

USO DE IMAGENS LANDSAT E DADOS DE CAMPO PARA AVALIAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE MATERIAL EM SUSPENSÃO EM RESERVATÓRIOS DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

ROSANGELA SAMPAIO REIS¹
EVLYN MÁRCIA LEÃO DE MORAES NOVO²
EVALDO LUIZ GAETA ESPÍNDOLA³
WILLIAM SEVERI⁴

¹DAE/CTEC - Universidade Federal de Alagoas
Campus AC Simões - 57000-000 - Maceió - AL, Brasil
rsr@fapeal.br

²INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@ltid.inpe.br

³SHS/EESC - Universidade de São Paulo
Av. Carlos Botelho, s/n - São Carlos - SP, Brasil
elgaeta@sc.usp.br

⁴DEPESCA - Universidade Federal Rural de Pernambuco
Dois Irmãos - Recife - PE, Brasil
wseveri@truenet.com.br

Abstract. The construction of reservoirs generally produces plenty of changes to the river basin. This paper reports a research carried out to assess the actual situation of the cascading reservoir system built on the lower mid-section of the São Francisco river (Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso system I-II-III, and Paulo Afonso IV). Water samples were collected in 23 stations throughout 1999 and 2000 near concurrently to satellite overpasses to determine the input of particulate matter. These data were integrated to climatic information to carry out a spatial (horizontal and vertical) and time-based (annual cycle) analysis. The results show seasonal influences (direct and indirect effects of rainfall) on the environmental variables, with greater input of particulate matter on the upper portion of the Itaparica reservoir and the shaping of a longitudinal gradient from the river to the dam. The use of spectral data made it possible to figure out the suspended sediment distribution pattern in the reservoirs at the rainy season. The results show that satellites images were extremely useful for understanding the spatial component of the environmental studies.

Keywords: remote sensing, image processing, suspended sediments, São Francisco river.

1. Introdução

A identificação dos processos envolvidos na distribuição de sedimentos em cursos d'água não é fácil. Hilton *et al.* (1986) referem-se a evidências de pelo menos 10 mecanismos de distribuição de sedimentos em pequenos lagos, entre os quais: formação de delta na zona lótica; pluma de sedimentação; mistura completa contínua; mistura completa intermitente; mistura completa intermitente no epilimnio; ataque de ondas periféricas; redistribuição randômica de sedimentos; correntes de erosão/deposição e degradação orgânica. Todos esse fatores resultam em uma distribuição irregular de sedimentos no fundo, os quais em alguns casos tem como consequência a maior deposição de material na porção mais profunda do reservatório.

Nas pesquisas tradicionais, as análises limnológicas são realizadas a partir de um número limitado de estações, em que a variação espacial é obtida partindo-se da extrapolação de

medidas pontuais. Entretanto, a falta de representatividade espacial e temporal pode encobrir diferenças importantes, cujo conhecimento é fundamental para o entendimento do funcionamento de ecossistemas aquáticos. As limitações metodológicas destas pesquisas colaboram de forma significativa na decisão de incorporar os dados espectrais ao estudo de sistemas aquáticos, possibilitando ampliar a representatividade espacial das amostragens convencionais (Novo & Tundisi, 1988).

Contudo, Morel & Berthon (1989) consideram que o uso das técnicas de sensoriamento remoto apresenta uma limitação importante, pois os sensores são capazes de detectar material particulado em suspensão e pigmentos apenas na camada superficial, devido à forte atenuação que a radiação eletromagnética sofre ao penetrar na coluna d'água. Morel & Prieur (1977) também consideram os problemas das análises qualitativas e quantitativas de material em suspensão através de dados remotos, referindo-se primeiro à dificuldade de aquisição de informações significativas do sinal recebido pelo sensor, pois isto envolve uma avaliação dos efeitos da reflexão na interface água-ar e da atenuação e dispersão atmosférica. A segunda é a interpretação da composição espectral do fluxo radiante em relação às propriedades ópticas da água, a qual está vinculada a concentração de material particulado e dissolvido.

Nesse sentido, diversos autores têm intensificado os estudos aplicando sensoriamento remoto em ambientes aquáticos, os quais têm seguido duas vertentes. A primeira linha de pesquisa está orientada para a determinação dos componentes da água que influenciam sua resposta espectral (Yentsch & Yentsch, 1979; Choubey & Subramanian, 1991). A segunda linha, por outro lado, pretende estimar os parâmetros de qualidade da água com o uso de dados de sensoriamento remoto (Froidefond *et al.*, 1991; Noernberg *et al.* 1996, Nellis *et al.*, 1997; Giardino *et al.*, 2001).

Visando contribuir com informações sobre o uso de dados espectrais na análise do processo sedimentológico, este trabalho buscou mapear a variação das concentrações de material em suspensão em reservatórios do sub-médio São Francisco, no semi-árido do Brasil, através de imagens de satélite Landsat, a partir da correlação de dados espectrais e dados de campo.

2. Área de estudo

O vale do São Francisco está dividido em 4 regiões fisiográficas: Alto, que se estende desde as cabeceiras no município de São Roque de Minas até a cidade de Pirapora (MG); Médio, que compreende o trecho desde Pirapora até a cidade de Remanso (BA); Submédio, que estende-se de Remanso até a cidade de Paulo Afonso (BA) e Baixo São Francisco, de Paulo Afonso à foz, no Oceano Atlântico. A área da pesquisa foi delimitada no trecho entre as cidades de Barra de Tarrachil e Paulo Afonso, na Bahia (**Figura 1**), no submédio São Francisco, situada em áreas dos Estados de Pernambuco e Bahia, incluindo os reservatórios de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso I-II-III e Paulo Afonso IV, recebendo neste trecho as contribuições das sub-bacias dos rios Pajeú e do rio Moxotó, ambos intermitentes. A área da bacia do São Francisco é de 640000 km², estando a região do sub-médio situada no semi-árido nordestino. O clima, segundo a classificação de Köppen, é o semi-árido de estepes (Bshw), com precipitações médias anuais de 560 mm.

As temperaturas médias mensais do ar são altas, com valores variando entre 23°C e 30°C, verificando-se que as temperaturas mais elevadas ocorreram no período de chuvas, que ocorre em geral, entre dezembro e abril.

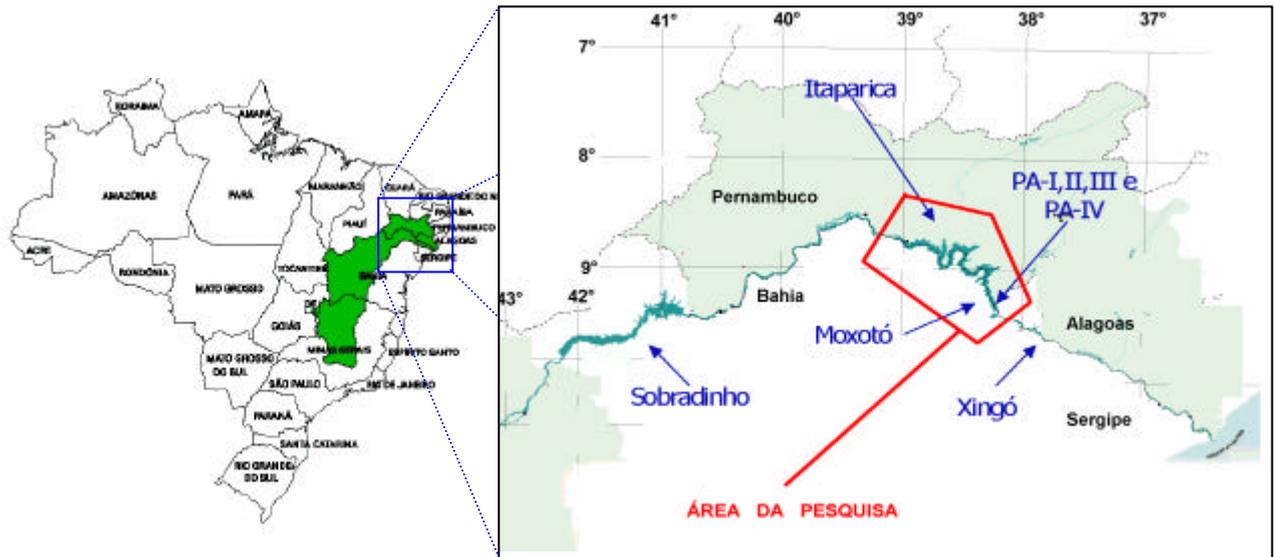


Figura 1 : Localização dos reservatórios de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso HII-III e Paulo Afonso IV em relação à bacia do rio São Francisco.

3. Metodologia

Em função da grande cobertura de nuvens, observada nessa região durante o período de estudo (setembro/99 a setembro/00), verificou-se uma grande dificuldade em se obter dados *in situ* e espectrais simultaneamente. Apesar disso, estimativas quantitativas das concentrações de material em suspensão foram obtidas através de correlações lineares.

Os dados de campo foram coletados trimestralmente em 23 estações, distribuídas no corpo central, braços e afluentes dos quatro reservatórios analisados. Foram tomadas amostras na superfície, meio e fundo da coluna d'água, em cada estação. As análises das amostras, para determinação das concentrações de material em suspensão total, foram realizadas conforme o método gravimétrico (Teixeira *et al.*, 1965 e Tundisi, 1969).

Duas imagens do satélite Landsat 7 e uma imagem do satélite Landsat 5, todas da órbita 216 e ponto 66, respectivamente de 30 de setembro de 1999, maio de 2000 e 28 de janeiro de 2000, foram adquiridas para determinação de correlação entre valores de material em suspensão (determinados nas coletas de campo) e os dados espectrais.

As imagens dos satélites Landsat foram processadas com o auxílio do programa *ENVI (The Environment for Visualizing Images) for Windows*, versão 3.2, desenvolvido pela *Better Solutions Consulting Limited Liability Company* – EUA e pelo programa S6 (Vermote, 1977), utilizando-se um computador Pentium III-850, 64Mb de memória, com HD 20 Gb.

Os valores de nível digital foram transformados para valores de reflectância aparente, utilizando-se o programa S6 para as imagens Landsat 7 e o programa ENVI-3.2 para a imagem Landsat 5. A transposição dos valores procurou normalizar os níveis de resposta de um mesmo alvo referentes a registros efetuados em períodos distintos de imageamento, através da entrada do ângulo solar do dia da passagem do satélite. Valores de reflectância aparente tendem a reduzir as diferenças entre os valores radiométricos obtidos a partir de diferentes ângulos de incidência de iluminação e ajustes nos sensores, pois incorporam informações relativas aos ângulos de elevação e azimute solar. Devido à presença de nuvens, não foi possível aplicar o programa S6 para a correção dos efeitos atmosféricos.

A correção da imagem, para eliminação da influência atmosférica na radiação detectada, foi obtida através da subtração do valor do nível digital mínimo da cena em cada banda a partir do Método do Histograma (Richards, 1996).

A absorção da radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo permitiu que a banda 4 (TM ou ETM) fosse utilizada para a delimitação do corpo d'água em estudo. Essa delimitação foi feita através da construção de uma máscara a partir de uma operação booleana na banda 4, fazendo-se com que a todos os *pixels* referentes à água fosse atribuído o valor 1 e aos demais o valor 0. Esta máscara foi construída e aplicada à imagem recortada com a região de estudo (bandas 1, 2, 3 e 4), obtendo-se a variação de níveis digitais apenas no corpo d'água.

Para aquisição dos valores de reflectância nas estações de coleta, as coordenadas de latitude e longitude (registradas após detecção de ao menos 6 satélites com GPS Garmin no campo) foram localizadas nas imagens e o valor médio (janela de 7x7 pixels) de nível digital das bandas TM1/ETM1, TM2/ETM2, TM3/ETM3 e TM4/ETM4 determinados.

A partir dos valores médios de reflectância em cada estação de amostragem e dos valores de concentração de material em suspensão (determinados na superfície e meio da coluna d'água), foram feitas análises estatísticas com o programa STATISTICA-5.0 para determinação das matrizes de correlação de Pearson. Estas correlações foram obtidas para as datas isoladas e para o conjunto de datas.

4. Resultados e Discussão

As variações espaciais e temporais dos valores médios na coluna d'água das concentrações de material em suspensão, obtidas nas estações distribuídas nos reservatórios de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso I-II-III e Paulo Afonso IV, podem ser observadas na **Figura 2**. Os resultados obtidos mostram baixas concentrações de material em suspensão, com médias na coluna d'água variando entre 0,4 e 11,0 mg/l.

Além disso, observou-se a influência do período chuvoso na variação da carga de sedimentos entrando no reservatório de Itaparica, com maior concentração de material em suspensão nas estações localizadas na porção superior do reservatório (SF01 e SF03), no período de dezembro de 1999 a junho de 2000. Os valores médios na coluna d'água, obtidos nos meses de setembro de 1999 e setembro de 2000 foram, em geral, inferiores a 2 mg/l. Nos meses de dezembro de 1999 e março de 2000 as concentrações de material em suspensão na coluna d'água estiveram entre 0,8 mg/l e 10,8 mg/l, enquanto em junho/00 foram encontrados valores entre 3,8 e 5,0 mg/l.

Nos demais reservatórios não houve influência aparente das chuvas na variação temporal do material em suspensão e as maiores concentrações foram observadas em junho de 2000, no intervalo de 1,4 mg/l a 6,7 mg/l, destacando-se sempre a estação SF12 (no rio Moxotó), com concentrações superiores às demais no reservatório de Moxotó. Nesta estação, foram observados valores entre 8,4 e 13,7 mg/l, nos meses de setembro e dezembro de 1999, junho e setembro de 2000 e concentração de 310,2 mg/l em março de 2000.

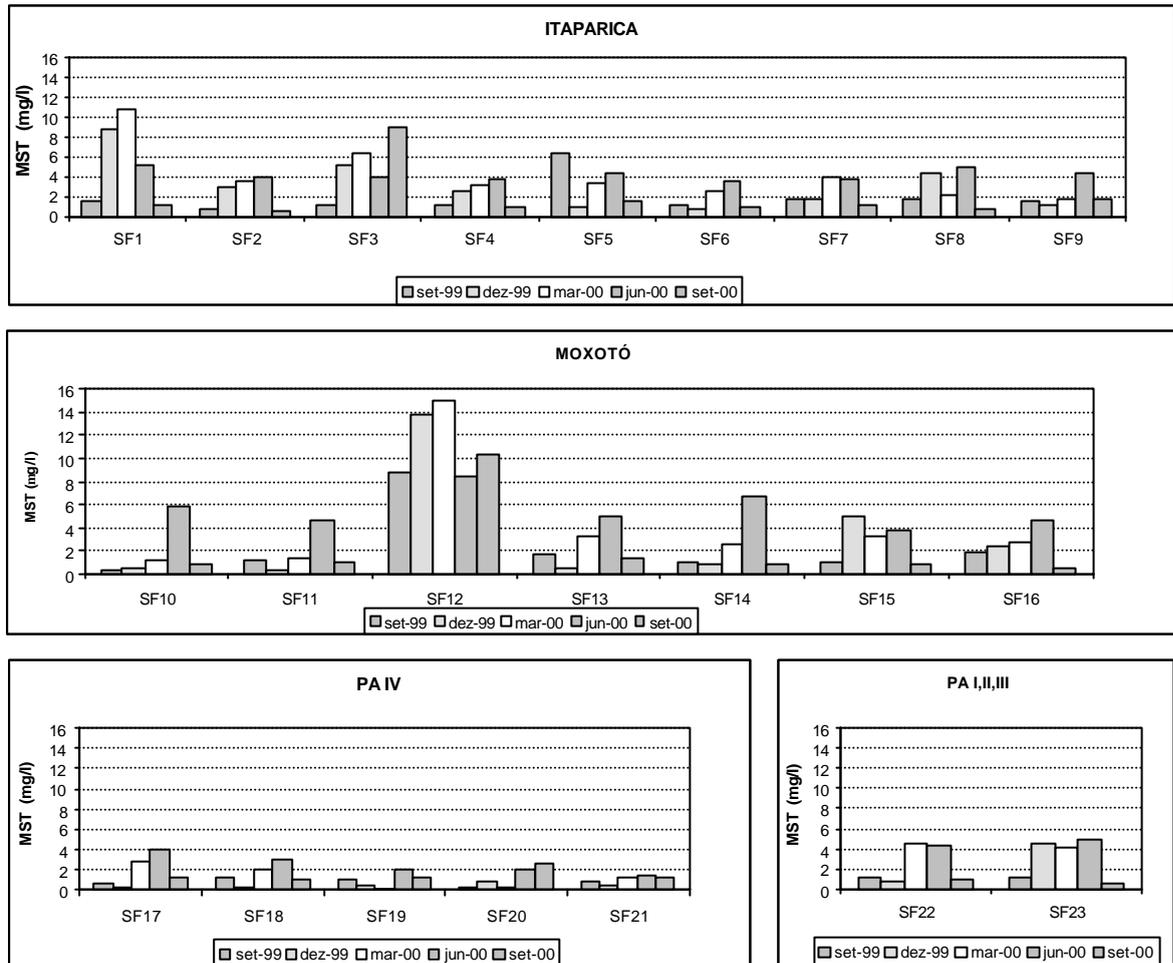


Figura 2 – Variação espaço-temporal da concentração média de material em suspensão na coluna d’água, nos reservatórios de Itaparica (estações SF01 a SF09), Moxotó (estações SF10 a SF16), Paulo Afonso IV (estações SF17 a SF21) e Paulo Afonso I-II-III (estações SF22 e SF23).

A análise dos dados amostrados em campo mostrou que o rio São Francisco é a principal fonte de entrada de material alóctone no sistema. Verificou-se, ainda, a influência da ação antrópica na bacia do rio Moxotó (afluente ao sistema) com carreamento significativo de material em suspensão através desse rio para o reservatório de Moxotó.

Em relação aos dados Landsat, a alta cobertura de nuvens reduziu sensivelmente a disponibilidade de dados espectrais a serem utilizados no sub-médio São Francisco e entre as imagens adquiridas verificou-se que os resultados obtidos para o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os dados espectrais e os valores de campo mostraram-se satisfatórios apenas para a imagem obtida em janeiro/00 e as concentrações medidas nas amostras coletadas em dezembro/99 e março/00. A ausência de correlação significativa entre as reflectâncias obtidas na imagem e dados de campo obtidos em setembro/99 ($r_{\text{máximo}} = -0,347$ e $p > 0,05$ em todas as correlações) e entre a imagem de maio/00 e os dados de campo obtidos em junho/00 ($r_{\text{máximo}} = -0,438$ e $p > 0,05$, em todas as correlações), respectivamente, podem ter como causa a baixa concentração de material em suspensão observada durante essas coletas.

Em relação à imagem de janeiro, apesar do lapso de tempo entre os dois conjuntos de dados analisados, foram verificados maiores valores de r para as concentrações de material em suspensão nas amostras obtidas em março/00, sendo esses superiores aos de dezembro/99 em até 280% para os dados de superfície e até 80% para as concentrações medidas no meio da coluna d'água. A maior correlação observada entre eles pode ser explicada através da análise dos dados obtidos *in situ* e dos dados climatológicos, permitindo verificar que o aporte de material em suspensão aos reservatórios analisados foi influenciado pela precipitação ocorrida no período de dezembro/99 a março/00, com um incremento na concentração de material em suspensão nos reservatórios ao longo do período de chuvas. Deste modo, pode-se inferir que a tendência de distribuição de material em suspensão nos reservatórios, registrada na passagem do Landsat na área em janeiro manteve-se durante o resto do período chuvoso.

Os mapas gerados a partir das regressões lineares (**Figuras 3 e 4**), obtidas para os parâmetros que tiveram maiores valores de r , corroboram com a idéia da formação de uma pluma de material em suspensão na entrada do rio São Francisco no reservatório de Itaparica e permitem a visualização da distribuição do material em suspensão ao longo dos reservatórios. Neste sentido, verificou-se uma maior concentração de material em suspensão no terço superior do reservatório de Itaparica, decrescendo no sentido rio-barragem e apresentando um leve aumento após a passagem pelas turbinas da usina de Itaparica, provavelmente devido ao turbilhonamento e ressuspensão do material de fundo que ocorre no local de descarga da água turbinada.

Os dados observados nesse estudo corroboram as observações de Chaves (1994), que verificou um maior risco de degradação por erosão hídrica do solo na margem esquerda da porção superior do reservatório de Itaparica (**Figura 5**). O que permite inferir que o transporte desse material até o reservatório pode ser responsável pela maior quantidade de material em suspensão nessa região.

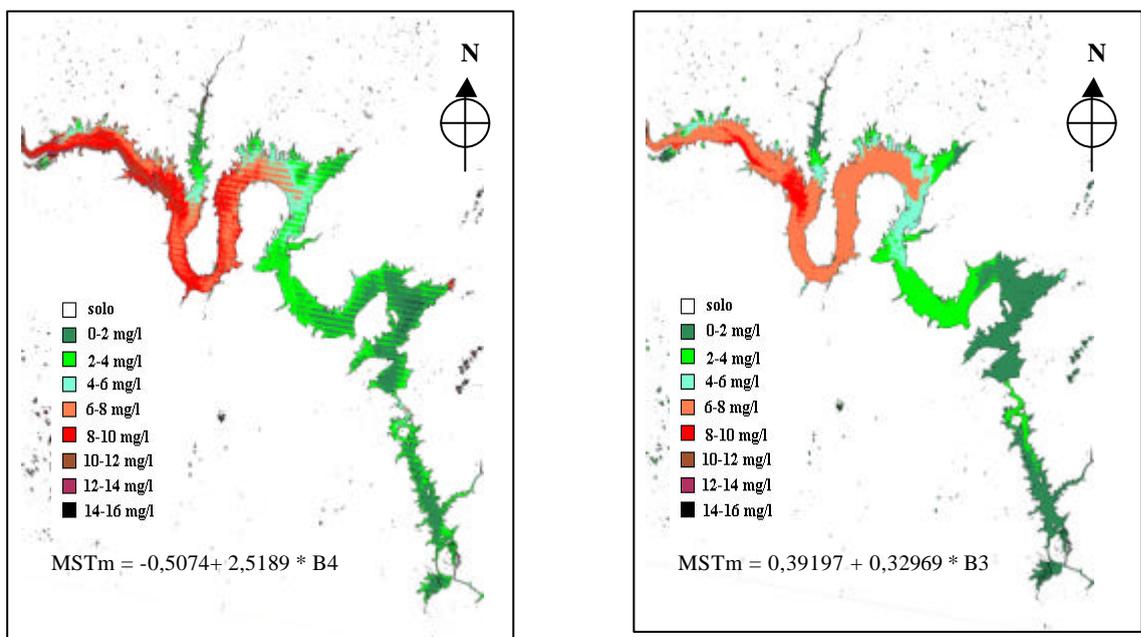


Figura 3 – Mapa da distribuição de MST nos reservatórios do sub-médio São Francisco para a equação de regressão obtida entre a concentração do material em suspensão no meio da coluna d'água e as reflectâncias nas bandas 3 ($r = 0,84$) e 4 ($r = 0,89$).

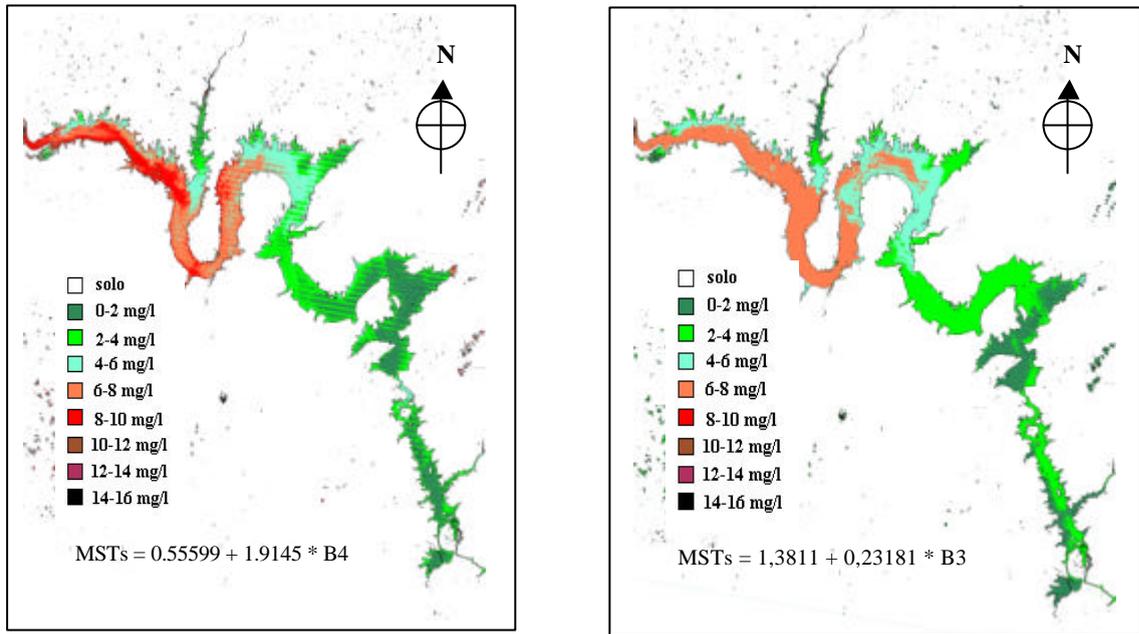


Figura 4 – Mapa da distribuição de MST nos reservatórios do sub-médio São Francisco para a equação de regressão obtida entre a concentração do material em suspensão na superfície da coluna d’água e as reflectâncias nas bandas 3 ($r = 0,69$) e 4 ($r = 0,77$).

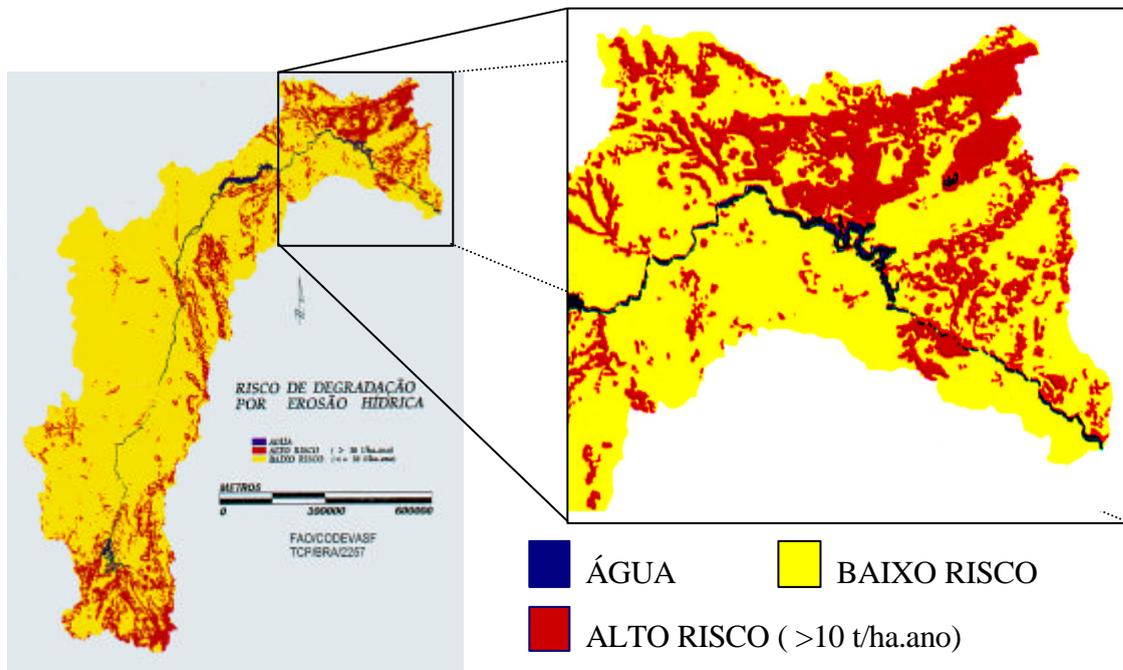


Figura 5 – Risco de degradação por erosão hídrica no Vale do São Francisco (Fonte: modificado de Chaves, 1994).

Verificou-se que os modelos gerados promoveram superestimação das concentrações de material em suspensão em algumas estações de amostragem, enquanto em outras houve uma subestimação dos valores obtidos na coleta de março/00. Entretanto, a tendência de distribuição do material em suspensão ao longo dos reservatórios foi semelhante para os mapas temáticos e os dados de campo (**Figura 6**). Verificou-se, também, que os erros médios determinados para os conjuntos de dados foram baixos ($\leq 0,3$ mg/l), significando que estes podem ser representados pelo modelo. As diferenças observadas podem ter ocorrido em função de diversos fatores associados ao conjunto de dados originais, destacando-se a diferença entre a data da imagem e a data da coleta de campo.

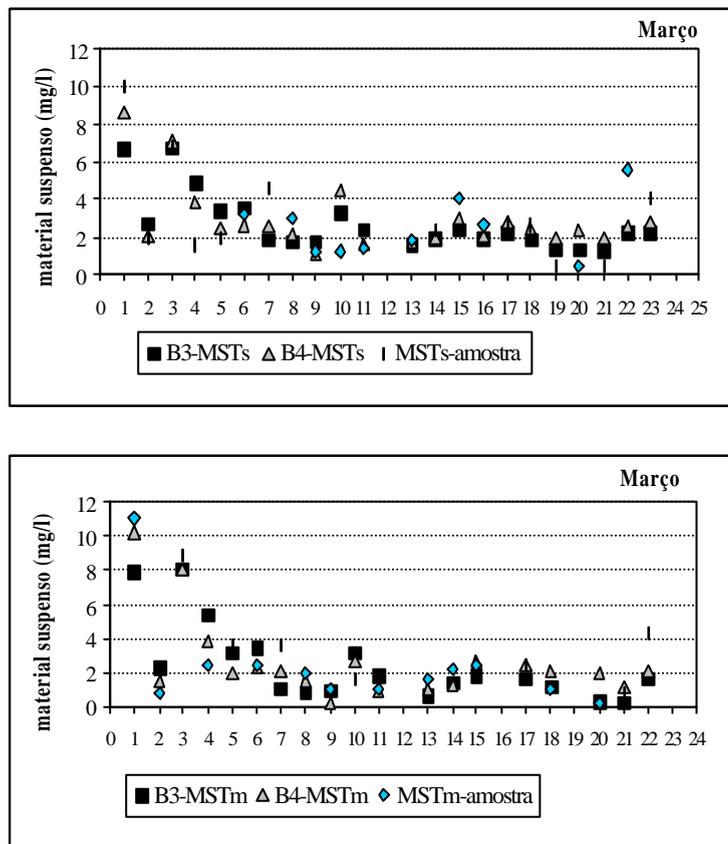


Figura 6 – Concentrações de material em suspensão obtidas a partir das médias em clusters de 7x7 nos mapas de distribuição de MST, na superfície (B3-MSTs e B4-MSTs) e meio (B3-MSTm e B4-MSTm) gerados a partir das regressões lineares entre dados das amostras de campo e reflectâncias nas bandas 3 e 4; e ainda concentrações de material em suspensão dessas amostras (MST-amostra).

5. Conclusões

Os resultados obtidos a partir do uso de dados orbitais, para predizer valores de parâmetros de qualidade d'água, têm mostrado as vantagens da implementação de tecnologias e ferramentas que permitam a visão mais ampla, com uma maior representatividade espacial dessas características. A constatação das dificuldades de se aplicar métodos limnológicos tradicionais no estudo de grandes sistemas aquáticos encontra-se, segundo Novo & Tundisi (1988), na maior variabilidade de fatores bióticos, abióticos e antrópicos a que se encontram sujeitos, a

qual não pode ser plenamente entendida e caracterizada devido ao pequeno número de estações. No caso dos reservatórios do São Francisco, apesar das dificuldades na aquisição simultânea das informações de campo e espectrais, os resultados obtidos abrem uma grande perspectiva na utilização de imagens orbitais como ferramenta de análise da qualidade da água nesses reservatórios.

Para uma melhor compreensão do contexto de inserção do sensoriamento remoto em estudos ambientais devem ser consideradas as limitações das técnicas de análise e controle ambiental, em função do custo envolvido na coleta de dados em grandes áreas e por longo período de tempo e do nível de detalhamento necessário para caracterizá-lo e monitorá-lo.

Referências

- Chaves, H.M.L (1994) Estimativa da erosão atual e potencial no vale do rio São Francisco. Relatório Final de Consultoria. FAO TCP/BRA/2257. Brasília: 34 p.
- Choubey, V.K., Subramanian, V. (1991) Spectral response of suspended sediments in water under controlled conditions. *Journal of Hydrology* 122, p. 301-308.
- Froidefond, J.M.; Castaing, P.; Mirmand, M. (1991) Analysis of the turbid plume of the Gironde (France) based on SPOT radiometric data. *Remote Sens. Environ.* 36, p. 149-163.
- Giardino, C.; Pepe, M.; Brivio, P.A.; Ghezzi, P.; Zilioli, E. (2001). Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the Total Environment*. 286, p19-29.
- Hilton J, Lishman Jp, Allen Pv (1986). The Dominant Processes Of Sediment Distribution And Focusing In A Small, Eutrophic, Monomictic Lake *Limnology And Oceanography* 31: (1) 125-133.
- Morel, A., Berthon, J.F. (1989) Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationship reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. and Oceanogr.*, v.34, n.8, p. 1545-1562
- Morel, A., Prieur, L. (1977) Analysis of variations in ocean color. *Limnol. and Oceanogr.* v.22 (4), p. 709-723.
- Nellis, M.D.; Harrington, J.A.; Wu, J. (1998). Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas:1993. *Geomorphology*, 21, p. 281-293.
- Noernberg, M.A.; Caltabiano, A.C.V.; Ferreira, E.M^aV.M. ; Golcaves Jr., J.D.C.; Doria, C.R.C. (1996) Relação entre profundidade Secchi e fator de reflectância da água de ambientes aquáticos lênticos em Cachoeira Paulista, SP. *Simpósio Brasileiro de Sens. Remoto*. Salvador.
- Novo, E. M. L. M., Tundisi, J. G. (1988) Sensoriamento remoto em águas interiores: perspectivas. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. V.1, p 13-21.
- Teixeira, C.; Tundisi, J.; Kutner, M.B. (1965). Plankton studies in a mangrove. II. The standing-stock and some ecological factors. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 24: 23-41.
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 675-686.
- Yentsch, C.S.; Yentsch, C.M. (1979) Fluorescence spectral signatures: the characterization of phytoplankton populations by use of excitation and emission spectra. *Journal of Marine Research.*, 37, p. 471-483.