

Distribuição espaço-temporal dos totais sólidos em suspensão do reservatório Tucuruí/PA através de dados *in situ* e TM-Landsat

Osman F. Silva*; Evlyn Novo; Thelma Krug

DSR-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Caixa Postal 515 - cep. 12.201-970 - São José dos Campos/SP - Brasil
e-mail: osman, evlyn, thelma@ltid.inpe.br

ABSTRACT: Amazon rain distribution is characterized by a dry and a rainy season. As a consequence, the fluvial flow consists of predictable, monomodal pulses that are important forcing functions for the ecological processes that take place in the aquatic systems. Suspended solids can be a major problem in rivers and reservoirs, because they can prevent light penetration and photosynthesis, and hence affect the thermal structure of the aquatic system. The mapping of the spatial distribution of suspended solids in large water bodies, based on ground measurements, can be used to complement the spatial information not provided by the ground measurements. The objective of this study is to map and characterize the seasonal distribution of TSS concentration in the Tucuruí/PA reservoir, using both ground measurements and TM Landsat data.

Keywords: suspended solids, reservoir

* bolsista RHAE - CNPq

1. INTRODUÇÃO

O regime de chuvas da maior parte da região Amazônica se caracteriza por um período seco e outro chuvoso. As vazões fluviais podem variar na amplitude e frequência porém, são pulsos predizíveis, prolongados e monomodais (Piedade et al., 1992). Consequentemente, os pulsos anuais de inundação (caracterizados pelo aumento sazonal do nível das águas e da vazão líquida e sólida) representam uma importante força propulsora da atividade biológica nos ecossistemas aquáticos (Junk e Melo de Nunes, 1987).

A carga sólida (totais sólidos em suspensão) é um dos maiores problemas em rios, reservatórios e estuários (Robinson, 1985); pois impedem ou dificultam a penetração da luz na água e a fotossíntese da vegetação submersa, interferindo também na dinâmica térmica do sistema.

A compreensão dos padrões de distribuição da carga dos totais sólidos em suspensão (TSS) em reservatórios fortemente regulados pela descarga fluvial representa, portanto, uma das condições necessárias para o entendimento de outros processos existentes nos corpos de água.

O mapeamento do TSS superficial baseado exclusivamente em medidas *in situ* apresenta limitações espaço-temporais, devido aos custos associados à coleta e análise laboratorial dos dados necessários para se conhecer a totalidade da área de estudo (Novo e Tundisi, 1988).

As técnicas de sensoriamento remoto (SR) fornecem um meio alternativo e complementar

para se obter periodicamente e, relativamente a baixo custo, informações sinóticas das condições superficiais da qualidade da água de grandes áreas (Ritchie e Schiebe, 1976; Khorram e Cheshire, 1985).

O objetivo deste trabalho é mapear e caracterizar sazonalmente a dinâmica da distribuição dos TSS no reservatório de Tucuruí/PA, através da análise estatística de um banco de dados de TSS e de imagens TM-Landsat.

2. ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Tucuruí foi formado em 1985 pelo barramento do rio Tocantins, que nasce no Planalto Central Brasileiro e tem sua foz no estuário do rio Amazonas. Possui 2.500 Km de extensão e se desenvolve no sentido latitudinal sul-norte, contribuindo com mais de 95% do volume de água que chega ao reservatório de Tucuruí (em média 10.650 m³/s).

A área da bacia de captação é de aproximadamente 758.000 Km² (15% da Amazônia Legal). O clima é tropical úmido com inverno seco e precipitação média do mês mais seco inferior a 60 mm. O regime hidrológico da bacia de drenagem é bem definido e a precipitação tem valor médio de 2.000 mm/ano (com frequência média de precipitação de 180 dias/ano). O trimestre mais seco corresponde aos meses de junho a agosto com precipitação inferior a 180 mm, enquanto os três meses mais chuvosos compreendem os meses de fevereiro a abril.

3. METODOLOGIA

A base de dados utilizada foi quinzenal ou mensalmente coletada para toda a coluna d'água por um período de 5 anos (de 1986 a 1990) ao longo de cinco estações amostrais (M1, C1, MR, M3 e M5) (Fig.1). Neste trabalho, porém, foram utilizados apenas os dados coletados ao nível de superfície, por serem os mais relacionados à informação de SR (Braga, 1990). A análise das amostras foram realizadas pela ELETRONORTE conforme metodologia de Golterman et al. (1978).

Utilizando-se como referência informações mensais da vazão afluente média do rio Tocantins, o banco de dados dos TSS foi dividido em dois subconjuntos, um referente à época seca (compreendendo os meses de junho a setembro) e o outro relativo à época chuvosa (demais meses do ano). Em uma primeira fase o TSS foi submetido a três tipos de testes estatísticos, quais sejam: teste de hipótese para diferença de médias, análise de variância "one way" e, por último, análise de agrupamento.

O teste de hipótese teve como finalidade verificar diferenças sazonais para cada um dos cinco pontos de coleta. A análise de variância "one way" foi empregada para verificar a existência de possíveis diferenças significativas ($\alpha = 0,05$) entre as cinco estações de coleta para cada período do ano estudado, sem no entanto indicar especificamente aquelas estações mais diferenciadas. A utilização da análise de agrupamento teve como finalidade agrupar as estações de coleta em função de uma medida de similaridade (distância euclidiana).

A utilização das imagens orbitais se justifica em consequência da baixa representatividade espacial dos cinco pontos amostrais para os 2.430 Km² de área do reservatório, o que representa aproximadamente um ponto de coleta para cada 500 Km².

Em decorrência da elevada frequência de cobertura de nuvens na Amazônia, existe uma grande dificuldade em se obter dados in situ de parâmetros de qualidade da água simultaneamente a passagem do satélite (Braga, 1990; Pereira Filho, 1991; Melack et al., 1984). Esta limitação impossibilita a realização de estimativas quantitativas de parâmetros de qualidade da água naquela região mas não esgota, porém, a possibilidade de utilização dessa técnica para o estudo da distribuição do sedimento em suspensão na água.

Os dados de satélite utilizados se referem à órbita 224, ponto 63, nas bandas TM1, TM2,

TM3 e TM4, para as seguintes datas: 22/06/1986; 27/07/1987; 14/08/1988; 16/07/1989 e 22/06/1992.

No presente trabalho, os dados de SR foram submetidos aos seguintes processamentos digitais: a) registro das imagens com uma base cartográfica para permitir a correção geométrica das mesmas; b) correção do espalhamento atmosférico pelo método de Chavez (1988); c) conversão dos valores de radiância em reflectância real tendo em vista que esta é uma grandeza física mais correlacionada com o alvo (Markham e Barker, 1987); d) delimitação da superfície livre de água para eliminar demais alvos da classificação; e) normalização dos níveis de reflectância das cinco datas estudadas para minimizar a discrepância dos números digitais existentes para cada banda; f) ampliação do contraste visando maior nitidez na visualização das imagens; g) remoção de faixas de ruído de alta frequência através da aplicação de filtro passa-baixa; h) classificação digital da distribuição de SS (distância euclidiana).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rio Tocantins é a principal fonte externa de material carreado para o reservatório, desempenhando controle tanto na diluição quanto no aumento da concentração de materiais dissolvidos e particulados em suspensão.

Apesar da grande vazão afluente média (10.650 m³/s), esta apresenta considerável amplitude ao longo do ano, mas em períodos bem definidos e aumentando da época de estiagem para a chuvosa em até mais de 12 vezes. A grande amplitude da vazão impõe condições sazonais bem marcantes e específicas à estrutura vertical e horizontal do sistema, que tendem a repercutir diretamente na qualidade da água (Silva, 1995). Em função disso e do tipo de classificação climática na qual se enquadra a bacia de captação do reservatório, o banco de dados foi dividido em dois subconjuntos (referentes aos períodos seco e chuvoso).

Para verificar a adequação na alocação dos meses do ano às épocas seca e chuvosa, procedeu-se à integração dos dados das 5 estações de coleta (Figura 1) para cada época, determinando o valor médio de TSS. Após este procedimento aplicou-se o teste de hipótese para diferença entre médias para as estações seca e chuvosa, resultando em diferença altamente significativa ($\alpha = 0,01$) entre ambas. Justificando, portanto, a subdivisão das amostras.

Uma vez identificada a existência de diferenças sazonais na concentração de TSS para o reservatório como um todo, procederam-se a novos testes de hipótese sobre o valor médio das amostras, analisando-se agora separadamente cada uma das cinco estações de coleta limnológica onde foram encontradas diferenças sazonais para todas as estações de coleta, excetuando-se MR.

A estabilidade verificada para a estação MR, poderia ser explicada pela sua localização no reservatório -situada em um dos seus braços dendríticos e protegidos, caracterizado por baixa hidrodinâmica e elevado tempo de residência hidráulica- que lhe confere uma situação de local permanentemente estratificado e, portanto, com condições ambientais aproximadamente uniformes no tempo, conforme verificado por Pereira et al. (1990).

Em uma fase seguinte do trabalho utilizou-se da análise de variância para verificar-se a existência ou não de diferenças entre as 5 estações de coleta para uma dada época (seca ou chuvosa). Para isto foram realizados testes de diferenças entre médias, para todas as estações de coleta.

Tendo em vista a localização espacial da estação M5, situada na desembocadura do rio e submetida, portanto, à influência direta do Tocantins, considerou-se esta estação de coleta como um ponto de amostragem à parte em relação às condições do reservatório, ou pertencente na realidade ao rio Tocantins. Por isso, com a finalidade de eliminar uma possível fonte de erros ou de dados que eventualmente não representassem as reais condições do reservatório, os cálculos relativos à análise de variância foram realizados tanto com a inclusão quanto com a exclusão dos dados relativos à estação M5.

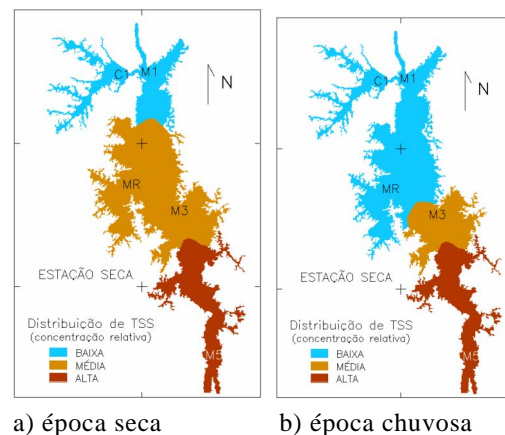
Os resultados da análise de variância para as épocas seca e chuvosa, quando incluída a estação M5, indicaram diferenças significativas nas águas do reservatório para as duas épocas estudadas. No entanto, excluindo-se M5 foram encontradas diferenças apenas no período chuvoso na concentração de TSS, indicando neste período a existência de um corpo de água mais heterogêneo, enquanto na estiagem o rio Tocantins exerceria influência na distribuição espacial de TSS apenas na região à montante do reservatório (próximo a M5), denotando assim um corpo d'água mais homogêneo.

O aumento dos gradientes de TSS verificado no período chuvoso ocorreria devido à elevada

vazão afluyente e efluente (baixo tempo de residência hidráulica no corpo principal do reservatório), em oposição a estabilidade e maior tempo de residência na zona litoral, responsável pelas descontinuidades na concentração desta e de outras variáveis limnológicas, contribuindo assim para a heterogeneidade espacial anteriormente mencionada.

As técnicas estatísticas até aqui utilizadas revelaram apenas a existência ou não de diferenças espaço-temporais na concentração de TSS através da identificação de 'populações distintas' de dados: uma associada à estação M5 e a outra às demais estações do reservatório (C1, M1, MR e M3) sem, no entanto, refinar as informações e revelar as estações amostrais mais semelhantes e espacialmente contíguas.

Com a finalidade de melhorar o refinamento anteriormente mencionado, o banco de dados foi submetido à análise de agrupamento, utilizando-se três níveis de iterações, onde permitiu-se obter a distribuição espacial esquematicamente representada pelas Figuras 1a e 1b.



a) época seca b) época chuvosa

Fig. 1: Representação espacial da análise de agrupamento referente à concentração de TSS coletado *in situ* para a época seca (a) e chuvosa (b).

Os resultados encontrados nas Figuras 1a e 1b confirmam, a dissimilaridade entre os tipos de água da estação M5 em relação aos demais pontos de coleta. Conforme o esperado, na época seca o reservatório encontra-se em condições mais homogêneas com o agrupamento das estações adjacentes (C1-M1 e MR-M3), havendo uma tendência à formação de gradientes longitudinais.

Para a época chuvosa existiria uma tendência mais evidente à formação de gradientes laterais (C1-MR e M1-M3). No entanto a análise bruta dos dados também revelaram pronunciados gradientes longitudinais (ocorridos ao longo do canal fluvial submerso), apesar disto não ficar evidente através da análise de agrupamento devido a uma limitação desta ferramenta e também em consequência do pequeno número de estações de coleta.

O TSS representa a fração preponderante do material particulado suspenso nas águas interiores onde, no caso de Tucuruí, este material se originaria principalmente da Serra dos Carajás (Barrow, 1987) e, sendo um dos componentes oticamente ativos que mais afetam a refletividade dos corpos de água, acredita-se que este seja o principal componente detectado nas imagens orbitais estudadas. Em corroboração a isto existem alguns dados levantados especificamente no reservatório de Tucuruí por Braga (1990)

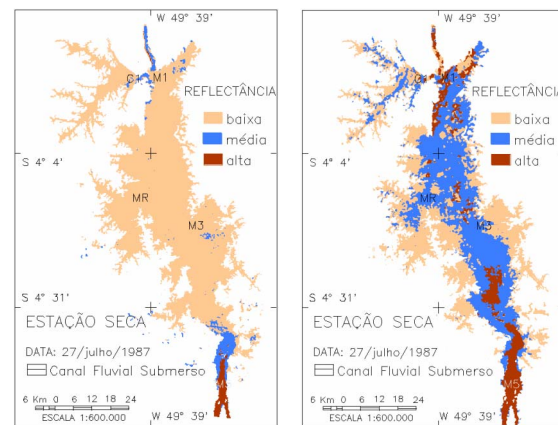
As técnicas de SR convencionalmente utilizadas para detectar e identificar componentes oticamente ativos associados à qualidade da água, tais como sedimento em suspensão, pigmentos fitoplancônicos, matéria orgânica dissolvida e transparência, ficam comprometidas tendo em vista que a necessária simultaneidade na coleta de dados in situ e orbitais não ocorre; impossibilitando, portanto, a calibração das imagens (Khorram e Chesshire, 1985) e/ou estabelecimento de correlação dos dados de campo com os de SR (Carder et al., 1989; Baban, 1993), com a finalidade de alimentar os modelos utilizados para este fim e utilizados para estimar os parâmetros anteriormente mencionados.

Não obstante, o bem marcado regime de chuvas da Amazônia submete os sistemas aquáticos ou, mais especificamente os reservatórios com grandes redes de captação, a uma maior influência da vazão dos rios que os abastecem e gerando assim reservatórios fortemente regulados. Deste modo é provável que as elevadas amplitudes anuais das vazões fluviais modifiquem não apenas as condições sazonais de qualidade da água dos reservatórios mas também

a distribuição espacial das variáveis associadas a esta qualidade, conforme mostraram os resultados anteriores.

Nesse sentido, o reservatório de Tucuruí, por ser drenado por uma extensa bacia de captação que converge praticamente para um único rio (Tocantins) e possuindo formato estreito, alongado e fortemente dendrítico propiciaria ao longo do eixo longitudinal do reservatório, gradientes espaciais no padrão de concentração dos sedimentos e nutrientes etc., originando gradientes de qualidade da água e produtividade biológica (Wells e Gordon, 1982).

Embora tenham sido utilizadas 5 passagens do satélite Landsat, as figuras a seguir mostram apenas as passagens representativas para os períodos seco e chuvoso e são o resultado da aplicação da seqüência descrita na metodologia.



a) época seca

b) época chuvosa

Fig. 2: Dispersão da pluma de SS no reservatório de Tucuruí

Estas imagens revelam a heterogeneidade da distribuição das águas superficiais do reservatório Tucuruí, bem como a evolução espaço-temporal da dispersão da pluma de TSS do rio Tocantins. A Figura 2a representa o padrão característico para a época seca a qual, ratificando os resultados estatísticos dos dados coletados in situ, caracteriza-se por um corpo de água mais homogêneo onde, devido às baixas concentrações médias de material em suspensão e consequentemente alta transparência, o reservatório apresenta predominantemente baixa reflectância.

Como resultado, neste período observamos a 'pluma' do rio Tocantins -situada na porção inferior das imagens com valores alto e médio de reflectância- pouco extensa, devido ao elevado

nível da água no reservatório e baixa vazão afluente.

Embora não existam dados TM-Landsat disponíveis durante a estação chuvosa, a análise dos dados de vazão do rio e precipitação referente a 1992, indicaram que na data de aquisição desta imagem o reservatório de Tucuruí possuía características semelhantes àquelas verificadas para a estação chuvosa. Como o reservatório se comporta sazonalmente com condições de qualidade da água bastante características para cada período e inexistem imagens para o período chuvoso, a figura 2b é mostrada como forma de representar aproximadamente as condições de distribuição espacial de TSS no reservatório para este período.

A observação da distribuição dos níveis de reflectância no reservatório mostra um considerável aumento da área de turbidez do reservatório para esse período, com predomínio de valores médio e alto de reflectância.

Independente do período estudado (época seca ou chuvosa) a interpretação das imagens estudadas revelam uma consistente tendência do rio Tocantins a se deslocar ao longo do corpo central do reservatório Tucuruí, mantendo o curso do leito fluvial e revelando dificuldade em realizar misturas laterais.

5. CONCLUSÃO

Apesar dos dados coletados *in situ* não terem sido adquiridos simultaneamente à passagem do satélite, a conjugação de ambos os tipos de dados através de métodos estatísticos compatíveis, se mostrou útil para melhorar a consistência das informações de ambas as fontes de dados, bem como para tornar mais representativos os poucos pontos amostrais coletados *in situ*, tornando possível realizar o mapeamento superficial de TSS. Mas cabe salientar, no entanto, que a divisão do banco de dados em dois subconjuntos é um procedimento adequado particularmente para corpos de água fortemente regulados pela descarga fluvial

Por outro lado, a caracterização quantitativa da dinâmica sazonal da distribuição de TSS ainda depende, portanto, não apenas do aumento dos pontos amostrais, mas também do aprimoramento dos sistemas sensores em função dos parâmetros de qualidade de água estudados bem como das condições climáticas nos trópicos. Enquanto esses pré-requisitos não são supridos a metodologia apresentada neste trabalho pode representar um conveniente auxílio para o estudo

da distribuição de TSS e possivelmente de outras variáveis em regiões sujeitas à frequente nebulosidade.

6. AGRADECIMENTOS

Às Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), pelo apoio no trabalho de campo e pelo fornecimento de dados ambientais do reservatório de Tucuruí.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baban, S.M.J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery. **Int. J. Remote Sensing**, 14(7): 1247-1267, 1993.
- Barrow, C.J. The environmental impacts of the Tucuruí dam on the middle and lower Tocantins river basin, Brazil. **Regulated Rivers**, 1:49-60, 1987.
- Braga, C.Z.F. Avaliação preliminar da produtividade primária na represa de Tucuruí, Pará, com utilização de imagens TM. In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto, 6. Manaus, 24 a 29 de junho, 1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE 1990. v.4, p.826-832.
- Carder, K.L.; Steward, R.G.; Harvey, G.R.; Ortner, P.B. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. **Limnology and Oceanography**, 34(1): 68-81. 1989.
- Chavez, P.S. An improved dark object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 24(3):459-479, 1988.
- Golterman, H.L.; Clymo, R.S.; Ohnstad, M.A.M. **Methods for physical and chemical analysis of fresh water**. 2 ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1978. 214p. (IBP handbook n°8).
- Junk, W.J.; Mello de Nunes, J.A.S. Impactos ecológicos das represas hidroelétricas na bacia amazônica brasileira. **Türbinger Geogr. Stud.**, 95: 367-387, 1987.
- Khorram, S; Cheschire, H.M. Remote sensing of water quality in the Neuse river estuary, North Carolina. **Photogram. E.R.S.**, 51(3): 329-341, 1985.
- Markan, B.L.; Barker, J.L. Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environmental**, 22(1): 39-71, 1987.

- Melack, J.M. Inland aquatic resources and biogeochemical cycles. **Earth Observing System**, 1.: p.A15-A17, 1984.
- Novo, E.M.L.M.; Tundisi, J.G. Sensoriamento remoto de águas interiores: perspectivas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 11 out. 1988. **Anais**. São José dos Campos, INPE 1988. v.1, p.13-21.
- Pereira, A.; Tassin, B.; Mouchel, J. Estudo hidrodinâmico e de balanço de cargas em um reservatório tropical. **ABRH/IWRA/UNEP/UNESCO**, 1990. 3-19p.
- Pereira Filho, W. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo da influência das características da bacia de captação na concentração de sólidos em suspensão em reservatórios**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991. INPE-5278-TDI/448.
- Piedade, M.T.F.; Junk, W.J.; Mello, J.A.N. A floodplain grassland of the central Amazon. In: Long, S.P.; Jones, B.J.; Roberts, M.P. eds. **Primary Productivity of grass Ecosystems of the Tropics and Sub-Tropics**. Chapman & Hall/ UNEP. 1992.
- Ritchie, J.C.; Schiebe, F.R.; McHewry, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 42(12): 1539-1545, 1976.
- Robinson, I.S. **Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists**. Chichester, Ellis Horwood, 1985. 455p.
- Silva, O.F. Caracterização dos gradientes longitudinais e laterais do reservatório Tucuruí/PA, através da análise dos bancos de dados limnológico e de imagens TM-Landsat. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995. (no prelo)
- Wells, S.A.; Gordon, J.A. Geometric variations in reservoir water quality. **Water Resour. Bull.** 18:661-700.