

INTEGRAÇÃO DE DADOS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS (SIMA) E DE IMAGENS ORBITAIS NA AVALIAÇÃO DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DA UHE FUNIL

Evlyn Márcia Leão de Moraes NOVO¹

José Luiz STECH¹

Enner Herenio ALCÂNTARA¹

Luciana Resende LONDE¹

Arcilan ASSIREU¹

Cláudio Clemente BARBOSA²

Arley Ferreira de SOUZA²

Resumo

Esse artigo descreve a integração de dados fornecidos pelo sistema automático de monitoramento e imagens de satélite visando à avaliação rápida do estado trófico de reservatórios. Médias diárias de concentração de clorofila foram computadas a partir de medidas coletadas entre fevereiro de 2007 e fevereiro de 2009 a partir de sistemas colocados no Reservatório de Funil. Os dados foram processados de modo a identificar a ocorrência de florações fitoplanctônicas e usados para selecionar imagens de satélites disponíveis durante episódios de floração. Tendo em vista que estudos prévios realizados em reservatórios em cascata demonstraram correlação positiva e alta entre o Índice da Diferença Normalizado de Vegetação (NDVI) e a concentração de clorofila, adotou-se a hipótese de que sob condições eutróficas a correlação entre o NDVI e a concentração de clorofila seria alta devido ao aumento da densidade das células próximas à superfície durante a ocorrência da floração de algas. A imagem selecionada foi processada para se obter o NDVI para o reservatório e comparada com as medidas de concentração de clorofila obtidas *in situ* pelo sistema automático de monitoramento. Os resultados mostraram que o NDVI é sensível a mudanças na concentração de clorofila em sistemas eutróficos como o reservatório FUNIL e que pode ser usado para uma avaliação rápida da área afetada pelas florações. Embora preliminares, os resultados mostram o potencial da integração de sistemas *in situ* e imagens de satélite para a avaliação do estado trófico dos sistemas aquáticos.

Palavras-chave: Sistema automáticos de monitoramento. Sensoriamento remoto. Estado trófico de reservatórios.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil – E-mails: {evlyn, stech, enner, arcilan, luciana}@dsr.inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – Caixa Postal 515 – 9 – São José dos Campos – SP, Brasil – E-mails: {barbosa, arley}@dsr.inpe.br

Abstract

Integration of data provided by the automatic environmental variable monitoring system (SIMA) and orbital images to assess the trophic state of the uhe funil reservoir

This paper describes the integration of data provided by automatic monitoring systems and satellite images for quick assessment of reservoir trophic state. Daily average of Chlorophyll concentration from February, 2007 to February, 2008 was obtained with automatic monitoring systems deployed at FUNIL reservoir. The data were processed to identify phytoplankton blooms and used to select a satellite image available during the episodes. As previous results in cascade system's reservoirs indicated a good correlation between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and chlorophyll concentration, it was hypothesized that in eutrophic conditions the NDVI would be positive due to the high cell density near the surface during the algal bloom. The selected image was processed to derive the NDVI for the reservoir and compared with estimates of chlorophyll concentration provided by the automatic system. The results showed that the NDVI is sensitive to changes in chlorophyll concentration in eutrophic systems as FUNIL reservoir and that it can be used for quick assessment of the area affected by nuisance blooms. Although the results are preliminary, they show the potential of integrating automatic collected *in situ* data and satellite images for assessment of aquatic system state.

Key words: Automatic monitoring system. Remote sensing. Reservoir trophic state.

INTRODUÇÃO

O século XX foi caracterizado pelo aumento do uso dos recursos hídricos para responder ao crescimento da população, à produção de alimentos e à produção industrial. Além do crescimento da população, houve também a tendência de concentração de grandes contingentes populacionais em centros urbanos. O reflexo desse uso indiscriminado dos recursos hídricos tem provocado escassez relativa da água tanto para o consumo humano quanto para seu uso ecológico (TUNDISI, 2003). Um dos principais sintomas da degradação da qualidade da água é o que se convencionou chamar de eutrofização cultural e que pode ser definida como o aumento dos nutrientes introduzidos nos corpos d'água em decorrência das atividades humanas (Bricker et al., 2003). Uma resposta comum à eutrofização dos corpos d'água é o aparecimento de florações de cianobactérias, dentre as quais, no Brasil destaca-se o gênero *Microcystis aeruginosa* (FERRÃO-FILHO et al., 2009)

Os sistemas aquáticos, entretanto, são sistemas dinâmicos cujas propriedades médias variam naturalmente em resposta a forçantes físicas tais como o regime hidrológico, radiação, vento, precipitação e temperatura o que torna difícil discernir as mudanças naturais daquelas introduzidas pela ação humana. Normalmente, constata-se que um sistema esteve sujeito ao processo de eutrofização cultural quando esta já se encontra instalada. Dentre as principais razões estão: 1) a falta de informações sobre as propriedades dos sistemas aquáticos com alta frequência de aquisição de seus principais forçantes naturais; 2) a falta de informações sobre a distribuição espacial das mudanças ocorridas no sistema aquático.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2009) coleta e analisa dados de qualidade de água em 969 rios do território brasileiro, com base em medidas obtidas em apenas quatro campanhas por ano. O número de estações monitoradas é de apenas 1173, o que representa uma densidade de amostragem inferior a 15×10^{-5} amostras por km^2 . Além da cobertura insuficiente, o sistema de monitoramento também não responde com agilidade às necessidades de informação devido à demora entre a coleta de dados e sua disponibilidade para uso. É nesse contexto que a tecnologia espacial se insere como fonte de informação adicional a ser integrada aos métodos convencionais de monitoramento dos ambientes aquáticos.

A tecnologia espacial permite aumentar não apenas a frequência de aquisição de dados ambientais, mas também ampliar o alcance espacial da informação e o caráter sinótico

das análises ao permitir o cotejo simultâneo do comportamento das variáveis e de seus forçantes.

Bases Teóricas

Desde a década de 1980, tem-se procurado ampliar o uso de dados de sensoriamento remoto no manejo de reservatórios hidrelétricos. Primeiro as imagens do sensor MSS (Multispectral Scanner Subsystem) do satélite Landsat foram avaliadas como fonte de informação para o estudo do processo de assoreamento de reservatórios (SAUSEN, 1980). Posteriormente, com os avanços proporcionados pelos sensores Thematic Mapper (Landsat-5) e Enhanced Thematic Mapper (Landsat-7) as imagens foram aplicadas ao mapeamento da infestação por macrófitas (Abdon e Meyer, 1990), ao estudo da relação entre uso da terra e infestação por macrófitas (PEREIRA FILHO, 1990), à análise temporal da estratificação horizontal das massas de água (SILVA, 1994), no estudo da circulação da água na planície de inundação do rio Amazonas (BARBOSA, 2005), na caracterização de habitat de mamíferos aquáticos (ARRAUT et al. 2007), e no estudo da zona de transição rio-reservatório e do comportamento do rio ao longo do reservatório (ASSIREU et al., 2009), entre outras.

Paralelamente aos esforços para ampliar o uso das imagens disponíveis, houve também, a realização de estudos básicos voltados à caracterização do comportamento espectral da água seja por meio de experimentos de laboratório (NOVO et al. 1993; FELIX, 1993; MANTOVANI, 1993; LONDE, 2008) ou pela realização de missões de campo controladas (CABRAL et al. 1993; NÓBREGA, 2002; BARBOSA, 2005; NOVO et al., 2004; PEREIRA et al. 2005; RUDORFF et al. 2007).

Resultados experimentais obtidos por Londe (2008) mostraram um excelente desempenho do índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) para estimar a concentração de clorofila em regiões sujeitas a florações de algas no reservatório hidrelétrico de Ibitinga. Nesse estudo, foram usadas medidas de reflectância da água tomadas simultaneamente à aquisição de amostras para a determinação da concentração de clorofila. Conforme salientado por Londe (2008), o NDVI é um índice de vegetação bem estabelecido na literatura para estudos de biomassa e vigor de plantas terrestres, não havendo notícia de seu uso para a detecção de florações fitoplanctônicas em ambientes aquáticos continentais, embora já tenham sido utilizados para a detecção de florações em regiões costeiras e oceânicas (CRACKNEL et al. 2001; Lin et al., 2003).

O conceito de NDVI foi introduzido em 1973 tendo por base o fato de que toda a vegetação verde tem um aumento brusco da reflectância na transição entre a região espectral do vermelho e a do infravermelho próximo, em torno de 700 nm. O uso de uma diferença normalizada entre a reflectância do infravermelho e vermelho permite remover parcialmente efeitos ambientais deletérios do sinal registrado pelo sensor. O uso do NDVI para mapear a ocorrência de florações em oceanos aparece na literatura por volta de 1990 com o uso de imagens do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) com resultados que encorajaram o uso de imagens MODIS com resolução espacial de 250 m para o estudo da ocorrência de florações da alga *E. prolifera* que ocorreu no *Yellow Sea*, na costa da China e causou sérios problemas às competições náuticas durante os Jogos Olímpicos de 2008 (HU; HE, 2008).

O NDVI foi testado em imagens do sensor Thematic Mapper/Landsat referentes ao reservatório de Ibitinga/SP para o qual se dispunham de dados experimentais. Os resultados de Londe (2008) indicaram que o NDVI foi sensível à presença de florações de clorofila conforme previsão de seu modelo empírico, e que, portanto pode ser usado como um indicador do nível de eutrofização de ambientes aquáticos continentais.

Na última década do século XX, Stevenson et al. (1993) desenvolveram um sistema de coleta automática e transmissão de dados meteorológicos e oceanográficos via enlace

de satélite, denominado de Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA). Tendo em vista o desempenho do SIMA para a aquisição de dados oceanográficos, foram feitas adaptações para que o sistema fosse utilizado para o monitoramento de sistemas aquáticos continentais. Com a implementação do projeto Balanço de Carbono nos Reservatórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A. foi possível tornar o sistema operacional com o fundeio simultâneo de três sistemas em diferentes reservatórios, os quais permitiram a coleta de dados meteorológicos, de qualidade da água e de temperatura da água em vários níveis. O volume de dados disponíveis sobre o estado dos sistemas estudados entre 2004 e 2008 é único, e tem permitido responder a diversas questões científicas que envolvem a relação entre as escalas temporais de variação das forçantes ambientais de reservatórios e a emissão de gases de efeito estufa (LIMA et al. 2005, LIMA et al. 2007; LORENZZETTI et al. 2005; NOVO et al. 2005; RAMOS et al. 2006; STECH et al. 2006).

O Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental - SIMA - é um conjunto de hardware e software desenhado para a coleta de dados e o monitoramento em tempo real de sistemas hidrológicos. Para a coleta dos dados, o SIMA faz uso de um sistema autônomo fundeado, constituído de toróides, onde são instalados sensores, eletrônica de armazenamento, bateria e antena de transmissão. Os dados coletados em intervalo de tempo pré-programado são transmitidos via satélite, em tempo quase real, para um usuário que pode estar situado até 2500 km distante do ponto de coleta (STECH et al. 2004).

O Reservatório da Usina Hidrelétrica de Funil foi um dos sistemas estudados no âmbito do projeto Balanço de Carbono, tendo sido instalados dois sistemas SIMA durante o período compreendido entre os anos de 2007 e 2008. A análise das séries temporais de concentração de clorofila ao longo do período compreendido entre fevereiro de 2007 e fevereiro de 2008 indicou a ocorrência de episódios de florações. Formulou-se, então, a hipótese de que esses episódios seriam passíveis de mapeamento com o auxílio de imagens TM/Landsat, de acordo com a metodologia apresentada por Londe (2008). No presente trabalho é relatada a integração de dados *in situ* de alta frequência e de sensoriamento remoto para mapear a distribuição espacial de classes de NDVI no reservatório da Usina Hidrelétrica de Funil, como um indicador do nível de eutrofização do reservatório.

A ÁREA DE ESTUDO

O reservatório da UHE Funil localiza-se no médio curso do Rio Paraíba do Sul, no município de Resende, Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). Este reservatório está inserido na Bacia Costeira de Sudeste, numa região sujeita a intenso intemperismo químico, com relevo montanhoso, e condições de clima tropical quente e chuvoso durante o verão, e seco no inverno. O reservatório de Funil tem 40 km² de área e um perímetro de 320 km resultante da topografia acidentada da região. Sua profundidade média é de 20 metros apresentando um tempo de residência de 55 dias (ROCHA et al. 2002). Trata-se de um reservatório em operação desde 1969.

O Rio Paraíba, à montante de Funil, tem uma vazão média regulada de 217 m³s⁻¹ e atravessa uma região densamente povoada (~100 hab./km²), com grande parque industrial e aproveitamento agrícola da várzea, o que torna o seu nível de poluição particularmente elevado. A construção de barragem e a formação de um lago criaram as condições para que a capacidade de autodepuração do ambiente aquático fosse ainda mais reduzida devido ao aumento do tempo de residência hidráulica e à acumulação de nutrientes no fundo. Vários estudos indicam que o reservatório da UHE Funil se encontrava em adiantado estado de eutrofização já na década final do século XX, com ocorrência freqüente de florações de algas, em particular, do gênero *Microcystis aeruginosa* (BOBEDA et al., 1993; ROCHA et al., 2002).

Como pode ser observado na figura 1, o reservatório tem um corpo principal que acompanha o vale do Rio Paraíba do Sul, cuja forma acompanha linhas de tectônica quebrável

do Planalto Atlântico (PONÇANO et al. 1981), criando cotovelos de drenagem que representam fatores locais de alteração da velocidade de escoamento da água, interferindo em seu nível trófico.

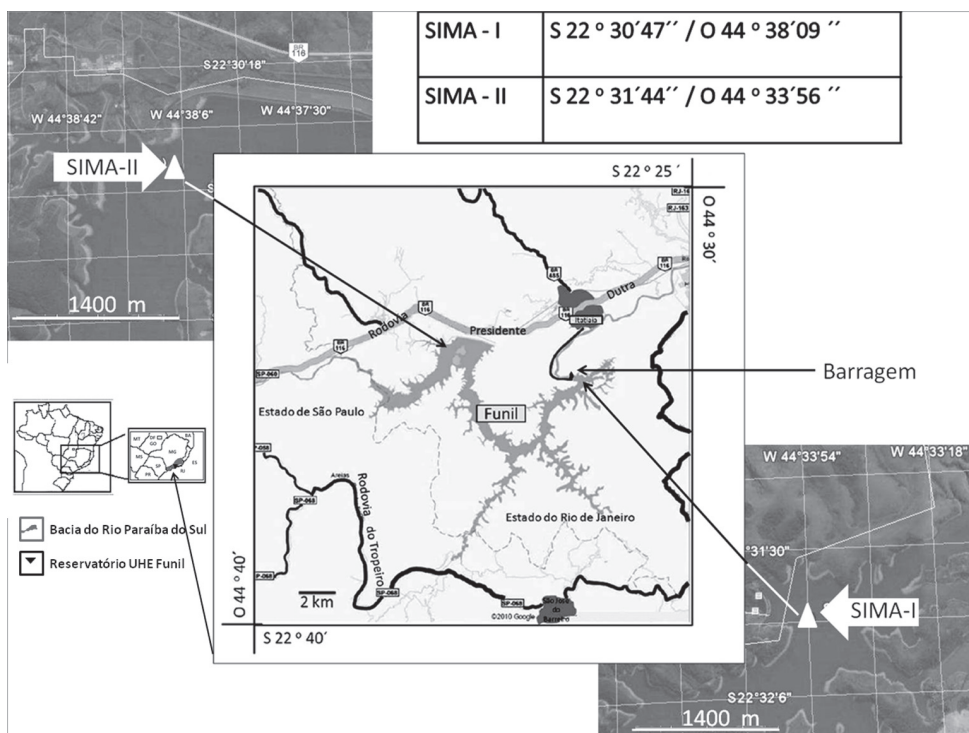


Figura 1 - Localização da UHE FUNIL e dos sistemas de monitoramento de variáveis ambientais (SIMA I e II)

Fonte: Adaptado de ANA (2009); Google Earth (2010)

DADOS IN SITU

O SIMA (<http://www.dsr.inpe.br/projetofurnas>) mede as seguintes variáveis ambientais a partir de sensores colocados acima da linha de água: vento (direção e intensidade), pressão, umidade relativa, temperatura do ar, radiação solar incidente e refletida. Abaixo da linha d'água o sistema permite a aquisição de medidas das seguintes variáveis limnológicas: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, condutividade, clorofila e turbidez. Esses dados são adquiridos em alta frequência e transmitidos a cada hora, em média, através dos satélites brasileiros SCD (Satélite de Coleta de Dados) e CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres).

Nesse trabalho, os dados utilizados referem-se apenas à variável concentração de clorofila-a (μgL^{-1}), medida pelo sensor YSI 6025 da sonda YSI 6600, colocada em dois pontos do reservatório a uma profundidade de 02 metros (ver figura 1 para localização).

O sensor da sonda foi projetado para estimar a concentração de clorofila-a na água a partir da fluorescência. A sonda YSI tem dois modos de operação. No modo automático, a sonda é calibrada em um meio com concentração zero $\mu\text{g. L}^{-1}$; a curva-padrão da sonda é, então, usada para a determinação das concentrações posteriores. Nesse caso, os valores de concentração são sempre relativos. Outro modo de operação permite que esta seja calibrada com duas ou três concentrações diferentes e os valores obtidos são mais próximos das medidas absolutas de concentração. Para maiores informações sobre as limitações das medidas de fluorescência recomenda-se a leitura do Manual do Usuário da Sonda YSI (YSI Incorporated, 2006). Segundo esse manual, a melhor forma de operação do sistema é o de pós-calibração, em que são obtidos valores relativos e amostras para medidas convencionais, as quais depois são correlacionadas numericamente aos dados de concentração.

Em decorrência das características do SIMA e dos objetivos do projeto, mais voltado ao estudo da variabilidade no tempo, optou-se por usar a calibração interna do sistema e a obtenção de valores relativos.

Embora essas medidas de concentração não tenham a precisão das de laboratório, elas permitem estimar a abundância relativa do fitoplâncton principalmente quando se fazem análises de séries temporais. O sistema foi colocado em dois locais estratégicos para atender aos objetivos do projeto FURNAS.

IMAGEM TM/LANDSAT

Foi utilizada a imagem do sensor TM/Landsat-5 referente à órbita/ponto 218/76 adquirida em 26 de maio 2007. Essa data foi selecionada a partir da análise das séries temporais *in situ* de concentração de clorofila-a adquiridas no período compreendido entre fevereiro de 2007 e fevereiro de 2008 para as estações SIMA-1 e SIMA-2.

MÉTODOS

Os dados SIMA foram obtidos para todas as datas em que a concentração de clorofila excedeu a $20 \mu\text{gL}^{-1}$ e se manteve com concentrações iguais ou superiores a esse patamar por pelo menos dois dias consecutivos. As razões para a adoção desse procedimento foram: 1) concentrações superiores a $20 \mu\text{gL}^{-1}$ indicam o processo de floração de algas; 2) as florações sustentam concentrações altas por intervalos de tempo superiores a dois dias. As florações se caracterizam pelo crescimento explosivo, autolimitante e de curta duração de um número limitado de espécies fitoplanctônicas, crescimento esse que provoca modificações sensíveis na cor da água (TORGAN, 1989).

Foram construídos gráficos de concentração média diária de clorofila de modo a identificar janelas de permanência das altas concentrações e relacioná-las ao processo de formação de florações. Com base nas datas de florações, foram pesquisadas as cenas Landsat disponíveis, sendo identificada uma cena coincidente aos episódios de floração, a qual foi processada de modo a se obter a distribuição espacial do índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Esse índice é um indicador numérico que permite determinar se o um alvo da imagem possui vegetação verde e viva.

Como anteriormente mencionado esse índice foi proposto para o monitoramento do vigor da cobertura vegetal a partir de imagens de satélite. Ele se baseia no fato de que as plantas verdes absorvem radiação em certas regiões do espectro eletromagnética para realizar fotossíntese e espalham a radiação que não pode ser absorvida para a fotossíntese para não sofrer danos térmicos. As células das folhas das plantas também espalham radiação eletromagnética, principalmente na região correspondente ao infravermelho próximo, pois nessa região, os pigmentos não absorvem radiação. O índice NDVI consiste na razão

normalizada da banda do vermelho (RED) e do infravermelho próximo (NIR), conforme a equação:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Onde NIR e RED representam a reflectância espectral nas regiões espectrais do vermelho (alta absorção pela clorofila-a) e infravermelho próximo (alto espalhamento pelas células das folhas da cobertura vegetal). O valor do NDVI varia entre -1 e +1, sendo que quanto maior seu valor, maior é a densidade e vigor da vegetação verde.

A aplicação do NDVI para o estudo de florações de algas se baseia no fato de que em concentrações de clorofila-a superiores a 20 µg.L⁻¹, a porcentagem de reflectância da água com presença de fitoplâncton passa a ter um comportamento semelhante ao da vegetação superior (LONDE, 2008, LOBO et al. 2009) conforme pode ser observado na figura 2, onde pode-se observar que na medida em que a concentração de clorofila ultrapassa 20 µg.L⁻¹ o fator de reflectância bidirecional da água se mantém relativamente constante na região sensível à radiação vermelha do espectro eletromagnético (RED) e aumenta sensivelmente na região do infra-vermelho próximo (NIR). Esse comportamento espectral faz com que o valor de NDVI aumente com o aumento da concentração de clorofila. Na verdade, a concentração de clorofila é apenas um indicador da ocorrência da floração. Assim sendo, o índice NDVI passa a indicar a presença de florações mais densas em decorrência do aumento intenso da reflectância no infravermelho, em relação à reflectância no vermelho.

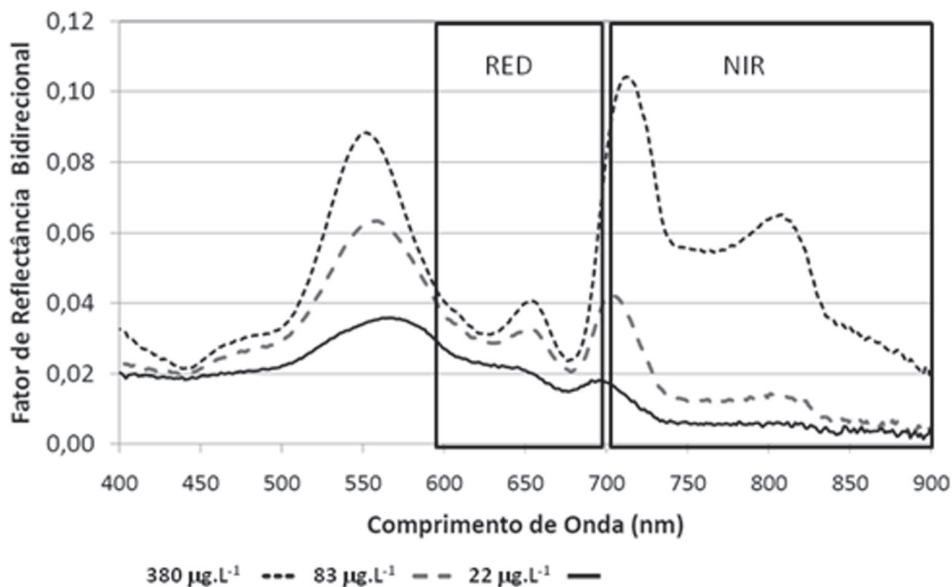


Figura 2 - Espectros de reflectância bidirecional de massas de água com três diferentes concentrações de clorofila medidas em µg.L⁻¹, indicando o aumento do fator de reflectância da água na região do infravermelho próximo (NIR) na medida em que a concentração atinge valores maiores do que 20 µg.L⁻¹.

A diferença entre a reflectância do NIR e do vermelho (RED) aumenta com o aumento da concentração, à semelhança do que ocorre com a vegetação superior, o que suporta a aplicação desse índice ao mapeamento de florações

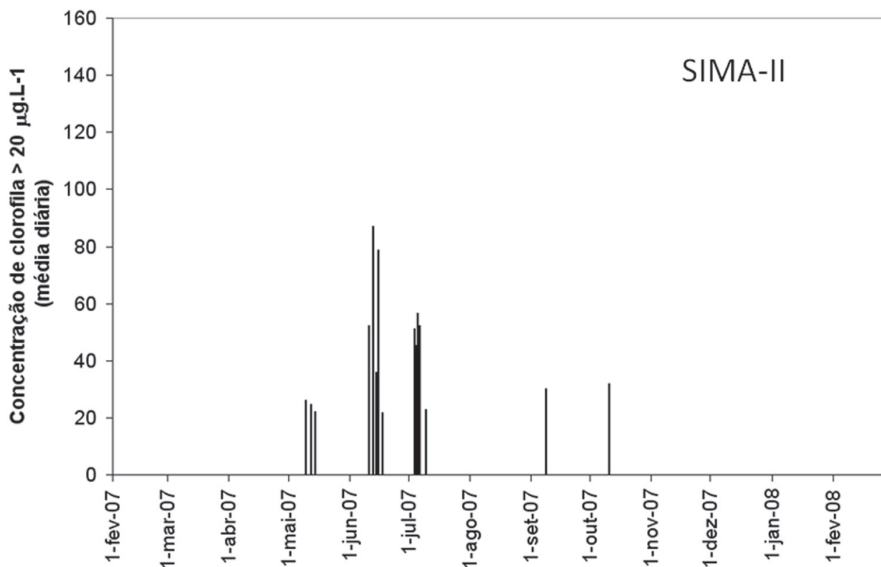
Os principais passos adotados para a geração das classes de NDVI foram: a) obtenção de uma imagem do sensor ETM+ a bordo do Landsat-7 orto-reflicada no banco de dados do Global Land Cover Facility (<http://glfc.umiacs.umd.edu>), a qual foi utilizada como imagem de referência para o registro da imagem de interesse; b) transformação de nível digital para reflectância; c) correção empírica do efeito aditivo da atmosfera; d) geração da imagem NDVI; e) fatiamento da imagem NDVI para gerar classes relativas de densidade das florações, f) aplicação do modelo de Londe (2008) para estimar as concentrações de clorofila das diferentes classes de NDVI, e atribuição de nível trófico.

RESULTADOS

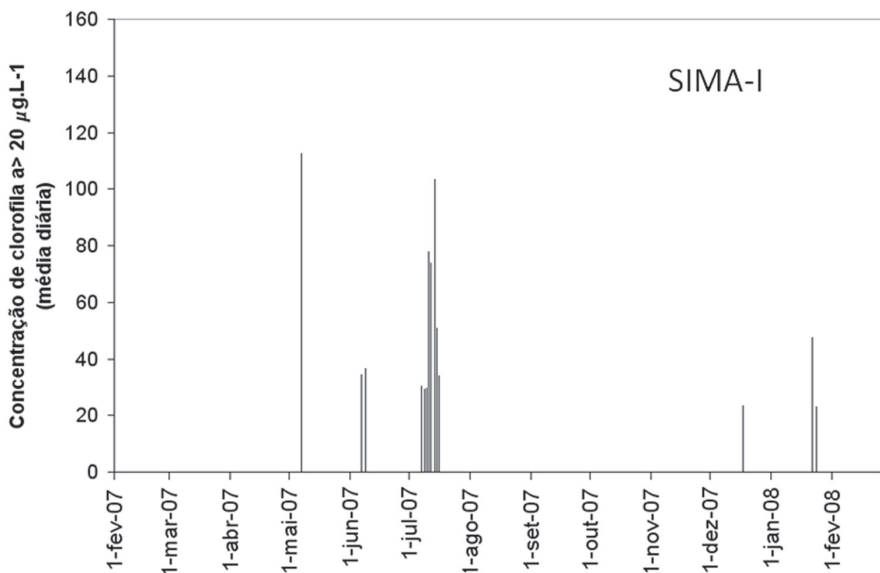
A análise da distribuição dos eventos com concentração média diária de clorofila superior a $20 \mu\text{gL}^{-1}$ e permanência superior ou igual a dois dias permitiu verificar que em ambas as estações (SIMA-1 e SIMA-2) o período de maior concentração média diária estendeu-se de Maio a Julho de 2007. A Figura 3 mostra a distribuição dos dias com concentração de clorofila superior ou igual a $20 \mu\text{gL}^{-1}$ ao longo do período estudado nas estações SIMA-2 (a montante) e SIMA-1 (a jusante). Pode-se observar que os máximos de concentração de clorofila ocorrem entre os meses de maio a setembro (fim do outono e começo de primavera).

A análise da figura 3 permite verificar que o SIMA-2 registra eventos de mais longa duração, com valores elevados durante vários dias do mês, principalmente nos meses de maio, junho e julho. Nos meses mais quentes (entre primeiro de setembro e primeiro de novembro) ocorrem dois episódios de floração de curta duração (um dia).

A estação SIMA-1 que se localiza próxima à barragem, as concentrações médias diárias são mais elevadas do que as observadas na estação SIMA-2, apresentando florações de 2 ou 3 dias de duração. Alguns dos episódios de floração ocorreram na mesma época dos observados na estação SIMA-2 (Maio a Julho). Não foram registradas florações entre Setembro e Novembro, ocorrendo curtas florações entre Dezembro de 2008 e Fevereiro de 2009.



Dias de ocorrência de concentrações de clorofila maiores que o limiar



Dias de ocorrência de concentrações de clorofila maiores que o limiar

Figura 3 - Distribuição de dias em que a concentração de clorofila-a atingiu valores superiores a 20 µg.L⁻¹ nas estações SIMA-II (montante) e SIMA I (jusante) no período compreendido entre fevereiro de 2007 e fevereiro de 2008

Embora a estação SIMA-2 não apresentasse concentrações de clorofila-a tão elevadas quanto às da estação SIMA-1, os episódios de floração foram mais longos (4 e 5 dias). Essa diferença de duração nos episódios e nos máximos de concentração observada fica mais bem evidenciada com a análise da figura 4.

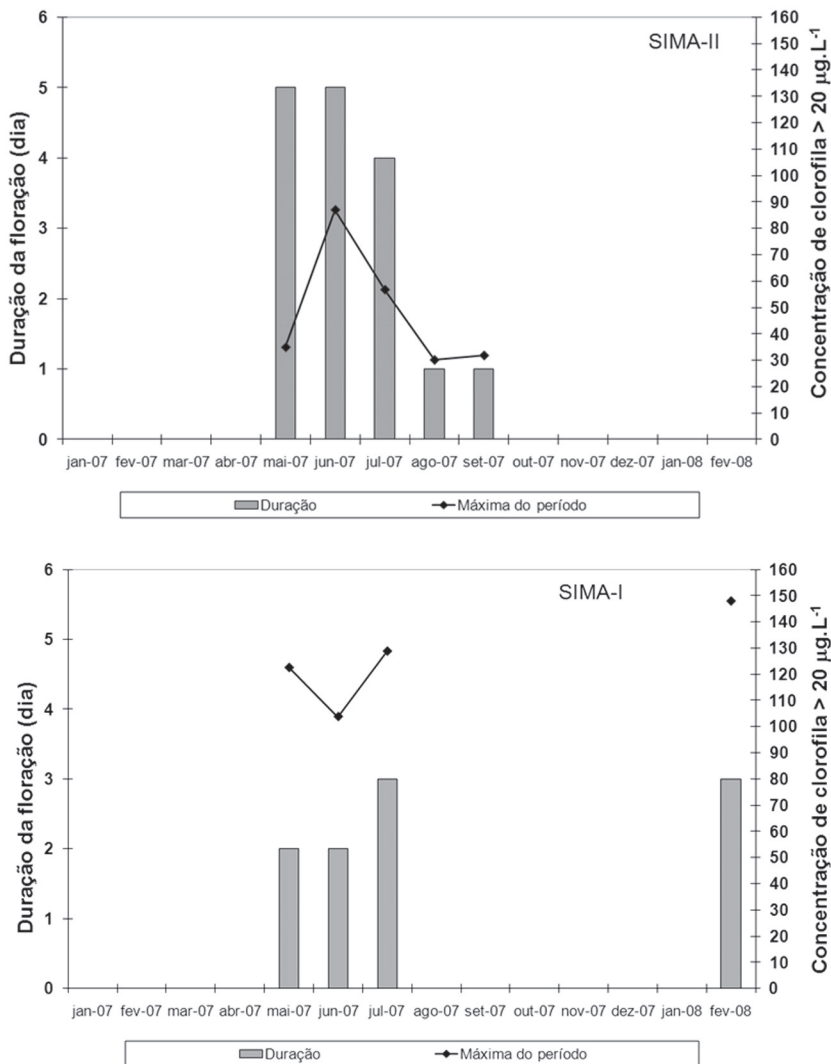


Figura 4 - Permanência dos eventos de floração e concentração máxima observada para cada evento nas estações SIMA-II (montante e SIMA-I jusante)

Na figura 4 as barras indicam a permanência de concentrações superiores a 20 µg.L⁻¹, enquanto a linha indica a concentração máxima de clorofila durante o período considerado. A figura mostra que de montante (SIMA-II) para a jusante (SIMA-I) os even-

tos registrados tornaram menos longos, porém mais graves em termos de concentração de clorofila-a, um indicador da biomassa da floração. Os eventos registrados pelo SIMA-1 tiveram duração de dois e três dias apenas, mas as concentrações máximas observadas atingiram valores entre $90 \mu\text{g. L}^{-1}$ e $150 \mu\text{g. L}^{-1}$, indicando condições hipereutróficas segundo a classificação da CETESB (CETESB, 2009).

As medidas de concentração de clorofila registradas pelo SIMA-2 indicam uma maior frequência de florações (um episódio por mês entre maio e agosto, ou seja, durante todo o período mais seco), com episódios de maior permanência do que os observados junto à barragem (entre 5 e 6 dias). As concentrações máximas de clorofila-a, entretanto, são muito mais baixas, variando entre $30 \mu\text{g. L}^{-1}$ e $80 \mu\text{g. L}^{-1}$, indicando condições que variaram de eutróficas a hiper-eutróficas, segundo a classificação da CETESB. Essas diferenças sugerem que na região da barragem, com o acúmulo de nutrientes provocado pela interrupção do fluxo da água, há um rápido crescimento da biomassa fitoplanctônica até alcançar níveis de concentração que se tornam uma limitação à sua expansão, provocando sua rápida decomposição e desaparecimento. Na região montante, com o aporte constante de nutrientes, mas também de material orgânico e inorgânico particulado, as florações não são "explosivas" provocando a auto-limitação do crescimento, pois existe um balanço entre a disponibilidade natural de luz e nutriente.

Os sistemas de monitoramento automático, entretanto, não permitem avaliar a área do reservatório submetida a tais condições tróficas. Nesse sentido, conforme Barbosa (2005) e Londe (2008) as imagens de satélite constituem-se em ferramentas úteis para mapear a extensão dessas florações em corpos d'água.

A pesquisa de imagens sem cobertura de nuvem na região indicou que a cena referente a 26 de maio de 2007 permitia capturar o evento da estação SIMA-1 (entre 27 e 31 de maio) e com menor rigor o evento da estação SIMA-2. Apesar de a data da imagem não coincidir exatamente com o pico do evento de floração o exame preliminar da cena mostrou que ela capturou a alteração da cor da água. Por outro lado, medidas obtidas por Londe (2008) no reservatório de Ibitinga (SP) indicaram que concentrações de clorofila-a na faixa de ocorrência daquelas medidas pelo SIMA-1 e SIMA-2 são passíveis de serem detectadas por sensores remotos de média resolução, pois provocam alterações no espectro de reflectância da água.

A figura 5 mostra a composição colorida normal da superfície de água do reservatório em 26 de maio de 2007. Pode-se verificar que, exceto junto à região de transição rio/lago, a cor do espelho de água é verde, indicando a presença de floração de algas. De fato, na região de transição entre o rio Paraíba do Sul e o reservatório a cor da água indica a presença de partículas inorgânicas em suspensão, as quais aumentam sua reflectância na região do vermelho. Na medida em que as características lênticas do sistema se definem, a cor da água passa a ser mais e mais dominada pela cor verde, indicadora da presença de grandes densidades de células fitoplanctônicas próximas à superfície do corpo de água (LONDE, 2008; HUNTER et al., 2008; CAPUTO et al., 2008; DEKKER, 1993; GONS et al., 1992; JUPP et al., 1994; KUTSER et al., 2006; METSAMAA et al., 2006; RANDOLPH, 2007; REINART; KUTSER, 2006).

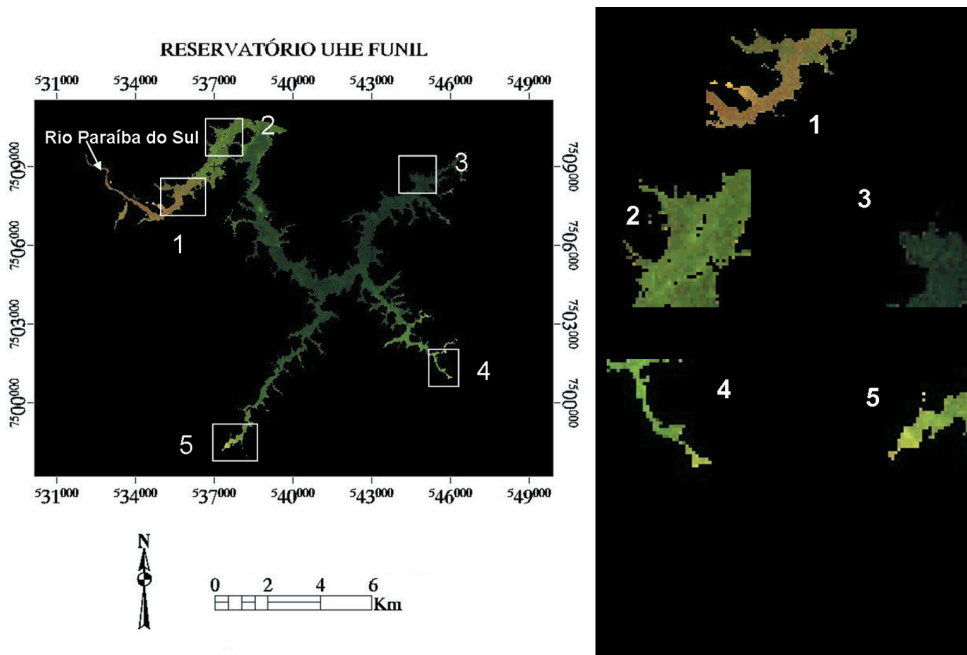


Figura 5 - Composição colorida normal do sensor Thematic Mapper/Landsat. A cor verde da água do reservatório é um indicador de florações em praticamente toda sua extensão na data de aquisição da imagem, 27 de maio de 2007. De 1 a 5 podem-se observar as variações de cor da água, as quais, encontram-se associadas à composição relativa de pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e partículas inorgânicas em suspensão

A cor verde da água registrada na composição colorida normal da imagem TM/Landsat sugere a presença de altas concentrações de clorofila em toda a superfície do reservatório e não apenas nos locais das estações SIMA. É interessante observar na Figura 5, que a região da estação SIMA-2 (quadro 2) que indicou a presença de florações quase dez dias antes da passagem do satélite, apresenta cor verde com matiz amarelo, a qual sugere o aumento da absorção de radiação eletromagnética pela água na região do azul. Este padrão sugere que a floração já alcançou o seu máximo desenvolvimento na região medida pelo SIMA e já se encontra, no momento da tomada de imagem, 10 dias depois, em processo de decomposição, liberando para a água (TUCCI; SANT'ANNA, 2003) matéria orgânica dissolvida, um dos componentes opticamente ativos responsáveis pela absorção da radiação azul (MOBLEY, 1994). Nessa fase, há o aumento da concentração de feofitina, pigmento relacionado à degradação das células fitoplanctônicas e que também provocam a transição da cor do fitoplâncton do verde para o amarelo.

Como as medidas da Sonda YSI estimam a concentração de clorofila a partir de medidas de fluorescência, pode-se supor que não foram medidas altas concentrações neste local após o dia 16 de maio de 2007 em decorrência do estado fisiológico do fitoplâncton. Este ao entrar em decomposição, reduz gradativamente o processo de fotossíntese e conseqüentemente de fluorescência (MOBLEY, 1994). Outra explicação para a aparente discre-

pância entre os dados de concentração de clorofila (fora do limite de detecção da sonda) e a cor verde na composição colorida normal da cena Landsat TM também pode estar associada à posição da sonda na coluna d'água, que é fixa, em torno de 2 metros abaixo da linha d'água. Na medida em que a floração se torna mais densa, ela tende a migrar para a superfície da água, saindo, portanto, do alcance da sonda. Esta questão está ainda sob investigação. O quadro 2 da figura 5 permite observar que toda essa região próxima à estação de medida não tem um padrão de cor homogêneo, o que indica que há variabilidade espacial nas concentrações de clorofila em superfície.

Na região relativa ao SIMA-1 (quadro 3) a cor da água é verde, sugerindo que as algas presentes nessa região encontravam-se na data da passagem do satélite em condições de floração ativa. De fato, os dados do SIMA -1 registraram concentrações de clorofila-a variando de $14 \mu\text{g.L}^{-1}$ a $122,5 \mu\text{g.L}^{-1}$ entre os dias 25 e 31 de maio de 2007.

Como pode ser deduzido da análise da figura 2, a região verde do espectro-eletromagnético (550 nm) é menos sensível a variações na concentração de clorofila. De fato, os dados de Londe (2008) indicam que a partir de concentrações em torno de $20 \mu\text{g.L}^{-1}$ já se observa um máximo de reflectância no verde, e esse máximo aumenta cerca de três vezes (0,03 – 0,09) quando se aumenta a concentração de clorofila de $22 \mu\text{g.L}^{-1}$ para $380 \mu\text{g.L}^{-1}$. O mesmo não ocorre com a região do NIR cuja reflectância aumenta 10 vezes (0,01 – 0,10) nesse intervalo de concentração, indicando ser mais adequada para avaliar a densidade da floração e seu estado fisiológico.

Assim sendo, os valores de NDVI permitem, em princípio, uma melhor caracterização da distribuição no reservatório da UHE Funil da floração e das concentrações de clorofila a ela associados. Como os valores de NDVI são contínuos, o número de classes pode ser definido em função do objetivo do mapeamento. Nesse trabalho, os valores de NDVI foram classificados arbitrariamente em quatro (4) classes apenas, tendo em vista que o modelo de conversão para clorofila-a foi adaptado de outro reservatório. Criou-se uma classe de valores menores do que zero e três classes equidistantes com valores maiores do que zero. A Figura 6 permite observar a distribuição espacial das classes de NDVI identificadas na imagem adquirida no dia 26 de Maio de 2007. Na data da passagem, o SIMA-1 encontra-se localizado numa região de NDVI máximo ($> 0,48$), enquanto o SIMA-2 encontra-se na classe de NDVI intermediário (0,28 – 0,47), o que sugere que a cena de 26 de Maio conseguiu capturar não apenas o processo de floração, mas as diferenças relativas entre as concentrações medidas pelos sistemas automáticos.

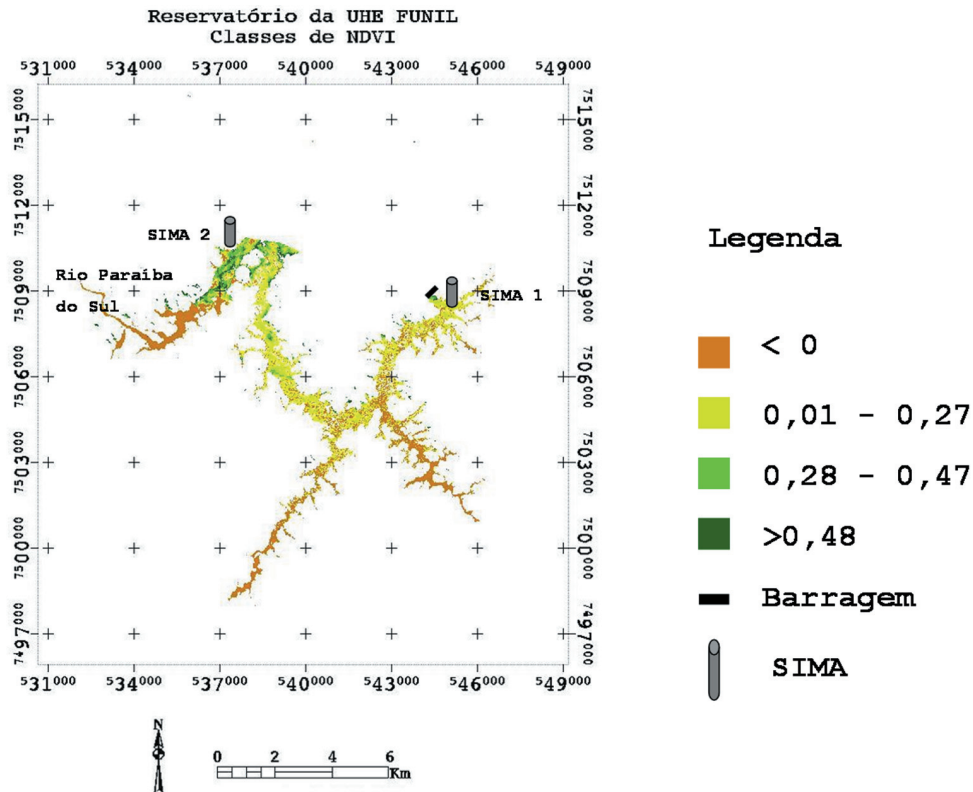


Figura 6 - Distribuição espacial das classes de NDVI na UHE Funil mapeadas a partir da imagem TM/Landsat-5 adquirida em 26 de maio de 2007

A figura 7 mostra também que na transição entre o Rio Paraíba do Sul e o lago ocorrem os menores valores de NDVI (inferiores a zero). Dois fatores podem explicar os valores negativos: a presença de material particulado em suspensão, o qual aumenta o espalhamento na região do vermelho; e a baixa concentração de fitoplâncton em decorrência da limitação de luz relacionada à entrada de partículas em suspensão. Nesta região, logo após a transição rio/reservatório, ocorrem eventos dinâmicos importantes devido ao mergulho do rio (águas mais densas que a do reservatório) e sua conseqüente evolução como uma corrente profunda ao longo do reservatório. O cisalhamento vertical entre esta corrente de densidade (maior velocidade quando comparada à das águas do reservatório) e as águas do reservatório cria um tipo de instabilidade, conhecida como *Kelvin-Helmholtz*, que tem o potencial de transportar ascendentemente, partículas e nutrientes. Assim, esse padrão de "manchas" alternando valores opostos de NDVI (altos e baixos) pode também ser manifestação daquele processo (ÖZGÖKMEN; CHASSIGNET, 2002).

Apesar de o SIMA-2 estar localizado em uma região de NDVI intermediário, ele encontra-se inserido numa região em que ocorrem grandes "manchas" (*patches*) com valores mais elevados de NDVI ($> 0,48$). Essas diferenças na distribuição espacial do NDVI entre as estações SIMA-1 (barragem) e SIMA-2 podem ser mais bem observadas na figura 7.

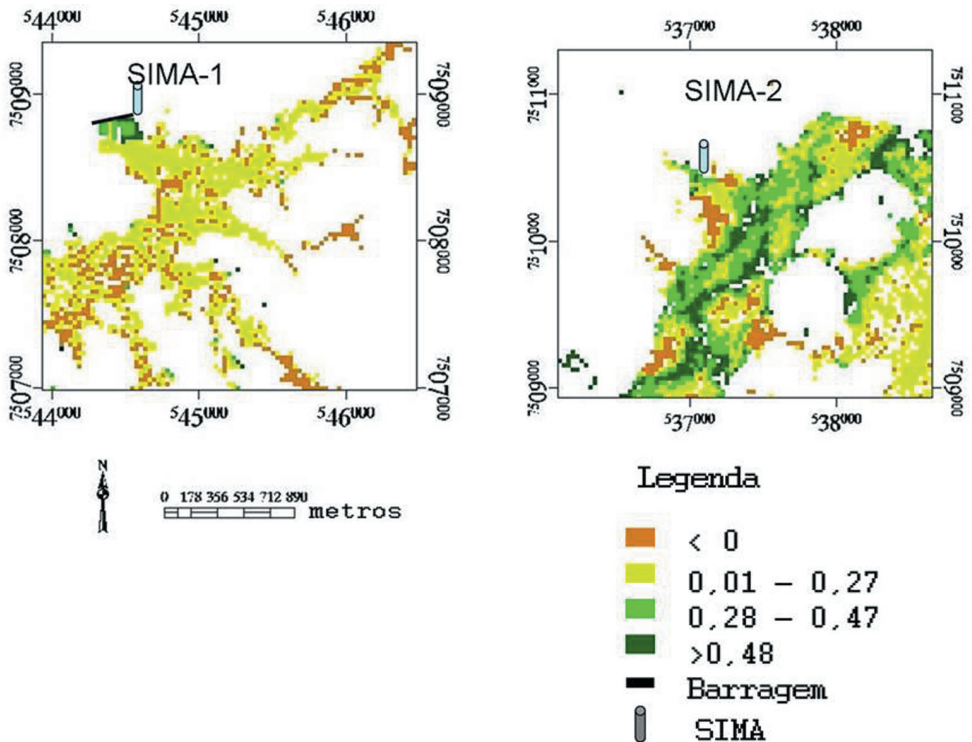


Figura 7 - Distribuição espacial detalhada das classes de NDVI junto às estações SIMA-I e SIMA-II da UHE Funil, mapeadas a partir da imagem TM/Landsat-5 adquirida em 26 de maio de 2007

Ao se analisar espacialmente a distribuição de classes de NDVI como indicadora da presença de florações fitoplanctônicas, pode-se perceber no detalhe da figura 7, que a região de entrada do reservatório de Funil é muito mais crítica do que a área mais próxima à barragem. A razão para essas diferenças espaciais entre a entrada do reservatório e a barragem pode estar relacionada à grande carga de nutrientes trazida pelo Rio Paraíba do Sul, a qual vai favorecer a ocorrência de florações (BRANCO et al. 2002; SOARES et al. 2008) mais frequentes como indicado pelos dados SIMA-II. A região da barragem, embora seja uma região de acúmulo de nutrientes, parte deles já foi utilizada, sedimentada e mineralizada, em decorrência da distância percorrida pela água até ela. Nos meses de acumulação de água e de baixa pluviosidade, ocorrem episódios de florações, as quais alcançam rapidamente altas concentrações de clorofila mas que, também desaparecem mais rapidamente.

Embora Londe (2008) tenha desenvolvido seu trabalho com espectros de campo e em reservatório em posição jusante de um sistema em cascata, seu modelo ($Y = 237x + 6,5$), onde Y é a concentração de clorofila e x o valor de NDVI, foi utilizado para converter os intervalos de classe de NDVI em concentração de clorofila. A tabela 1 mostra os intervalos de concentração de clorofila estimados pelo modelo de Londe (2008) para as classes de NDVI identificadas na imagem e os níveis tróficos associados a elas.

Tabela 1 - Valores estimados de clorofila para os intervalos de NDVI e níveis de eutrofização segundo CETESB (2009)

Classe de NDVI	Classe de concentração de clorofila (μgL^{-1})	Níveis Tróficos
< 0	< 8,87	Mesotrófico
0,01 - 0,27	8,87-70,40	Eutrófico/Hipereutrófico
> 0,48	> 73	Hipereutrófico

Apesar das incertezas envolvidas na aplicação de um modelo empírico em sistema aquático com características distintas das de Londe (2008), os resultados indicam que os valores estimados colocam todo o reservatório, com exceção das áreas de transição rio/lago, na categoria de hipereutrófico. Esses resultados corroboram o diagnóstico realizado pela ANA que indica que, no Estado de São Paulo, a montante do reservatório da UHE vivem 1 800 000 pessoas, que respondem em grande parte pela degradação de sua qualidade de água. Segundo dados da ANA (2009) cerca de um bilhão de litros de esgotos domésticos, praticamente sem tratamento, são despejados diariamente, contribuindo para a situação de degradação da Bacia. A carga poluidora total da Bacia, de origem orgânica, corresponde a cerca de 280 toneladas de DBO por dia, dos quais 86% derivam de efluentes domésticos, e 14% de industriais.

Embora preliminares e em fase de aperfeiçoamento, esses resultados sugerem que os sistemas de sensoriamento remoto orbital que garantam alta frequência de revisita com sensores de resolução espacial compatível à do *Thematic Mapper*/Landsat podem ser ferramentas úteis para monitorar a qualidade da água, principalmente no tocante ao crescente processo de eutrofização dos sistemas aquáticos continentais do Brasil (Tundisi, 2003) e do mundo (WETZEL, 2003).

CONCLUSÕES

Com o objetivo de mapear a distribuição espacial da clorofila-a no reservatório de Funil o presente trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- Embora preliminares, os resultados indicam que índices de vegetação tradicionalmente aplicados ao estudo de ecossistemas terrestres podem ser adaptados para o monitoramento do estado trófico de sistemas aquáticos.
- O uso concomitante de dados de sistemas automáticos permite que a partir da identificação de um aumento da concentração de clorofila por períodos mais longos, possam ser obtidas imagens de satélite para identificar a extensão espacial do problema, e planejar ações de mitigação dos danos ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto Balanço de Carbono dos Reservatórios de FURNAS Centrais Elétricas.

REFERÊNCIAS

- ABDON, M. M.; MEYER, M. Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no Reservatório de Tucuruí através de dados do satélite Landsat/TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6. (SBSR), 1990, Manaus. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1990. p. 545-548. Printed, On-line. (INPE-5174-PRE/1643). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/08.18.18.33>>. Acesso em: 02 nov. 2008..
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Relatório 2008: Cobrança pelo uso de recursos hídricos: bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul / Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA; SAG, 2009. 98p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) BRASIL. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009 / Agência Nacional de Águas**. — Brasília : ANA, 2009. 204 p.
- ARRAUT, E. M.; MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Quanto alimento há para o Peixe-boi Amazônico? Técnicas de processamento digital de imagens para estimar a dimensão de bancos de macrófitas aquáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6609-6614. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.22.18>>. Acesso em: 02 nov. 2008.
- ASSIREU, A.; NOVO, E. M. L. M.; ALCÂNTARA, E.H.; ROLAND, F.; PACHECO, F.S.; STECH, J.L.; LORENZZETTI, J.A. Monitoring a plunging point underflow using satellite and in situ data in a tropical hydroelectric reservoir. **Aquatic Science** (Submetido), 2009.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- BOBEDA, C.R.R. **Isolamento, purificação e caracterização de microcistinas (hepta-peptídeos tóxicos) encontrados em uma floração de Cianobactérias ocorrida no Reservatório do Funil**. Dissertação (Mestrado em Química de Produtos Naturais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.
- BRANCO, C. W. C. ROCHA, M A. ; PINTO G. F. S., GÔMARA ,G. A.; DE FILIPPO, R. Limnological features of Funil Reservoir (R.J., Brazil) and indicator properties of rotifers and cladocerans of the zooplankton community. **Journal of Plankton Research** v. 25, n. 9, p.1169-1175, 2003.
- BRICKER, S.B.; FERREIRA, J.G.; SIMAS, T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status, **Ecol. Modell.** v.169, n. 1, p. 39–60, 2003.
- CABRAL, A. P.; MANTOVANI, J. E.; COSTA, M. P. F.; LIMA, R. A. F.; NOVO, E. M. L. M. Efeitos da concentração e da granulometria na assinatura espectral do material inorgânico em suspensão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6. (SBSR), 1990, Manaus. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1990. p. 496-504. Printed, On-line. (INPE-7870-PRE/3710). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/08.18.17.36>>. Acesso em: 02 nov. 2008. São José dos Campos, 2004.
- CAPUTO, L.; NASELLI-FLORES, L.; ORDOÑEZ, J. And ARMENGOL, J. Phytoplankton distribution along trophic gradients within and among reservoirs in Catalonia (Spain). **Freshwater Biology**, v. 53, p.2543-2556, 2008.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Índice do Estado Trófico (IET). Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iva_iet.asp>. Acesso em: 22 de setembro de 2009.

CORDEIRO, M. C.R. The Hydrological Monitoring Network Services and Gaps **Workshop on Capacity Building. Group on Earth Observations**. São José dos Campos, INPE, 29-31 de Maio, 2006.

CRACKNELL, A. P.; NEWCOMBE, S. K.; BLACK, A. F.; KIRBY, N. E. The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) Concerted Action. **International Journal of Remote Sensing**. v. 22, n. 2 & 3, p. 205 – 247, 2001.

DEKKER, A.G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 130 p. Tese (Doutorado) - Vrije Universiteit, Institute of Earth Sciences, Amsterdam, The Netherlands. 1993.

FÉLIX, I. M. Monitoramento da qualidade da água utilizando-se modelos empíricos obtidos a partir de dados de sensoriamento remoto: Reservatório de Barra Bonita - SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. (SBSR), 1993, Curitiba, BR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993. v. 4, p. 119-127. Printed, On-line. (INPE-7915-PRE/3751). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.00.44.36>>. Acesso em: 02 nov. 2008.

FERRÃO-FILHO, A. da S.; SOARES, M. C.; ROCHA, M. I. de A., MAGALHÃES, V. de F., OLIVEIRA & AZEVEDO, S. M. F. de Florações de Cianobactérias tóxicas no reservatório do Funil: dinâmica sazonal e conseqüências para o zooplâncton. **Oecol. Bras.** v. 13, n. 2, p. 346-365, 2009.

GONS, H.; BURGER-WIERSMA, T.; OTTEN J., RIJKEBOER, M. (1992). Coupling of phytoplankton and detritus in a shallow, eutrophic lake (Lake Loosdrecht, The Netherlands). **Hydrobiologia**, v. 233, p. 51-59, 1992.

Hu, C.; He, M. X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area. **Eos, American Geophysical Union Transactions**, v. 89, n. 33, p. 302-303, 2008.

HUNTER, P.; TYLER, A.N.; PRÉSING, M.; KOVÁCS, A.W., PRESTON, T. 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.

JUPP, D.; KIRK, J.; HARRIS, G. Detection, identification and mapping of cyanobacteria using remote sensing to measure the optical quality of turbid inland waters. **Australian Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 45, p. 801-828, 1994.

KUTSER, T.; METSAMAA, L.; STROMBECK, N.; VAHTMAE, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.67, p. 303-312, 2006

LIMA, I. B. T. ; RAMOS, F. M. ; CARVALHO, J. C. ; BAMBACE, L.A.W. ; OMETTO, J. P. H. B. ; ROSA, R. R ; MAZZI, e A ; RASERA, M ; NOVO, E. M. L.M. Anthropogenic flooded lands and atmospheric methane. **Ecohydrology and Hydrobiology**, v. 7, p. 11-21, 2007.

LIMA, I.B.T., STECH, J. L.; MAZZI, E.A.; RAMOS, F.M.; Novo, E.M.L.M.; LORENZZETTI, J. A.; Rosa, R.R.; Barbosa, C.C.; Ometto, J.P.; Assireu, A.T. 2005: Linking telemetric climatic-limnologic data and online CH4 and CO2 flux dynamics. In: SANTO, M.A.; ROSA, L.P. (Ed.) **Global Warming and Hydroelectric Reservoirs**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/Eletróbrás, 2005, p. 67-69.

LIN, Q.; ZHANG, Y.; NIE, Y.; GUAN, Y Detection of harmful algal blooms over the Gulf Of Bohai sea in China at visible and near infrared (NIR) wavelengths of remote sensing. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**. v. 17, n. 6, p 861-871, 2003.

LOBO, FL., BARBOSA, CC., NOVO, EMLL. and YUNES, JS. Mapping potential cyanobacterial bloom using Hyperion/EO-1 data in Patos Lagoon estuary. **Acta Limnol. Bras.**, v. 21, n. 3, p. 299-308, 2009.

LONDE, L.R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos.

LORENZZETTI, J. A., STECH, J.L.; NOVO, E. M. L.M; LIMA, I. B.T., 2005: SIMA: A near real time buoy data acquisition and telemetry system as a support for limnological studies. In: SANTO, M.A.; ROSA, L.P. (Ed.) **Global Warming and Hydroelectric Reservoirs**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/Eletróbrás, 2005, p. 71-79.

MANTOVANI, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada**. 1993. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

METSAMAA, L.; KUTSER, T.; STROMBECK, N. Recognising cyanobacterial blooms based on their optical signature: a modelling study. **Boreal Environment Research**, v.11, p. 493-506, 2006.

MOBLEY, C.D. **Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters**. San Diego. Academic Press. 1994.

NÓBREGA, I. W. **Análise Espectral de Sistemas Aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

NOVO, E. M. L. , C. A. STEFFEN; C. Z. F. BRAGA. Results of a Laboratory Experiment Relating Spectral Reflectance to Total Suspended Solids. **Remote Sensing of Environment**. v. 36, n. 1, p. 67-72, 1993.

NOVO, E. M. L. M.; PEREIRA FILHO, W.; MELACK, J. M. Assessing the utility of spectral band operators to reduce the influence of total suspended solids on the relationship between chlorophyll concentration and the bidirectional reflectance factor in Amazon waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 22, p. 5105-5115, 2004.

NOVO, E. M. L.M. ; STECH, J. L. ; BARBOSA, C. C. ; LORENZZETTI, J. A. Space Technology contribution for sustainable development in the Amazon floodplain. In: EDOSUD FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECOSYSTEMS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5, 2005, Cadiz. **Ecosystems and sustainable development**. Southampton: WITpress, 2005. p. 563-570

ÖZGÖKMEN, T.M.; CHASSIGNET, E.P. Dynamics of two-dimensional turbulent bottom gravity currents. **J. Phys. Oceanogr.** n. 32, p. 1460-1478, 2002.

PEREIRA FILHO, W. **Integração de dados de Campo e Sensoriamento Remoto no Estudo da Características de Bacia de Captação na Concentração de Sólidos em Suspensão em Reservatório: o exemplo de Tucuruí**. 1990. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Influência das condições do tempo em espectros de reflectância da água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 415-422. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12596-PRE/7889). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.20.51>>. Acesso em: 02 nov. 2008.

PONÇONO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R. ; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**, São Paulo: IPT, 94p., 1981 (Publicação IPT 1183).

RAMOS, F. M.; LIMA, I.B. T.; ROSA, R. R.; CARVALHO, J.; RASERA, M ; OMETTO, J P.H.B ; ASSIREU, A.T. ; STECH, J.L . Extreme Event Dynamics in Methane Ebullition Fluxes from Tropical Reservoirs. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. L21404, 2006.

RANDOLPH, K.L. **Remote sensing of cyanobacteria in case II waters using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geografia, Indiana University, Indiana (USA), 2007.

REINART, A.; KUTSER, T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. **Remote Sensing of Environment**, v.102, p. 74-85, 2006.

ROCHA, M.I.A, BRANCO, C. W.C. ; SAMPAIO, G.F.; GÔMARA, G.A E DE FILIPPO, R. Spatial and temporal variation of limnological features, *Mycrocystis aeruginosa* and zooplankton in na eutrophic reservoir (Funil Reservoir, Rio de Janeiro). **Acta Limnológica Brás.** v. 14, n. 3, p. 73-86, 2002.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; PEREIRA FILHO, W. 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, n. 2, p. 279-290, 2007.

SAUSEN, T. M. **Estudo da dinâmica do alto rio São Francisco e Reservatório De Três Marias através de Imagens MSS/Landsat.** 1980. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos.

SILVA, O. F. **Caracterização dos gradientes longitudinais e laterais do Reservatório Tucuruí/PA, através da análise estatística dos bancos de dados limnológicos e de imagens TM-Landsat.** 1994. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos.

SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; HUSZAR, V.L. M.; BRANCO, C. W. C.; AZEVEDO, S. M. F. O. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 13, n. 4, 2008.

STECH, J. L.; NOVO, E.M.L.; LIMA, I.B.T.; CARVALHO, J.C.; ASSIREU, A.T.; LORENZZETTI, J.A.; BARBOSA, C.C.; ROSA, R.R. . Telemetric monitoring system for meteorological and limnological data acquisition in aquatic environments. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LIMNOLOGY, 29, 2004, Estocolmo. **Proceedings...**Estocolmo : International Society of Limnology, 2004.

STECH, J.L.; LIMA, I.B.T.; NOVO, E.M.L.; ASSIREU, A.T.; LORENZZETTI, J.A. Telemetric monitoring system for ecohydrology applications in aquatic environments. **Mitteilungen. Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie**, v. 29, p. 1747-1750, 2006

STEVENSON, M.R.; LORENZZETTI, J.A.; STECH, J.L.; ARLINO, P.R.A. SIMA - an integrated environmental monitoring system. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993.

TORGAN, L.C. Floração de algas: composição, causas e conseqüências. **Insula**, v. 19, p. 15-34, 1989.

TUCCI, A.E., SANT'ANNA, C.L. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya & Subba Raju (Cyanobacteria): variação semanal e relações com fatores ambientais em um reservatório eutrófico, São Paulo, SP, Brasil. **Revista Brasil. Bot.**, v.26, n.1, p.97-112, 2003.

TUNDISI, J.G. **Água no século XXI. Enfrentando a escassez.** São Carlos: Editora Rima, 248p., 2003.

WETZEL, R.G. **Limnology. Lake and River Ecosystems.** San Diego: Academic Press, 2003, 1006p.

Recebido em agosto de 2009

Revisado em novembro de 2009

Aceito em maio de 2010