

USO DO SENSOR CBERS/CCD NA AVALIAÇÃO DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO LAGO DO AMOR (CAMPO GRANDE, MS)

Use of the CBERS/CCD Sensor for the Estimation of the Trophic State of the Reservoir "Lago do Amor" (Campo Grande, MS)

Luiza Spengler Coelho
Kennedy Francis Roche
Antonio Conceição Paranhos Filho
Vinicius Batistelli Lemos

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMT
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – CCET, Departamento de Hidráulica e Transportes
Caixa Postal, 549 - CEP 79070-900, Campo Grande – MS - Brasil
luiza@bonitoweb.com.br
kroche@nin.ufms.br
toniparanhos@gmail.com
viniciusblemos@gmail.com

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o estado trófico do reservatório "Lago do Amor" usando o sensor CBERS/CCD e o parâmetro clorofila *a* como indicador. Concomitantemente, é discutido o uso do sensoriamento remoto como ferramenta de apoio ao diagnóstico de processos de eutrofização em reservatórios. Foram utilizadas 4 imagens do satélite CBERS, câmera CCD e dados *in situ* do monitoramento do reservatório coletados próximos a data de passagem do satélite. Para determinar as relações entre as bandas da imagem de satélite e o parâmetro clorofila *a* foram testados dois índices de vegetação: o NDVI e RATIO; e dois novos índices são propostos: RAVI e NRAVI. Os resultados demonstram que é possível utilizar o sensor CBERS/CCD para estimar a concentração de clorofila *a* e o estado trófico de corpos d'água, contudo fatores externos, como cobertura de nuvens e problemas radiométricos das imagens, são as principais limitações a estes estudos.

Palavras chaves: CBERS/CCD, Sensoriamento Remoto, Estado Trófico, Reservatórios.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the trophic state of the reservoir "Lago do Amor" by using the sensor CBERS/CCD and chlorophyll *a* as proxy. Concurrently, the use of remote sensing as a tool in the evaluation of trophic state is discussed. The analysed data consisted of four images of the CBERS satellite CCD camera and measurements of the chlorophyll *a* concentration in water samples, collected from the reservoir near the satellite overpass dates. To determine the relationship between the bands of the images and the parameter chlorophyll *a*, two vegetation indexes, NDVI and RATIO, were tested. Two new indexes are proposed: RAVI and NRAVI. Results show that it is possible to use CBERS satellite images to estimate the concentration of chlorophyll *a* and thus trophic state of a water body. External factors such as cloud cover and radiometric problems with the satellite images were the main constraints of this study.

Keywords: CBERS-2, Remote Sensing, Trophic State, Reservoirs.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos continentais estão submetidos a um conjunto de impactos resultantes das atividades humanas e dos usos múltiplos das bacias hidrográficas. Dentre estes impactos se destacam aqueles causados pela eutrofização (NOGUEIRA, 2001; VON SPERLING, 2005; TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008), a qual é considerada um dos maiores problemas ambientais em nível mundial e gera efeitos ecológicos negativos, tanto para a saúde quanto para a economia, em decorrência da degradação dos recursos hídricos (UNEP-IETC, 2001).

Com a intensificação dos usos múltiplos dos reservatórios, o monitoramento se tornou fundamental para o acompanhamento da qualidade da água destes sistemas. Porém, o monitoramento através de análises *in situ* é complexo e de alto custo, demandando grandes esforços para escolha de parâmetros, amostragem, coleta, análise e compilação de dados (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Dentre os parâmetros indicadores do grau de trofia, um dos mais importantes é a concentração de clorofila *a*, pigmento fotossintético presente no fitoplâncton e na vegetação aquática (DUAN *et al.*, 2007). Um dos efeitos da eutrofização é a ocorrência de episódios de crescimento excessivo de algas, também conhecidos como florações, durante os quais as concentrações de clorofila *a* atingem valores de pico. Durante esses períodos são comuns atendimentos e emergências relacionados às florações de algas, reclamações de gosto e odor na água distribuída, problemas associados a toxinas de cianobactérias em clínicas de hemodiálise e mortalidade de peixes (LAMPARELLI, 2004). Assim tem-se que o monitoramento das concentrações de clorofila *a* em reservatórios, principalmente em mananciais de abastecimento público, é fundamental do ponto de vista da saúde pública.

Portanto, se a clorofila *a* puder ser estimada à distância, através das tecnologias de sensoriamento remoto, serão diminuídos os custos de monitoramento, tornando mais rápida a tomada de decisões. Diversos estudos já demonstraram que é possível a integração de dados limnológicos e de observações de satélite, como Landsat, MODIS, SeaWiFS e ASTER, entre outros (DEKKER *et al.*, 1996; SCHALLES *et al.*, 1997; WALDRON *et al.*, 2001; DIAS *et al.*, 2005; WACHHLOZ & PEREIRA FILHO, 2005; ASSIREU *et al.*, 2007; PEREIRA *et al.*, 2007; DUAN *et al.*, 2007; RUDORFF *et al.*, 2007; HADJIMITSIS *et al.*, 2008; WU *et al.*, 2008; RADIARTA *et al.*, 2008; AHMED *et al.*, 2009). Imagens de satélite também facilitam estudos de distribuição espacial, que são difíceis em amostragem *in situ* devido ao grande número de amostras, além de facilitarem estudos correlacionando uso e ocupação do solo com parâmetros limnológicos (WACHHLOZ & PEREIRA FILHO, 2005). Entretanto, pelo menos inicialmente, o sensoriamento remoto apenas pode ser utilizado como

uma ferramenta de apoio, já que há necessidades de coletas e amostragem de campo para a calibração de modelos (LIU *et al.*, 2003).

No Brasil, uma possibilidade muito interessante é a utilização do satélite CBERS em estudos ambientais. Este satélite foi construído em uma parceria Brasil/China e suas imagens são disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela internet. O primeiro satélite CBERS, chamado de CBERS 1 foi lançado em 1999, seguido pelo CBERS 2 e o 2B (INPE, 2010). Já há a previsão de construção e lançamento do CBERS 3 e CBERS 4, fato que demonstra o compromisso do INPE com a manutenção do fornecimento das imagens.

O satélite CBERS possui um conjunto de sensores ou instrumentos: WFI (Câmera de Amplo Campo de Visada), CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução), IRMSS (Imageador por Varredura de Média Resolução) e HRC (Câmera Pancromática de Alta Resolução) com alto potencial de atender a múltiplos requisitos de aplicações. Contudo, cada um desses sensores tem características próprias que os tornam mais adequados a certas categorias de aplicações (INPE, 2009).

Para o estudo de corpos d'água o sensor utilizado é a Câmera Imageadora de Alta Resolução - CCD, que possui uma resolução espacial de 20 metros (tamanho dos pixels da imagem), em quatro bandas espectrais (visível e infravermelho próximo) e uma pancromática. Sua resolução temporal, isto é, intervalo entre passagens é de 26 dias. Este sensor possui inúmeras aplicações potenciais, como identificação de limites entre continentes e água, estudos e gerenciamento costeiros e monitoramento de reservatórios (PARANHOS *et al.*, 2008).

Desde a década de 90, diversos trabalhos relacionando observações de satélite e parâmetros de qualidade da água utilizando, principalmente, o satélite Landsat TM vêm sendo produzidos. Rosembach *et al.* (2005) demonstraram que as imagens obtidas pela câmera CCD do satélite CBERS-2 são efetivas para cálculo de índices de vegetação, em comparação com o índice calculado a partir de imagens Landsat TM.

Os primeiros trabalhos a utilizar dados CBERS para obtenção de parâmetros de recursos hídricos datam de 2007 (PEREIRA *et al.*, 2007; BREUNIG *et al.*, 2007). Nota-se que desde então poucos trabalhos avaliaram essa aplicação, o que demonstra o potencial de estudos ainda existente.

Utilizando imagens Landsat TM, as bandas mais utilizadas para determinação de clorofila *a* são a TM3 (vermelho) e TM4 (infravermelho) através do cálculo de índices de vegetação como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index - Índice de Vegetação Normalizado) e o RATIO (Índice de vegetação por razão simples) (DUAN, H. *et al.*, 2007; ZHENGJUN *et*

al., 2008). As bandas correspondentes a essas faixas, no satélite CBERS, câmera CCD, são a 3 e a 4.

Assim, neste trabalho optou-se por testar as bandas 3 e 4, e os índices RATIO e NDVI, seguindo referências de outros autores, mas também testar as respostas das faixas espectrais detectáveis da clorofila *a*, onde ocorre absorção e espalhamento pelos pigmentos das células fitoplanctônicas, que são as bandas 2 e 3, respectivamente, verde e vermelho.

Os índices de vegetação são modelos numéricos calculados a partir de operações entre as faixas espectrais, nas quais estão contidas a maior variação de respostas espectrais para o objeto a ser realçado. O uso mais comum destes índices é para realçar a vegetação através de uma resposta de cor específica (exemplo: no NDVI a vegetação é representada por números altos), melhorando a indicação da presença de fitomassa foliar verde, e assim, facilitando a identificação da distribuição espacial das comunidades vegetais (GIRALDELLI & PARANHOS, 2006).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o estado trófico do reservatório “Lago do Amor” por meio de sensoriamento remoto orbital, utilizando-se o sensor CBERS câmera CCD e o parâmetro clorofila *a* como indicador. Concomitantemente, é discutido o uso do sensoriamento remoto como ferramenta de apoio ao diagnóstico de processos de eutrofização.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Bacia do Bandeira, que faz parte da bacia do rio Paraná, está inserida na zona urbana da cidade de Campo Grande, no Estado de Mato Grosso do Sul. Esta microbacia, com uma área aproximada de 19,5 km² (PLANURB, 2007), é composta pelos córregos Bandeira e Cabaça, sendo que no ponto de confluência destes, em 1968, foi construído o reservatório “Lago do Amor” (20°30'12.07''S, 54°37'0.15''W) (Figura 1).

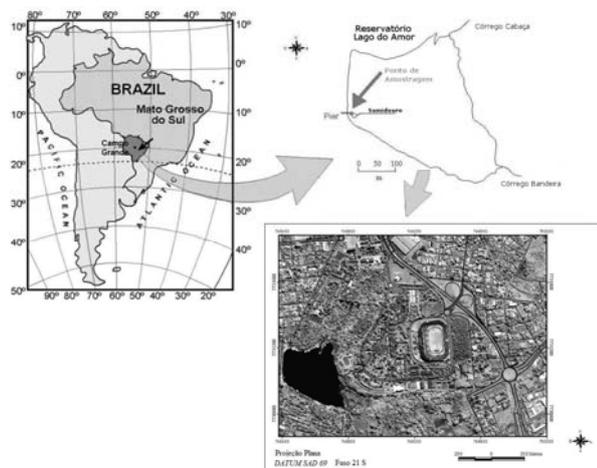


Fig.1 - Localização do Lago do Amor.

O “Lago do Amor” está situado dentro do *campus* da Universidade Federal de Mato Grosso do

Sul (UFMS) e é parte integrante da sua Reserva Biológica - RBI/UFMS. O reservatório tem forma trapezoidal, com área de aproximadamente 11 hectares, profundidade média de 2 metros, volume de cerca de 240.000 m³ e tempo de residência hidráulica em torno de 2 meses (CREA- RJ e CREA-MS, 2002).

Atualmente, por estar inserida em uma área urbanizada, toda a bacia de drenagem do “Lago do Amor” encontra-se em processo de deterioração ambiental e os córregos Bandeira e Cabaça recebem drenagem pluvial, efluentes domésticos e industriais. Diversos autores já demonstraram que o reservatório recebe diferentes tipos de efluentes, tanto de fontes pontuais como difusas, incluindo esgoto doméstico, apresentando-se com altos graus de contaminação fecal (TOLEDO, 1988; RIGHI, 2003; PITALUGA, 2003; OLIVEIRA, 2006).

2.2 Dados de campo e Imagens CBERS

Entre julho de 2005 e julho de 2009, dentro do programa de estudos limnológicos e monitoramento do Lago de Amor, amostras de água para determinação da concentração de clorofila *a* foram coletadas mensalmente em um ponto na região limnética do reservatório (Figura 1), próximo ao seu sumidouro. As amostras foram coletadas usando uma garrafa de Van Dorn, retirando 5 litros de cada uma das profundidades de 30% e 60% da coluna d’água, e depois misturando, formando amostras compostas que eram homogeneizadas antes de serem acondicionadas nos recipientes de coleta. Em cada data, 2 réplicas foram coletadas.

O método para determinação da concentração de clorofila *a* (em µg.L⁻¹) foi o espectrofotométrico, com extração usando etanol 80% a quente e posterior choque térmico (NUSCH, 1980). As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

A partir de 2008, a amostragem foi programada de modo a coincidir, ou ser o mais próximo possível, com as datas de passagem do satélite CBERS, calculadas a partir da resolução temporal do sensor CCD de 26 dias. A tabela 1 detalha as características do sensor CBERS/CCDB.

As imagens de satélite para a órbita/ponto 163/123 referente à Campo Grande, MS, no período entre 07/2005 e 07/2009, foram adquiridas através do catálogo do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). Para a escolha das imagens que seriam usadas para calibração do modelo, foram definidos os seguintes critérios:

- Diferença de tempo entre a coleta e a passagem do satélite, fixada em no máximo 3 dias;
- Disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens;
- Na ausência da ocorrência de chuvas ou mudanças climáticas bruscas entre o registro da

imagem e a amostragem (apurada usando dados históricos do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE da plataforma de coleta de dados - PCD de Campo Grande);

- Na ausência de problemas radiométricos nas imagens CBERS.

A grande maioria das imagens entre julho de 2005 e fevereiro de 2008 foi descartada para uso por apresentar diferença superior a três dias entre a coleta de dados *in situ* e a passagem do satélite. Das imagens restantes, apenas 4 puderam ser utilizadas para desenvolvimento do modelo, pois as outras apresentavam cobertura de nuvens, ou problemas radiométricos.

Das imagens utilizadas, as duas primeiras eram do satélite CBERS-2, e as posteriores do CBERS-2B. Contudo, as imagens CBERS-2 e CBERS-2B foram consideradas como equivalentes para o processamento, pois o sensor CCD dos dois satélites apresenta exatamente as mesmas características.

As imagens foram georreferenciadas utilizando como base imagem do Sistema de Licenciamento Ambiental do Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul – SISLA/IMASUL, em seguida, procedeu-se à correção atmosférica e conversão para reflectância através do modelo 6S – *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*, utilizando software para o CBERS-2 disponibilizado por Antunes (2003). O programa foi aplicado satisfatoriamente para o satélite CBERS 2B, ocorrendo a normalização das imagens. Para confirmação, foram analisados pontos de controle pré-estabelecidos, os quais apresentavam variação nos seus valores digitais, e após a correção atmosférica passaram a ter resposta espectral semelhante nas várias imagens.

2.3 Desenvolvimento

Utilizando o software Geomatica 9.1 (PCI, 2004) foram realizadas as operações para calcular os índices de vegetação, conforme fórmulas da Tabela 1, onde NIR representa a Banda 4 (Near Infrared - Infravermelho Próximo), RED a Banda 3 (Vermelho), e GREEN a banda 2 (Verde) da câmera CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B. Usando a razão entre as Bandas 2 e 3 e sua correspondente normalização, dois novos índices são propostos: RAVI e NRAVI (*Ratio Aquatic Vegetation Index* e *Normalized Ratio Aquatic Vegetation Index*).

Para a extração dos valores dos índices de cada pixel, foi desenhada uma área de interesse (AOI – *area of interest*) em uma região do lago próxima ao ponto de coleta, com área de 7 x 7 pixels, o que equivale a 140 x 140 metros nas imagens analisadas, visando manter a representatividade do ponto de amostragem na região limnética do reservatório e evitar interferência das margens ou das áreas mais rasas (Figura 2).

TABELA 1 – ÍNDICES DE VEGETAÇÃO, FÓRMULAS UTILIZADAS PARA CÁLCULO E RESPOSTA PARA VEGETAÇÃO.

Índice	Fórmula	Resposta do índice para vegetação
RATIO	NIR/RED	Alto
NDVI	(NIR-RED)/(NIR+RED)	Alto
RAVI	GREEN/RED	Alto
NRAVI	(GREEN - RED)/(GREEN + RED)	Alto

Para cada imagem, os valores dos índices para cada pixel da AOI foram extraídos e tabulados, de modo a se obter valores médios para cada índice para posterior análise estatística de correlação com os valores de clorofila *a* determinados *in situ*. O mesmo procedimento foi realizado para as reflectâncias das bandas 2, 3 e 4 (regiões do verde, vermelho e infravermelho próximo respectivamente) do sensor CCD-CBERS.



Fig. 2 – Área de interesse (AOI) desenhada sobre o reservatório Lago do Amor (Lago em preto, vegetação em branco – imagem de 14/09/06 com índice RATIO).

Utilizando as imagens de 19/08/06, 14/09/06, 09/01/08, 04/02/08 (portanto, um $n = 4$) e os valores médios de clorofila *a* determinados *in situ*, os valores médios de cada índice (NDVI, RATIO, RAVI e NRAVI) e os valores de reflectâncias das bandas 2, 3 e 4 (regiões do verde, vermelho e infra-vermelho próximo respectivamente) do sensor CCD-CBERS foram realizados os seguintes passos:

- Análise de correlação de Pearson (r);
- Regressão linear para obter as equações relacionando índices e clorofila *a*, e reflectâncias e clorofila *a*;
- Escolha das equações com melhor ajuste para cálculo da clorofila *a* estimada;
- Gráfico comparando clorofila *a* estimada pelas equações e clorofila *a* medida *in situ*;
- Aplicando as equações obtidas ao valor de reflectância e/ou de índice de cada pixel do reservatório, gerou-se um mapa de distribuição espacial da clorofila *a* estimada;
- A classificação trófica do reservatório foi realizada usando o esquema proposto por Salas & Martino (1991).

TABELA 2 – LIMITES PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESERVATÓRIOS EM NÍVEIS DE TROFIA DE SALAS & MARTINO (1991).

	Classificação				
	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Cl <i>a</i> (mg/m ³)	< 2,0	2,0 - 5,0	5,0 – 11,0	11,0 – 31,0	> 31,0

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do teste para confirmação de que o software 6S para o CBERS-2 poderia ser aplicado também para o CBERS-2B demonstrou que as reflectâncias dos pontos de controle escolhidos nas imagens corrigidas apresentaram menor desvio ao longo do ano, em comparação com as imagens sem correção.

Os resultados demonstram que todos os índices possuem correlação relativamente alta com as concentrações de clorofila *a* (tabela 3, figuras 2, 3 e 4). A menor correlação foi de -0,56 para a Banda 4 (infravermelho próximo), enquanto a Banda 2 (verde) apresentou correlação de 0,93 e a 3 (vermelho) de -0,93, esta oposição é explicada pelas características espectrais do pigmento clorofila *a*, que absorve a luz na região do vermelho e reflete na região do verde, ou seja, quanto maior a concentração de clorofila *a* maior a sua absorção da luz na faixa do vermelho e reflexão na faixa do verde, o que gera valores baixos de reflectância na banda 3 e altos na banda 2 (DUAN *et al.*, 2007).

A maior correlação encontrada foi de 0,96 para o índice NRAVI, que também registrou o segundo

melhor ajuste linear com a clorofila *a*, com r^2 igual a 0,91. O melhor ajuste linear foi encontrado para a Banda 2 com r^2 igual a 0,94 (tabela 3, figura 3).

Nas correlações e regressões lineares, as concentrações de clorofila *a* foram as variáveis dependentes, enquanto os índices e reflectâncias das bandas foram utilizados como variáveis independentes. Neste estudo, o inverso não seria possível, pois o objetivo é obter um modelo para calcular a clorofila *a* a partir das imagens de satélite. A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar o grau de correlação linear entre o parâmetro indicador (clorofila *a*) e as variáveis espectrais (índices e reflectâncias das bandas) (NOVO *et al.*, 1995).

A figura 4 demonstra o resultado das regressões entre as concentrações de clorofila *a* e as reflectâncias das imagens nas bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD-CBERS (verde, vermelho e infra-vermelho próximo respectivamente). Observa-se que o melhor ajuste foi encontrado para a banda 2 ($r^2 = 0,94$), seguido pela banda 3 ($r^2 = 0,86$), enquanto o pior ajuste foi o da banda 4 ($r^2 = 0,31$).

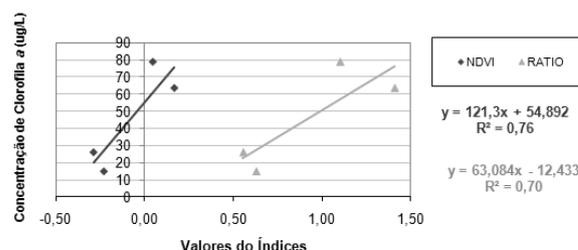


Fig. 3 - Regressões entre concentração de clorofila *a* e os índices NDVI e RATIO.

TABELA 3 – RESUMO DOS RESULTADOS DE CLOROFILA *A IN SITU*, ÍNDICES E REFLECTÂNCIA DAS BANDAS 2, 3 e 4.

Data imagem	Cl-a (µg/L) <i>in situ</i>	NDVI	RATIO	Banda 2	Banda 3	Banda 4	NRAVI	RAVI
19/08/2006	63,54	0,17	1,41	32,88	14,51	20,39	0,39	2,27
14/09/2006	78,84	0,05	1,10	37,9	19,98	21,96	0,31	1,9
09/01/2008	14,80	-0,23	0,63	20,57	47,0	29,49	-0,39	0,44
04/02/2008	25,95	-0,29	0,55	18,47	36,29	20,1	-0,33	0,51
r_{cl-a} *		0,87	0,84	0,93	-0,93	-0,56	0,96	0,93
r^{2**}		0,76	0,70	0,94	0,86	0,31	0,91	0,85

* r_{cl-a} é o coeficiente de correlação de Pearson entre clorofila *a* e variáveis (índices e bandas).

** r^2 é o coeficiente de determinação das regressões lineares entre clorofila *a* e variáveis (índices e bandas).

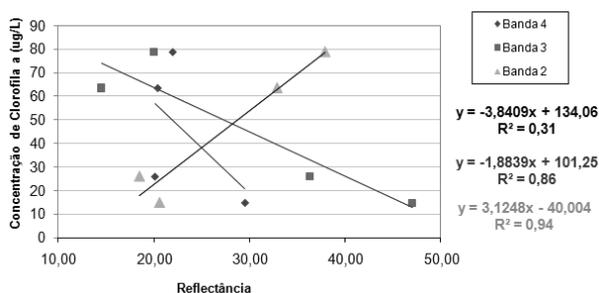


Fig. 4 - Regressões entre concentração de clorofila a e reflectâncias das Bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD-CBERS .

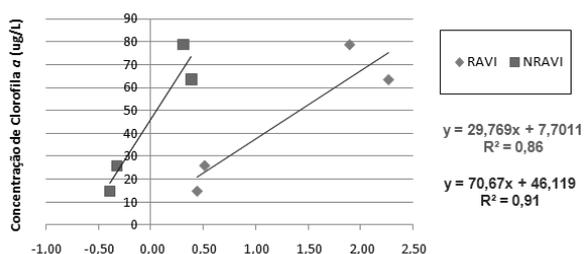


Fig. 5 - Regressões entre concentração de clorofila a e os índices RAVI e NRAVI.

Observa-se que a banda 2 e o índice NRAVI (tabela 3, figuras 4 e 5) apresentam as duas melhores correlações e ajuste com as concentrações de clorofila *a*. Assim, neste estudo, ambos foram escolhidos para a estimativa das concentrações de clorofila *a* a partir das imagens de satélite, através das seguintes equações (1) e (2):

$$Cl_a (\mu g.L^{-1}) = 3,1248.R_{B2} - 40,004 \quad (1)$$

($r^2 = 0,94$ e onde $Cl_a (\mu g.L^{-1})$ corresponde a concentração de clorofila e R_{B2} corresponde a reflectância na banda 2 CCD-CBERS para cada pixel)

$$Cl_a (\mu g.L^{-1}) = 70,67.NRAVI + 46,119 \quad (2)$$

($r^2 = 0,91$ e onde $Cl_a (\mu g.L^{-1})$ corresponde a concentração de clorofila e NRAVI corresponde aos valores deste índice para cada pixel).

A figura 6 compara a clorofila *a* medida *in situ* e a clorofila *a* estimada através das equações (1) e (2). A imagem normalizada de 13/06/08 não foi usada na regressão que originou as equações, e sim para a validação das mesmas.

O erro relativo entre a clorofila *a* medida *in situ* e a clorofila *a* estimada pelas equações (1) e (2) foi calculado usando a fórmula demonstrada na equação (3), e seus resultados encontram-se resumidos na tabela 4.

$$e = (Cl_a \text{ in situ} - Cl_a \text{ estimada})/Cl_a \text{ estimada} \quad (3)$$

(onde $Cl_a \text{ in situ}$ corresponde a concentração de clorofila *in situ* em $\mu g.L^{-1}$ e Cl_a estimada corresponde a concentração de clorofila estimada pelas equações (1) e (2) em $\mu g.L^{-1}$)

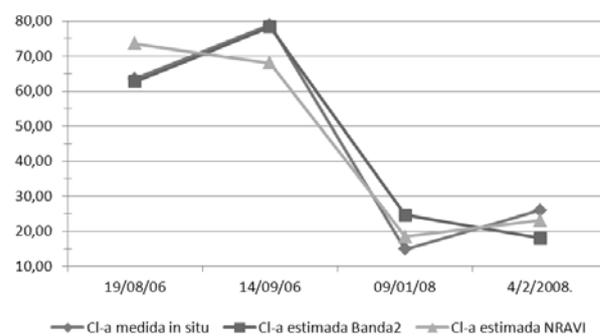


Fig. 6 - Comparação entre clorofila *a* medida *in situ* e clorofila *a* estimada.

Verifica-se que apesar de ambas as equações possuírem alto valor do coeficiente de determinação r^2 a estimativa da clorofila *a* usando a equação (1) resultante da Banda 2 foi mais precisa do que usando a equação (2) resultante do NRAVI (figura 6, tabela 4).

TABELA 4 – VALORES CLOROFILA A IN SITU E CLOROFILA A ESTIMADA.

Data da imagem	Cl-a <i>in situ</i> ($\mu g/L$)	Cl-a estimada Banda 2 ($\mu g/L$)	e (erro relativo)	Cl-a estimada NRAVI ($\mu g/L$)	e (erro relativo)
19/08/06	63,54	62,77	0,01	73,53	-0,14
14/09/06	78,84	78,34	0,01	68,01	0,16
09/01/08	14,80	24,59	-0,40	18,48	-0,20
04/02/08	25,95	18,07	0,44	23,12	0,12
Média	34,10	34,30	0,02	35,41	-0,10

Analisando as imagens resultantes do índice proposto NRAVI, observa-se que nas datas com menor concentração de clorofila *a* (09/01/08 e 04/02/08) o reservatório possui coloração preta, enquanto a vegetação ao seu entorno apresenta resposta branca (figura 7). Já na data com maior concentração de clorofila *a* (19/08/06) o reservatório aparece em branco, enquanto na data de 14/09/06 (segunda maior concentração de clorofila *a*) o reservatório aparece em tons de cinza, no entanto em ambas as imagens a vegetação do entorno continua branca. A mesma diferença nas respostas para o reservatório também foi observada para as imagens RAVI. A razão banda 3 e banda 2 e sua correspondente normalização não foi testada, pois apresentaria resposta exatamente oposta a do NRAVI e RAVI.

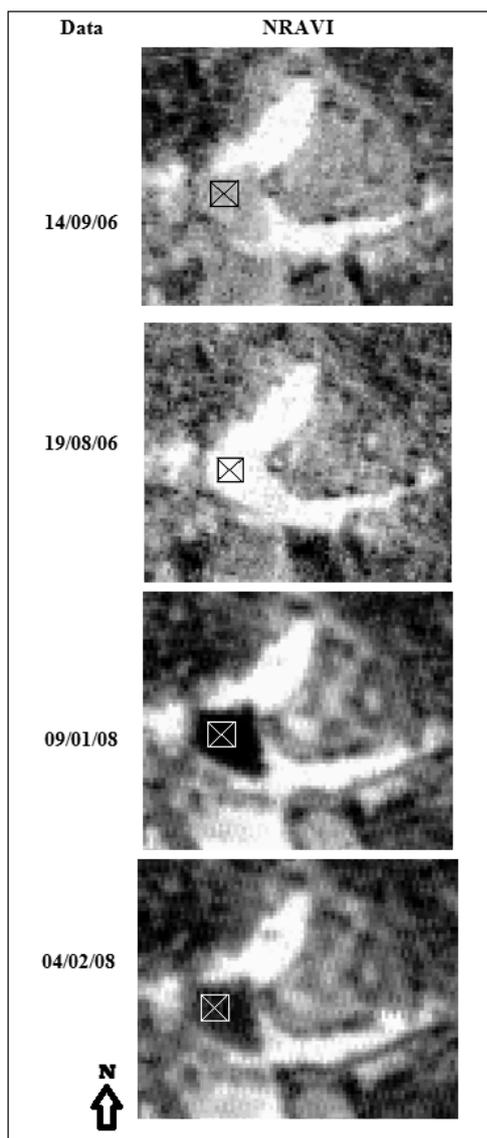


Fig. 7 – Imagens resultantes do índice NRAVI (AOI – Área de interesse sobre o reservatório em destaque, tamanho 140 X 140 metros).

Contudo, apesar da indicação visual da concentração de clorofila *a* proporcionada pelas imagens NRAVI, a relação entre o valor do índice e a concentração deste pigmento só pode ser estabelecida a partir de amostragens *in situ*. Como o NRAVI é calculado a partir da razão normalizada entre a banda 2 e a banda 3, os valores das respostas deste índice variam entre -1 e 1, sendo que de -1 a 0 os pixels retornam pretos na imagem e de 0 a 1 brancos, novamente o ponto em que o índice passa a dar a resposta para a cor branca só pode ser estimado através da correlação com os dados *in situ*.

Constata-se que o ajuste linear com a banda 2 foi melhor para estimar a concentração de clorofila *a* (figura 6 e tabela 5), porém não gera contraste visual nas imagens, enquanto os índices propostos NRAVI e RAVI apresentaram como vantagem mudanças na coloração das imagens, gerando uma indicação visual da presença de clorofila *a*. Contudo, mais estudos são

necessários para confirmar a viabilidade de uso e entender melhor as respostas dos dois novos índices propostos.

Os índices de vegetação NDVI e RATIO foram testados para avaliar a correlação entre eles e as concentrações de cl *a*. Os resultados de coeficiente de correlação r maiores que 0,8 e r^2 maiores do que 0,7 demonstram que foi encontrada uma correlação, no entanto, a determinação da concentração de clorofila mostrou-se mais eficiente utilizando os dados de refletância da Banda 2 do satélite CBERS e os índices propostos RAVI e NRAVI. Isso ocorreu, pois os novos índices foram criados considerando as características espectrais do pigmento clorofila *a*, que absorve a luz na região do vermelho (banda 3) e reflete na região do verde (banda 2).

As equações escolhidas (1) e (2) com r^2 igual a 0,94 e 0,91, respectivamente, podem ser consideradas satisfatórias quando comparadas a outros autores que realizaram o mesmo procedimento para imagens Landsat TM, como Duan *et al.* (2007) que encontraram r^2 igual a 0,67, enquanto Zhengjun *et al.* (2008) encontraram r^2 igual a 0,91 e 0,82. Já Pereira (2007) trabalhando com uma imagem do sensor CCD-CBERS para cinco lagoas no Rio Grande do Sul afirmou que a clorofila *a* não apresentou correlação significativa com nenhuma banda. Fato este diretamente relacionado à essência das técnicas de análise de regressão, que geram equações baseadas em conjuntos de dados e, portanto, válidas apenas para o local da sua aplicação. Assim, este tipo de estudo é específico para o corpo d'água ou região a qual se estuda e, portanto, as equações originadas devem ser adaptadas para os usos em outros ambientes. Portanto, para o monitoramento de grandes regiões seria necessário que o modelo fosse calibrado para uma diversidade de corpos d'água, o que requereria um grande esforço amostral.

Pereira *et al.* (2007) concluiu que o uso do sensoriamento remoto é uma alternativa viável e adequada para monitoramentos de longo prazo, pois permite um acompanhamento mais eficiente das modificações tróficas, desde que exista uma base de análises estatísticas da relação entre a reflectância e o estado trófico representado por parâmetros-chaves. Contudo, para a construção desta base é necessária uma série histórica de amostragens, assim, ressalta-se que o sensoriamento remoto constitui-se uma ferramenta de apoio para a avaliação de componentes em água, não substituindo completamente a necessidade de amostragens convencionais.

As equações derivadas do ajuste da clorofila *a* *in situ* com a banda 2 (equação 1) e com o NRAVI (equação 2) foram aplicadas para cada pixel do reservatório nas respectivas imagens gerando os mapas de distribuição espacial das figuras 8 e 9. O esquema proposto por Salas & Martino (1991) para classificação trófica de reservatórios tropicais foi aplicado aos mapas de distribuição espacial da clorofila *a* estimada, resultando nas seguintes constatações:

- Nas imagens de 19/08/06 e 14/09/06 o reservatório encontra-se eutrófico;
- Nas imagens de 09/01/08 e 04/02/08 o reservatório encontra-se mesotrófico, com pequenas áreas eutróficas.

Uma das vantagens da utilização do sensoriamento remoto neste estudo foi a possibilidade de se gerar mapas de distribuição espacial (figura 8), o que seria de difícil realização sem o auxílio desta tecnologia, devido ao grande número de amostras e análises necessárias.

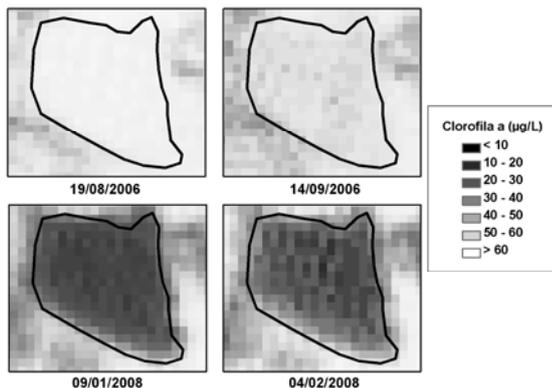


Fig. 8 – Distribuição espacial da clorofila *a* estimada no reservatório a partir equação (1) (Banda 2).

Alguns fatores externos que dificultaram este trabalho foram:

- Ocorrência de cobertura de nuvens;
- Problemas radiométricos, como bandeamento e artefatos nas imagens;
- Problemas técnicos do satélite CBERS-2B que geraram interrupções no fornecimento regular de imagens entre 30/08/08 e 31/08/09.

Devido a estes fatores externos seria necessário um extenso período de coleta em sincronia com as imagens, para possibilitar o uso de um grande número de imagens e também imagens para a validação do modelo desenvolvido. No entanto, para reservatórios com grande série histórica e com monitoramentos freqüentes, isso pode não ser um problema.

Um fator interno que também dificulta a realização do estudo é a necessidade de planejamento para sincronização das coletas com as imagens, que nem sempre é possível devido a questões como disponibilidade de laboratório, equipamento e equipe.

A soma dos fatores externos à necessidade de sincronia das coletas é apontada por diversos autores (BRAGA *et al.*, 1993; MARTINI *et al.*, 2006; PEREIRA, 2007; DUAN *et al.*, 2007 ZHENGJUN *et al.*, 2008) como uma das principais dificuldades para a obtenção de grande número de imagens e portanto de resultados confiáveis e significativos estatisticamente. Dentre estes, nenhum conseguiu utilizar mais de duas imagens para o desenvolvimento das análises de regressão entre as variáveis espectrais e os parâmetros

indicadores, porém, todos utilizaram mais de um ponto de amostragem *in situ*.

Neste estudo, não foi possível avaliar o nível de interferência de outros parâmetros relacionados a constituintes da água opticamente ativos, como sólidos suspensos e matéria orgânica, devido à inexistência de dados dos mesmos para as datas analisadas. Estudos futuros são necessários para avaliar as possíveis relações e interferências destes parâmetros com os dados de reflectância das diversas bandas e índices.

O uso do sensor CCD-CBERS neste trabalho foi avaliado como positivo devido à disponibilização gratuita e de fácil acesso das imagens. A grande desvantagem da utilização deste sensor foram os ruídos e problemas radiométricos, o que impossibilitou o uso de 45% das imagens previstas para utilização.

4. CONCLUSÕES

Dois novos índices são propostos: NRAVI e RAVI (Ratio Aquatic Vegetation Index e Normalized Ratio Aquatic Vegetation Index). A principal diferença entre os índices propostos e os índices de vegetação testados (NDVI e RATIO) é que os propostos foram calculados a partir de operações entre as faixas espectrais do vermelho e do verde, nas quais está contida a maior variação de respostas espectrais para a clorofila *a*, enquanto os outros índices são calculados usando as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, nas quais está contida a maior variação de respostas espectrais para a vegetação terrestre; fato que explica a determinação da concentração de clorofila ter se mostrado mais eficiente utilizando os índices propostos RAVI e NRAVI.

A principal vantagem dos índices propostos é fornecer uma indicação visual da concentração de clorofila *a* nas imagens, contudo a relação entre o valor do índice e a concentração deste pigmento só pode ser estabelecida a partir de amostragens *in situ*.

O uso do sensor CCD-CBERS neste trabalho foi avaliado como positivo devido à disponibilização gratuita e de fácil acesso das imagens. A grande desvantagem da utilização deste sensor foram os ruídos e problemas radiométricos, o que impossibilitou o uso de 45% das imagens previstas para utilização.

Verifica-se que é possível utilizar tecnologias de sensoriamento remoto, em especial, o sensor CBERS-CCD, para estimar o estado trófico de corpos d'água, contudo, fatores externos, como cobertura de nuvens, problemas radiométricos das imagens de satélite, são as principais limitações a estes estudos. Dentre os fatores internos a necessidade de planejamento para sincronização das coletas com as imagens é a principal dificuldade, principalmente na etapa de desenvolvimento e calibração dos modelos.

Mais estudos, principalmente relacionando outros parâmetros opticamente ativos além da clorofila *a* como, por exemplo, matéria orgânica e sólidos em suspensão, ainda são necessários para avaliar as

possíveis relações e interferências dos mesmos com os dados de reflectância das diversas bandas e índices.

AGRADECIMENTOS

À FUNDECT/MS e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da UFMS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M. H. *et al.* Application of remote sensing to site characterisation and environmental change analysis of North African coastal laggons. **Hydrobiologia**, v. 622, p. 147-171, 2009.

ANTUNES, M. A. H. **Modelo 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum adaptado para correções atmosféricas de imagens de sensoriamento remoto para CCD do CBERS 2.** Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/mauro/download_s.htm> Acesso: 07 fevereiro 2010.

ANTUNES, M. A. *et al.* **Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S.** Em: XXI Congresso brasileiro de cartografia. Anais do XXI Congresso brasileiro de cartografia, Belo Horizonte, MG, 2003.

ASSIREU, A. *et al.* **Existe relação entre a complexidade geométrica do entorno dos reservatórios e a variabilidade espacial dos parâmetros limnológicos?** Em: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, SC: p. 3263-3269, 2007.

BRAGA, C. Z. F.; SETZER, A. W.; LACERDA, L. D. Water Quality Assessment with Simultaneous Landsat-5 TM Data at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 45, p. 95–106, 1993

BREUNIG, F. M. *et al.* Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 2, 2007.

CPTEC/INPE - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados Climáticos. **Dados da estação 2054001 Campo Grande, MS, BRA de 07/2005 a 07/2009.** Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso: 07 fevereiro 2010.

COSKUN, H. G. *et al.* Determination of Environmental Quality of a Drinking Water Reservoir

by Remote Sensing, GIS and Regression Analysis. **Water Air Soil Pollution**, v. 194, p. 275–285, 2008.

CREA- RJ & CREA-MS. **Carta Náutica do Lago do Amor.** Campo Grande, MS. 2002.

DEKKER, A. G. *et al.* Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: a case study in shallow lakes. **Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques**, v. 41 (4), p. 531-547, 1996.

DIAS, N. W. *et al.* Sensoriamento remoto para a caracterização do aporte de sedimentos e compostos orgânicos da Represa de Paraibuna, São Paulo. **Ciências Agrárias (Ciências Espaciais)**, p. 1-18, 2005.

DUAN, H. *et al.* Assessment of Chlorophyll-a Concentration and trophic state for lake Chagan using Landsat TM and field Spectral Data. **Environ Monit Assess**, v. 129, p. 295-308, 2007.

GIRALDELLI, G. R; FILHO PARANHOS, A. C. **Relação entre as variáveis estruturais do habitat e o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) em três tipos de habitat de cerrado na fazenda Diamante, Coxim, MS.** Em: 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, MS, p.341-350, 2006.

HADJIMITSIS, D. G., & CLAYTON, C. Assessment of temporal variations of water quality in inland water bodies using atmospheric corrected satellite remotely sensed image data. **Environ Monit Assess**, v. 159, p. 281-292, 2008.

HUNTER, P. D. *et al.* Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p.1527–1544, 2008.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 19 de Agosto de 2006. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 14 de Setembro de 2006. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 10 de Outubro de 2006. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 27 de Setembro de 2007. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 09 de Janeiro de 2008. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 04 de Fevereiro de 2008. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 22 de Abril de 2008. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 13 de Junho de 2008. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 09 de Julho de 2008. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 04 de Agosto de**

2008. Órbita 163 Ponto 123. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagem CBERS-2B. Sensor CCD. Canais 1, 2, 3 e 4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagem de Satélite de 21 de Abril de 2009. Órbita 163 Ponto 123.** Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso: 15 Outubro 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Sobre o Satélite CBERS 1, 2 e 2-B.** Disponível em: <<http://www.cbers.inpe.br/?content=cameras1e2e2b.>> Acesso: 27 Janeiro 2010.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO DO SUL. **Sistema de Licenciamento Ambiental do Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul.** Disponível em: <<http://sisla.imasul.ms.gov.br/>> Acesso: 05 Fevereiro 2010.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado do São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento.** São Paulo. 207 p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) - Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. 2004.

LIU, Y.; ISLAM, M. A.; GAO, J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 24–43, 2003.

MARTINI, L. C. P. *et al.* Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila_a na Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol.11, no.4, p. 318–324, 2006.

NOGUEIRA, V. P. Q. **Qualidade da água em lagos e reservatórios.** Em: Hidrologia Ambiental. Org. Porto, M. et al., p. 165–210, 1991.

NOVO, E. M. L. M.; BRAGA, C. Z. F.; TUNDISI, J. G. **Remote Sensing estimation of total chlorophyll pigment distribution in Barra Bonita Reservoir, Brazil.** Em: Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. Org. por Straskraba, M., Tundisi, J. G. & Duncan, A., ed. Kluwer Academic Publishers, Holanda, p. 147–152, 1993.

NOVO, E. M. L. M.; LOBO, F.; CALIJURI, M. C. **Remote Sensing and Geographical Information System Application to Inland Water Studies.** Em: Limnology in Brazil. Org. por Tundisi, J.G., Bicudo,

C.E.M. & Matsumura-Tundisi, T., ed. ABC/SBL, Rio de Janeiro - RJ, p. 283–303, 1995.

NUSCH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Arch. Hydrobiologie**, v. 14, p. 14-36, 1980.

OLIVEIRA, P. A. **Mudanças diárias na qualidade da água do reservatório “Lago do Amor” (Campo Grande – MS)**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2006.

PCI - **Geomatica 9.1** – 2004

PEREIRA, R. **Aplicabilidade de métodos de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul - Brasil**. Dissertação de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Biociências, 2007.

PEREIRA, R.; SCHAFER, A. E. & WURDIG, N. L. **Aplicabilidade de métodos de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul (RS)**. Em: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, SC, p. 3513-3520, 2007.

PITALUGA, G. M. **Estudo comparativo entre a qualidade da água e a comunidade zooplânctonica da represa “Lago do Amor” (CAMPO GRANDE, MS)**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2003.

PLANURB – Instituto Municipal de Planejamento Urbano e Meio Ambiente. **Perfil socioeconômico de Campo Grande 2007 - 2008**. 14º ed. rev. Campo Grande, PMCG, 2007.

RADIARTA, N.; SAITOH, S. Satellite-derived measurements of spatial and temporal chlorophyll-a variability in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 79, p. 400–408, 2008.

RIGHI, K.O. **Utilização de macroinvertebrados na análise da qualidade da água: o caso do Córrego Cabaça**. Monografia de Bacharelado em Biologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2003.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A. M. & FLORENZANO, T. G. **Análise comparativo dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana**. Em: XII

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, GO, p. 1075-1082, 2005.

RUDORFF, C. M. *et al.* Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 269 – 280, 2007.

SASS, G. Z. *et al.* Understanding variation in trophic status of lakes on the Boreal Plain: A 20 year retrospective using Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 127–141, 2007.

SCHALLES, J. F. *et al.* Estimation of Chlorophyll a from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake. **J. Phycol.**, v. 34, p. 383-390, 1998.

TOLEDO, M.R.S. **Análise microbiológica da água do Lago do Amor**. Dissertação de mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 1988.

TUNDISI, J. G. & MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

UNEP-IETC. **Planejamento e Gerenciamento de Lagos e Reservatórios: Uma abordagem integrada ao Problema da Eutrofização**. São Carlos, SP: UNEP – PNUMA, 2001.

VERMOTE, E. F. *et al.* Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675– 686, 1997.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2005.

WACHHLOZ, F. & PEREIRA FILHO, W. **A limnologia em relação ao ambiente terrestre, identificado com o uso de imagens CBERS-2, em distintas áreas de captação da bacia hidrográfica do arroio Barriga, RS-Brasil**. Em: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, GO, p. 1135-1141, 2005.

WALDRON, M. C.; STEEVES, P. A.; FINN, J. T. **Use of Thematic Mapper Imagery to Assess Water Quality, Trophic State, and Macrophyte Distributions in Massachusetts Lakes**. Water-Resources Investigations Report 01-4016. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, 2001.

WU, M. *et al.* Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu lake in China. **Environ Monit Assess**, v. 148, p. 255-264, 2009.

ZHENGJUN, W.; JIANMING, H.; GUISEN, D. Use of satellite imagery to assess the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China. **Environmental Pollution**, v. 155, p. 13-19, 2008.