

**MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA UTILIZANDO-SE MODELOS  
EMPÍRICOS OBTIDOS A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO  
RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA - SP.**

**IARA MUSSE FELIX**

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515  
12201-970-Sao José dos Campos, SP, Brasil  
iara@ltid.inpe.br

**Abstract.** This paper study of the relationship between water quality parameters and Landsat-5 TM multispectral digital data, in order to obtain empirical models for water quality monitoring of Barra Bonita reservoir. Spectral reflectance TM data and water quality parameters (total suspended solids, organic and inorganic material, chlorophyll and Secchi depth) were obtained simultaneously and related using stepwise linear multiple regression analysis. Results show that calibration models for summer conditions were statistically reliable for total suspended solids, inorganic material and organic material estimation.

### **1-Introdução**

A utilização de dados de sensoriamento remoto para o monitoramento da qualidade da água fundamenta-se no fato de que determinados componentes indicadores da qualidade da água (material orgânico e inorgânico em suspensão, fitoplâncton e material orgânico dissolvido) alteram as propriedades espectrais da água pura.

As alterações no espectro da água devido as substâncias nela presentes são decorrentes do efeito que seus constituintes tem sobre suas propriedades ópticas inerentes, absorvendo ou espalhando seletivamente a radiação eletromagnética.

Assim, a radiação emergente

do volume d'água é governada pela razão entre a radiação espalhada e a radiação absorvida por este (Morel e Bricaud, 1981)

Desta forma, a radiância medida por um sensor (radiância aparente) pode ser utilizada como elo para se obter informações qualitativas e quantitativas das substâncias presentes no corpo d'água. Neste processo de obtenção de informações torna-se necessário tanto o conhecimento das características espectrais intrínsecas aos alvos como também dos fatores que interferem no processo de aquisição dos dados por um sensor remoto (Slater, 1980; Novo, 1989).

Embora a realização de inúmeros trabalhos evidenciem o potencial do uso de dados de

sensoriamento remoto para a estimativa de parâmetros indicadores da qualidade da água, a literatura demonstra que nenhum modelo universal baseado unicamente em dados de sensoriamento remoto pode ser obtido e empregado em diferentes ambientes. Isto, devido a diversidade de combinação e concentração dos constituintes óticos das águas naturais (Morel e Gordon, 1980; Spitzer e Wernand, 1986; Richard e Lathrop, 1992).

Por outro lado, verifica-se que os melhores resultados tem sido obtidos para sistemas marinhos devido em primeiro lugar a menor complexidade das águas oceânicas e em segundo lugar pela disponibilidade de um sensor específico para estudo de alvos aquáticos, o Coastal Zone Color Scanner-CZCS (Morel e Gordon, 1980).

Este fato sugere que a busca de modelos gerais, com tendências "universais" pressupõe a realização de trabalhos sistemáticos em diferentes ambientes, destacando-se os sistemas continentais. Assim, desde 1988, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais vem desenvolvendo pesquisas no âmbito do projeto Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos (SISA), com o objetivo geral de criar um banco de dados sobre propriedades das águas continentais e suas respostas espectrais medidas ao nível de campo e laboratório.

Este estudo faz parte do trabalho de dissertação de mestrado (Felix, 1991), o qual está inserido no Projeto SISA-Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos (Novo e Braga, 1991a) e tem como objetivo ge-

ral analisar estatisticamente (através de regressão linear múltipla) o relacionamento entre parâmetros limnológicos opticamente ativos e dados espectrais do sensor TM/Landsat.

O objetivo específico deste trabalho é gerar modelos empíricos para estimativa de parâmetros indicadores da qualidade da água do reservatório de Barra Bonita.

Os dados aqui apresentados correspondem ao período de verão, complementando estudos já realizados e em andamento referentes ao período de inverno (Novo e Braga, 1991a; 1991b).

## **2-Material e Métodos**

### **2.1 Área de Estudo**

A área de estudo corresponde ao reservatório de Barra Bonita, localizado no estado de São Paulo, situado entre as coordenadas de 22°29'00" de latitude S e 48°34'00" de longitude W.

O reservatório de Barra Bonita apresenta uma área inundada de aproximadamente 324,84 Km<sup>2</sup>, formado principalmente pelo represamento dos rios Tietê e Piracicaba.

As características hidrográficas da região conferem aos braços do reservatório formados pelos rios Tietê e Piracicaba, condições ambientais distintas.

Localizado na região mais populosa e desenvolvida do interior do Estado (Calijuri, 1988), encontra-se sujeito a intensa ação antropica.

As condições climáticas da região se caracterizam por uma transição entre os climas tropical e subtropical, em que as estações anuais são bem definidas. As variações sazonais são pouco pronunciadas, sendo as maiores diferenças verificadas entre o verão e o inverno, devido aos períodos de maior precipitação e um período seco (com chuvas escassas ou ausentes) respectivamente (Calijuri, 1988).

## 2.2 Aquisição dos Dados

Os parâmetros limnológicos estudados foram coletados em 28 pontos de amostragem, dentro do intervalo de cinco horas, no dia de passagem do satélite Landsat-5 sobre a área de estudo (28 de novembro de 1990).

As condições do tempo no dia de passagem do satélite apresentavam-se muito boas (céu totalmente claro e boa visibilidade).

As amostras de água foram obtidas em sub-superfície (a aproximadamente 30 cm de profundidade), permitindo que fosse amostrado um volume de água representativo do processo de interação da água com a radiação eletromagnética.

As filtrações das amostras foram feitas logo após as coletas evitando processos de degradação das amostras. As análises de laboratório das amostras foram feitas com base na metodologia descrita por Golterman et al. (1978) e Calijuri, (1988).

Os parâmetros limnológicos oticamente ativos estudados correspondem a: clorofila total (CLTOT); material orgânico e

inorgânico em suspensão (MO e MI respectivamente); total de sólidos em suspensão (TSS) e profundidade de desaparecimento do disco de Secchi (SEC).

## 2.3 Processamento dos Dados TM/Landsat

Dados digitais do sensor TM, correspondentes as bandas 1, 2 e 3, situadas na região do visível e banda 4 (no infravermelho próximo) foram processados no ambiente do Sistema de Tratamento de Imagens - SITIM.

O primeiro processamento realizado foi o registro das imagens, utilizando-se de pontos de controle extraídos de uma carta topográfica na projeção UTM-Universal Transversa de Mercator.

Os valores digitais (ND) foram extraídos de uma janela de 4x4 pixel, tendo como "ponto central" as coordenadas dos respectivos pontos de coleta "in situ".

O critério de se adotar uma amostragem de 16 pixel para cada ponto de coleta em campo teve como objetivo evitar erros referentes a imprecisão do sistema de localização em campo, bem como para aumentar a relação sinal ruído (Whitlock et al. 1982; Richard e Lathrop, 1992).

Os dados médios dos valores digitais obtidos para cada ponto de coleta em cada banda espectral foram corrigidos do efeito aditivo da atmosfera, com base no método proposto por Chaves, (1988).

O procedimento proposto por Chaves (1988), permite que os valores digitais registrados

pelo sensor sejam convertidos em valores de reflectância, fornecendo um relacionamento mais preciso entre valores espectrais e propriedades físicas da superfície (Epiphânio e Formaggio, 1988); principalmente quando se deseja relacioná-los em termos de um modelamento de fatores físicos (Moik, 1980).

No processo de correção do efeito de espalhamento atmosférico e transformação dos valores digitais em reflectância foram considerados o modelo de atmosfera muito clara ( $\lambda^{-4}$ ), tomando-se a banda 1 como banda de referência, e os dados de calibração do sensor TM de cada banda apresentados por Markhan e Barker (1986).

## 2.4 Análise Estatística dos Dados

Para analisar os relacionamentos entre os parâmetros limnológicos e os valores de reflectância das Bandas TM, foram realizadas análises de regressão linear múltipla "stepwise". O método estatístico "stepwise" opera através da geração de uma sequência de equações de regressão, incluindo ou excluindo uma variável passo a passo.

Os parâmetros estatísticos utilizados pelo "stepwise" para definir a melhor equação de regressão são: coeficiente de explicação ou determinação ( $R^2$ ), erro padrão da estimativa (MSE) e estatística F. Estes parâmetros estatísticos são citados por Whitlock et al. (1982), como critérios confiáveis na seleção do melhor modelo de regressão múltipla relacionando-se variáveis espectrais e parâmetros da água.

Um intervalo de nível de significância de 95 por cento e um valor de F de inclusão e exclusão igual a 4 foram definidos para a obtenção e seleção dos modelos de estimativa dos parâmetros limnológicos. Estes valores estão de acordo com indicações de Montgomery e Peck (1982), considerando-se o número de amostras e o número de variáveis independentes utilizadas.

Análises de correlação foram realizadas entre os dois grupos de dados (dados espectrais e parâmetros limnológicos) e dentro de cada grupo, com objetivo de auxiliar as análises e o tipo de relacionamento entre os dados.

## 3-Análise dos Resultados

### 3.1 Análise de Correlação

A análise da Tabela 1 (correlação entre parâmetros limnológicos e reflectância), permite verificar que dentre as cinco variáveis estudadas (CLTOT, MO, MI, TSS e SEC) quatro destas apresentaram coeficientes de correlação acima de 0.58 e três destes acima de 0.65 pelo menos para uma banda espectral.

A variável MI apresentou os maiores valores de correlação com os valores de reflectância ( $r=0.94$ ) para as bandas TM3 e TM4. A correlação alta e positiva entre MI e as bandas TM3 e TM4 era esperada e pode ser explicada pela maior sensibilidade destas bandas para a amplitude de concentração de MI amostrado (0.12 a 44.40 mg/l).

O MI tende a elevar os valores de radiância devido ao efeito de espalhamento das par-

tículas, sendo que a sensibilidade espectral à variação de MI tende a decrescer com o aumento da concentração de sedimento em suspensão, sendo esta relação, no entanto, menos influenciada em maiores comprimentos de onda (Moore, 1977; Whitlock et al., 1977; Novo et al., 1988; Curran e Novo, 1988; Cabral et al., 1990; de Souza et al., 1991).

Tabela 1 - Coeficientes de correlação significativos ao nível de 95% entre parâmetros limnológicos e reflectância espectral

	CLTOT	TSS	MI	MO	SEC
TM1	0.15	0.89	0.90	0.69	-0.68
TM2	0.15	0.91	0.92	0.70	-0.68
TM3	0.11	0.93	0.94	0.71	-0.64
TM4	0.11	0.93	0.94	0.74	-0.57

A segunda variável limnológica que se apresentou mais significativamente correlacionada com as bandas espectrais TM foi o TSS.

A alta e positiva correlação entre TSS e as bandas TM3 e TM4 ( $r=0.93$ ) era esperada, uma vez que as concentrações de TSS correspondem ao somatório das concentrações de MI e MO.

A correlação mais baixa entre TSS e as bandas TM3 e TM4 em relação ao MI e estas bandas, pode ser explicada pelo menor nível de correlação entre a variável MO e as bandas espectrais, já que, além de agir como partículas espalhadoras, o MO também apresenta maior capacidade de absorção da radiação,

enquanto o MI age preferencialmente como espalhador da radiação (Maul, 1985).

Os coeficientes de correlação entre a variável SEC e as bandas espectrais (TM1, TM2, TM3 e TM4) mantiveram-se entre -0.57 e -0.68, evidenciando certa constância de relacionamento entre esta variável e as bandas espectrais.

A correlação negativa entre SEC e os dados espectrais era esperada e pode ser explicada pelo fato de que a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi diminui com o aumento da turbidez da água, sendo esta dependente da concentração de TSS (Braga, 1988; Richard e Lathrop, 1992).

Por outro lado, a variável SEC, apresentou coeficientes de correlação situados entre -0.61 e -0.71 com todas as demais variáveis limnológicas. Isto sugere que a variação da profundidade de Secchi não está sendo explicada por nenhum parâmetro individualmente, de forma preponderante.

A variável CLTOT não apresentou correlação significativa com banda alguma. Um fator que poderia explicar o baixo relacionamento entre a clorofila e as bandas espectrais TM, seria o fato de que o comportamento espectral do reservatório, analisado segundo a resolução espectral do sensor TM, foi preponderantemente influenciado pela distribuição da concentração de MI, MO e TSS, mascarando o efeito da absorção da clorofila nas bandas TM1 e TM3. Isto deve-se ao fato de que a sensibilidade espectral para a estimativa de clorofila é fortemente influenciada pela com-

binação e concentração dos demais componentes óticamente ativos no corpo d'água (Kondratyev e Pozdniakov, 1990).

Outro fator que evidencia as análises feitas anteriormente é que as maiores concentrações de CLTOT amostradas foram obtidas onde também foram elevadas as concentrações de MO.

### 3.2 Modelos de Estimativa

Dentre os parâmetros limnológicos estudados, o MI, TSS e MO foram os que apresentaram respectivamente, os melhores resultados.

O modelo obtido para estimativa de MI apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0.90 e pode ser expresso por:

$$MI = 2.2423 + (-657.62)RTM1 + 429.76RTM3$$

Onde RTM1 e RTM3 são os valores de reflectância nas bandas 1 e 3 respectivamente

O erro médio na estimativa de MI, para o modelo gerado corresponde a 2.86 mg/l. Considerando-se a amplitude de concentração de MI no ambiente estudado, esta margem de erro é bastante aceitável para a maior parte do reservatório.

A seleção das bandas TM1 e TM3 no modelo, poderia ser explicada por dois fatores: o primeiro refere-se a sensibilidade destas bandas às amplitudes de concentração amostradas (baixa a alta). A banda TM1 apresenta uma maior sensibilidade as baixas concentrações, enquanto a banda TM3 é mais

sensível as medias e altas concentrações. O outro fator que pode ter contribuído para a exclusão das bandas TM2 e TM4 no modelo, é a alta correlação destas com a banda TM3, sendo portanto eliminada devido ao efeito da colinearidade entre as variáveis independentes (variáveis de entrada).

O modelo obtido para estimativa de TSS apresentou um coeficiente de determinação igual a 0.87 e pode ser expresso por:

$$TSS = -2.66 + 750.51RTM4$$

Onde RTM4 corresponde ao valor de reflectância na banda 4.

O erro médio na estimativa de TSS, para o modelo gerado corresponde a 2.0mg/l, sendo considerado bastante aceitável, para quase todo reservatório.

A menor precisão do modelo obtido para a estimativa de TSS em relação ao MI, pode ser explicada, pelo menor nível de relacionamento entre o MO e as bandas espectrais TM.

Os modelos obtidos para estimativa do MO e SEC foram estatisticamente menos satisfatórios, o que pode ser explicado pelos baixos valores de correlação entre estes parâmetros e as bandas espectrais, conforme já evidenciado anteriormente. Os coeficientes de determinação obtidos nos modelos corresponderam a 0.53 e 0.45 para MO e SEC respectivamente. Estes modelos podem ser expressos por:

$$MO = 2.04 + 107.36RTM4$$

Onde RTM4 é o valor de reflectância da banda 4.

SEC = 2.33 + RTM2

Onde RTM2 é o valor de reflectância da banda 2.

Para o parâmetro CLTOT, nenhum modelo foi obtido considerando-se os parâmetros estatísticos pré-determinados neste trabalho.

#### 4-Conclusão

Dentre os parâmetros limnológicos estudados, o MI, MO e TSS foram os que apresentaram maior nível de relacionamento com os valores de reflectância espectral.

O modelo de regressão linear mostrou-se estatisticamente satisfatório para a estimativa de TSS e MI.

A falta de relacionamento entre CLTOT e os valores de reflectância espectral pode estar fortemente associada a baixa sensibilidade do sensor TM à estimativa de clorofila em situações onde covariam médias e altas concentrações de sedimento em suspensão. Estudos complementares utilizando dados com alto poder de resolução espectral (10nm) em desenvolvimento (Felix, 1991) permitirão responder mais adquadamente a estas questões.

Os modelos realizados correspondem a modelos empíricos calibrados com dados obtidos "in situ". Os resultados obtidos neste trabalho correspondem a situação de verão. Este fato deve ser considerado uma vez que, as condições de ocupação das margens do reservatório, associadas ao maior índice de precipitação nesta época do ano

podem ter sido responsáveis pelo comportamento espectral do reservatório devido ao efeito do escoamento superficial.

Embora os modelos obtidos representem um "diagnóstico" de uma determinada data, a continuidade dos estudos poderá permitir o desenvolvimento de modelos mais gerais, aplicados ao reservatório de Barra Bonita. Este procedimento poderá ser alcançado dentro do projeto SISA, uma vez que estão sendo analisados dados sistemáticos referentes aos dois períodos que intervêm diretamente nas condições ambientais do reservatório, ou seja, verão e inverno.

#### Agradecimentos

As coletas das amostras de água foram realizadas com apoio do CRHEA-Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada-USP de São Carlos e da CESP-Companhia Energética de São Paulo. As análises de laboratório foram feitas no CRHEA, com assistência do Dr. José G. Tundise, Dra Maria do Carmo Calijuri e Sr. Amandio.

Agradecimentos em particular a Dra Evelyn M. L. de Moraes Novo pela assistência e contribuição em todas as etapas da pesquisa.

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-FAPESP (Processo No 88/4016-5).

## Referências

- Braga, C.Z.F. **Utilização de imagens dos satélites Landsat-5 e NOAA 9 na identificação de parâmetros físico-químicos da água na Baía de Guanabara.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988. 115 p. (INPE - 4761-TDL/349).
- 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., Manaus, 24-29 jun. 1990. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1990, v.1, p. 496-504.
- Calijuri, M.C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização.** (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1988.
- Chaves, P. S. An improved dark object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 24(3):459-479, 1988.
- Curran, P.J.; Novo, E.M.M.L. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance : a review. **Journal of Coastal Research**, 4(3):351-368, 1988.
- de Souza, R. B.; Felix, I. M.; Mantovani, J. E.; Novo, E. M. L. M. Efeito da concentração de dois tipos de sedimentos em suspensão sobre a colorimetria e reflectância da água. In: Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota. Cuzco, 28 Oct.-01 Nov. 1991b. **Proceedings.**
- Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R. Abordagens de uso de nível de cinza e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 1988. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1988, v. 2, p. 400-409.
- Felix, I.M. **Modelos empíricos para a estimativa de parâmetros limnológicos a partir de dados de sensoriamento remoto-Reservatório de Barra Bonita-SP** (Dissertação Preliminar de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991. No prelo.
- Golterman, H.L.; Climo, R.S.; Ohnstad, M.A.M. **Methods analysis of fresh waters.** 2. ed. Oxford, Blackwell Scientific, 1978. 214 p.
- Kondratyev, K. Ya.; Pozdniakov, D.V. Passive and active remote sensing of the inland water phytoplankton. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 44:257-294, 1990.
- Markham, B.L.; Barker, J.L. Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, 22(1):39-71, 1987.

- Maul, G.A. **Introduction to satellite Oceanography.** Dordrecht, Martinus Nighoff, 1985. 606 p.
- Moik, J.G. **Digital processing of remotely sensed images.** Washington, NASA, 1980. 330p.
- Montgomery, D.C.; Peck, E.A. **Introduction to linear regression analysis.** New York, NY, Wiley, 1982. 504p.
- Moore, G.K. Satellite surveillance of physical water-quality characteristics. In: **International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 12., Ann Arbor, MI, 1977. **Proceedings**, Ann Arbor, University Michigan, 1977, p. 445-461.
- Morel, A.Y.; Gordon, H. Report of the working group on water color. **Boundary-layer Meteorology**, 18(3):343- 355, 1980.
- Morel, A.; Bricaud, A. Theoretical results concerning the optics of phytoplankton, with special reference to remote sensing applications. In: **Oceanography from Space.** New York, J.I.R. Gower. 1981. p.313-327.
- Novo, E.M.L.M.; Hanson, J.D.; Curran, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(7):1283-1289, 1988.
- Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, Edgard Blucher, 1989. 380p.
- Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F. **Relatório do projeto "Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos".** São José dos Campos, INPE, 1991a. (INPE-5271-PRP/159).
- Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F. Use of TM/Landsat data to estimate chlorophyll concentration and turbidity in the Barra Bonita reservoir. Presented in the **Internationaal Symposium on Remote Sensing of environment**, Rio de Janeiro, Brasil, 27-31 may 1991b.
- Slater, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems.** Reading, Addison Wesley, 1980. 575 p.
- Richard, G.; Lathrop Jr. Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid Inland water quality. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 58(12):465-470, 1992.
- Spitzer, D.; Wernand, M. R. Determination of spectral signatures of natural water by optical airborne and shipborne instruments. In: **Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management**, Enschede, 1986. **Proceedings**, Enschede, ISPRS, 1986, p.771-773.
- Whitlock, C.H.; Ursy, J.W.; Witte, W.G.; Garganus, E.A. **Laboratory measurements of upwelled radiance and reflectance of Calvert, Ball, Jordan and Feldspar soil sediments.** Washington, D.C., 1977. (NASA, TP - 1039).