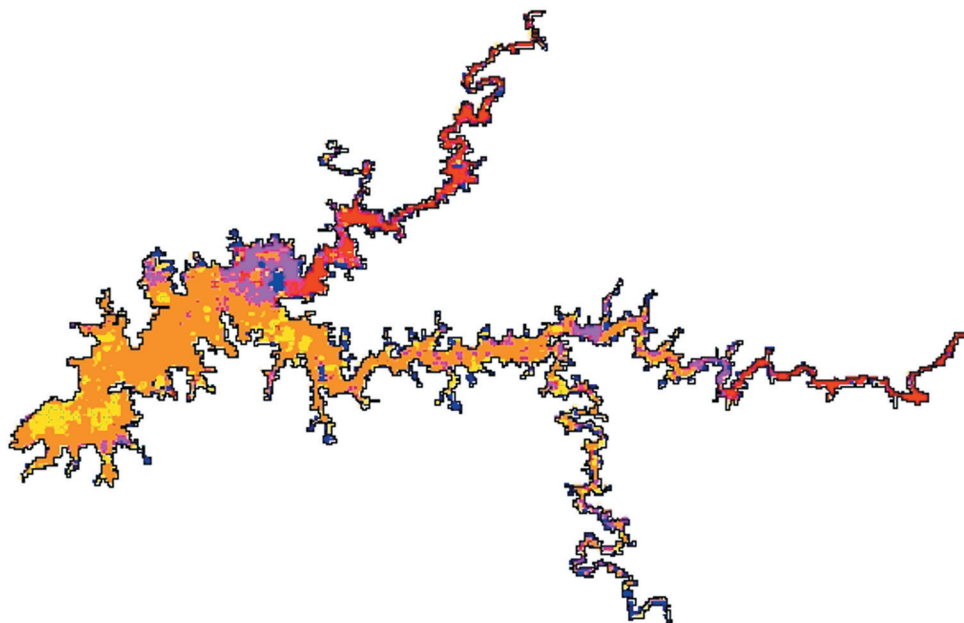


Figura 5 - Classificação por fatiamento da fração MPI gerada pelo MLME da imagem MODIS composição de 14-21 de abril de 2010

Com a aplicação desta classificação na série completa de imagens médias de 8 dias, foi possível elaborar um gráfico (Figura 6) representativo do número de pontos inseridos na classe com contribuição de 80-100% (vermelho) de cada fração, MOD, MPI e CLO, respectivamente. Na figura 6, em preto têm-se o número de pixels das imagens-fração com mais de 80% de contribuição de MOD. As frações de MPI e CLO são representadas, respectivamente, pelas cores cinza claro e cinza escuro.

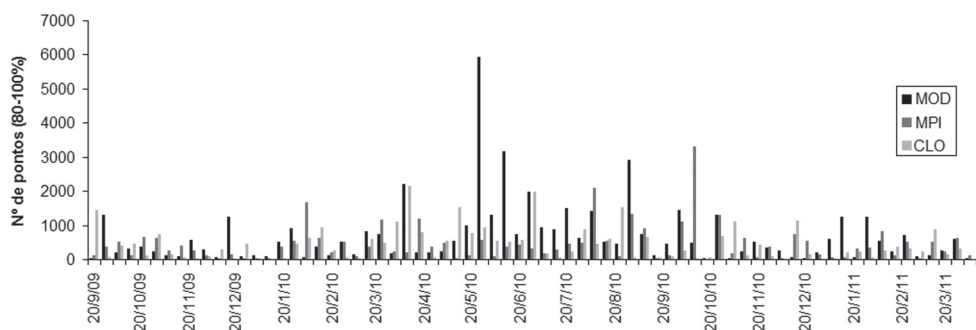


Figura 6 - Quantidade de pontos com contribuição maior do que 80% das imagens fração geradas pelo MLME aplicado à série de imagens MODIS média de 8 dias de setembro de 2009 à março de 2011

Nota-se que no período de inverno, entre os dias 20 de junho e 28 de agosto de 2010, existem algumas imagens-fração de MOD que registraram grande quantidade de pixels contendo mais de 80% deste COA, indicando uma dominância de MOD nesse período. Nascimento (2011) observa que existe uma dominância desse COA na região do braço rio Corumbá e que esse rio exerce forte influência no sistema como um todo.

Análise da Contribuição Relativa dos COA

Com os resultados da aplicação do MLME nas imagens do reservatório se extraíram valores da abundância dos COA na série temporal. Esses valores foram usados para medir a contribuição relativa desses elementos, no reservatório e os resultados foram mostrados nos diagramas triangulares a seguir:

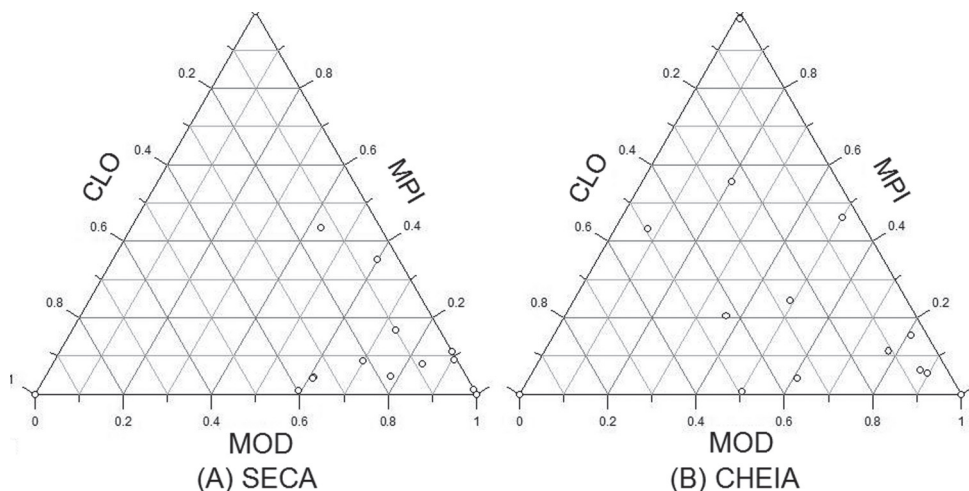


Figura 7 - Diagramas triangular indicando a contribuição dos componentes opticamente ativos para os períodos de (A) seca e (B) cheia para a série temporal de valores estimados com o MLME aplicados nas imagens MODIS média de 8 dias

Foi observado que nos dados do período de seca do reservatório houve uma maior contribuição de MOD nas amostras. No período de cheia, houve variação da dominância dos COA. Como o período de cheia coincide com a estação chuvosa, houve maior variação na concentração dos COA, não sendo possível identificar a dominância específica.

Essa variação de dominância dos elementos no período de cheia ocorre porque com as chuvas há maior quantidade de matéria orgânica e inorgânica que chegam ao reservatório com as águas dos rios. No estudo de Nascimento (2011), também foram encontrados valores significativos de MOD. Contudo, nos dados de contribuição relativa, o autor encontrou uma dominância por detritos. Segundo o mesmo autor, a grande quantidade de MOD presente no período da cheia pode ser explicada pelo fato do nível da água do reservatório variar em torno de 10 metros de um período para o outro. Assim, quando o nível aumenta, a água deixa toda a vegetação que cresceu durante o período de seca submersa, contribuindo para o aumento da MOD.

Por meio das técnicas de processamento digital aplicados aos dados de sensoriamento remoto foi possível identificar que o reservatório de Itumbiara possui variação sazonal em relação à dominância dos COA e a MOD tem forte influência nesse ambiente.

CONCLUSÕES

As técnicas de processamento aplicadas aos dados orbitais do sensor MODIS auxiliaram no entendimento dos processos que causam variações nos padrões sazonais do reservatório. Com a aplicação da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral, conseguiu-se diferenciar os componentes opticamente ativos na água. No período de seca o reservatório apresentou valores significativos de matéria orgânica dissolvida. Além disso, pôde-se esti-

mar por meio de razões de bandas valores comparáveis aos parâmetros medidos em campo. Também, pôde-se definir os padrões de compartimentação das águas do reservatório, onde foram encontrados 3 compartimentos - *Corpo do reservatório*, braço dos rios Corumbá e Paranaíba e braço do rio Araguari. Esse estudo colabora com as estratégias de manejo e gestão de qualidade da água para o reservatório de Itumbiara.

Apesar dos dados apresentados nesse trabalho serem válidos, mais campanhas de campo devem ser realizadas para a geração de modelos empíricos mais robustos. A metodologia apresentada nesse trabalho também pode ser aplicada em outros reservatórios, as técnicas convencionais de limnologia possuem limitações em relação à disponibilidade espacial e temporal das informações e o sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para o manejo da qualidade dos recursos hídricos e para o entendimento de padrões sazonais.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L.; NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; BARBOSA, C. C. Turbidity in the Amazon floodplain assessed through a spatial regression model applied to fraction images derived from MODIS/Terra. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 10, p. 2895-2905, 2008.
- ASPINALL, R. J.; MARCUS, W. A.; BOARDMAN, J. W. Considerations in collecting, processing, and analysing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations. **J. Geogr. Syst.**, v. 4, n. 1, p. 15-29, 2002.
- CANNIZZARO, J. P.; CARDER, K. L. Estimating chlorophyll a concentrations from remotesensing reflectance in optically shallow waters. **Remote Sens. Environ.**, v. 101, p. 13-24, 2006.
- DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In: Qu, J.J.; Gao, W.; Kafatos, M.; Murphy, R.E.; Salomonson, V.V.(ed). **Earth Science Satellite Remote Sensing**. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. cap. 13, p. 162-177.
- ESRI. **Geoprocessing in ArcGIS**. Redlands: Esri, 2004, 363p.
- FERRARI, G.M.; TASSAN, S. On the accuracy of determining light absorption by "yellow substance" through measurements of induced fluorescence. **Limnol. Oceanogr.**, v. 36, n. 4, p. 777-786, 1991.
- FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L.G.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y. E. Uso do modelo linear de mistura espectral para o mapeamento sistemático e operacional do bioma Cerrado: possibilidades, implicações e procedimentos metodológicos. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, 2003. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2003, p. 657-664.
- GORDON, H. R.; CLARK, D. K.; et al. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. **Appl. Optics**, v. 22, n. 1, p. 20 - 36, 1983.
- HOGUE, E. F.; WRIGHT, C. W.; SWIFT, R. N. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. **Appl. Optics**, v. 26, n. 11, p. 2082-2094, 1987.
- IOCCG. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters**. Dartmouth, 2000. 139 p.
- ITT **ENVI users guide**, version 4.5: ENVI with IDL. Pearl East Circle, CO 80301, USA, Boulder: ITT visual information solutions, 2008.
- KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (coord.) **Oceanografia por Satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. cap. 12, p. 180-196.

KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge University Press. 1994, 509p.

LEITE, M.A. **Variação especial e temporal da taxa de sedimentação no Reservatório de Salto Grande (Americana – SP) e sua influência sobre as características limnológicas do sistema**. 1998. 164 p. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil.

MENDONÇA, R. F. **Origem e destino do carbono em sistemas límnicos – uso de técnicas isotópicas em reservatórios e lagos rasos**. 2007. 58 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil.

MOBLEY, C.D. **Light and water: Radiative transfer in natural waters**. Academic Press: [S.L.] 2004, 593 p.

MUHAIRI, A. A.; GHEDIRA, H.; AL-AHMAD, H.; DAWOOD, A.; AL-MUALLA, M. Exploring the potential of MODIS visible and thermal channels in monitoring and assessing the impact of desalination plant discharges in the arabian gulf. In: IGARSS 2009, Cidade do Cabo, África do Sul. **Int. Geosci. Remote Se.**, 2009. p. 4244-3395.

NASCIMENTO, R.F.F.; ALCÂNTARA, E.; KAMPEL, M.; STECH, J.L. Caracterização limnológica do reservatório hidrelétrico de Itumbiara, Goiás, Brasil. **Ambi-agua**, v. 6, n. 2, p. 143-156, 2011.

NOVO, E. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral mixture analysis of inland tropical waters. **Int. J. Remote Sens.**, v.15, n.6, p.1351-1356, 1994.

NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MELACK, J. M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Jpn. J. Limnol.**, v. 7, n. 3, p. 153-161, 2006.

OUIILLON, S.; DOUILLET, P.; et al. Optical algorithms at satellite wavelengths for total suspended matter in tropical coastal waters. **Sensors**, v. 8, n. 7, p. 4165-4185, 2008.

PEREIRA, A.C.F. **Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água associadas às variações espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Ituparanga/SP. Presidente Prudente**. 2008. 206p. Tese (Doutorado), UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, SP, Brasil.

PRIEUR, L.; SATHYENDRANATH, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, CDOM, and other particulate materials. **Limnol. Oceanogr.**, v. 26, n. 4, p. 671-689, 1981.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2005, 138 f. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos SP, Brasil.

RUDORFF, N. M. ; KAMPEL, M. ; REZENDE, C. E. Spectral mapping of the Parai ba do Sul River plume (Brazil) using multitemporal Landsat images. **J. Appl. Remote Sens.**, v. 5, p. 053550, 2011.

SIPELGAS, L.; RAUDSEPP, U.; KÖUTS T. Operatinal monitoring of suspended matter distribution using MODIS Images and numerical modelling. **Adv. Space. Res.**, v. 38, n. 10, p. 2182–2188, 2004.

STECH, J.L.; LIMA, I.B.T. et al. Telemetric monitoring system for meteorological and limnological data acquisition. **Verh. Internat. Verein. Limnol.** v. 29, n. 4, p. 147-1750, 2006.

THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir Limnology: Ecological perspectives**. JohnWiley & Sons: Nova Iorque, 1990, 246 p.

TUNDISI, J. G. (Org). Limnologia e manejo de represas. São Carlos: USP, 1988. Série Monografias–Tomo 2

VALERIO, A. M.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Correlação de dados de reflectância de sensoriamento remoto estimados com dados do sensor MODIS e medidas in situ. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 2011,. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5100-5107.

WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3 ed. Academic Press: São Diego, 2001, 656 p.

ZANATA, L.H.; ESPÍNDOLA, E.L.G. Longitudinal processes in Salto Grande Reservoir (Americana, SP, Brazil) and its influence in the formation of compartment system. **Braz. J. Biol.** v. 62, n. 2, p. 347-361, 2002.

Recebido em novembro de 2011

Aceito em março de 2012