

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS MASSAS D'ÁGUA AMAZÔNICAS

CLÁUDIO CLEMENTE FARIA BARBOSA¹
EVLYN MÁRCIA LEÃO DE MORAES NOVO¹
JOÃO CARLOS CARVALHO¹
WATERLOO PEREIRA FILHO²
JOSÉ EDUARDO MANTOVANI¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{claudio}@dpi.inpe.br {evlyn,jcarlos}@ltid.inpe.Br

²Universidade Federal de Santa Maria
Departamento de Geociências - Prédio 17 - 97111-970 - Santa Maria - RS, Brasil
waterloo@base.ufsm.br

Abstract. A field campaign aiming the study of water circulation between Amazon river, Amazon floodplain lakes and wetlands was carried out during 10 days on the Curuai floodplain, near Obidos-Pará state, on July 2002. During this campaign concurrently to the water sampling, 144 reflectance spectra were acquired in the range between 400 and 900 nm using a spectroradiometer with a nominal resolution of 2 nm. The aim of this paper is to identify and characterize the main spectral characteristics of the water masses on Curuai floodplain. In our preliminary analysis the radiometric data revealed to be of great potential not only to identify the water components but also to arise hypothesis on biological processes and its interaction with lake hydrodynamic patterns.

Keywords: remote sensing, spectral characteristics, wetlands, radiometric data.

1. Introdução

Estima-se que a superfície ocupada apenas por um dos tipos de ecossistemas alagáveis da Amazônia, a planície de inundação dos grandes rios da Amazônia central, seja duas vezes maior que área da Inglaterra, ou 300 000 km² (Junk, 1997; Melack, 1984). Estudos mostram que se por um lado, esses ecossistemas alagáveis são fontes geradoras de parte do metano encontrado na atmosfera terrestre, por outro lado, as plantas aquáticas e as florestas inundadas que cobrem estas áreas, podem ser consideradas importantes seqüestradores de carbono, e fonte de alimentação para algumas espécies de peixes, a partir de seus frutos e sementes.

A dinâmica da água, tanto no tocante à sua composição, quanto no tocante ao seu volume é um componente fundamental na definição da tipologia e funcionamento dos ecossistemas aquáticos. As características físico-químicas das águas que percorrem a bacia amazônica, um dos fatores responsáveis pelo funcionamento dos ecossistemas alagáveis, variam amplamente, em função da origem da água, do tipo de solo que drenam e das condições climáticas. Sioli (1984) propôs uma classificação geral destas águas em três tipos, baseado na relação entre suas propriedades ópticas e suas propriedades físicas, químicas e biológicas expressas em sua carga sólida e dissolvida: rios de água turva, barrenta e amarela são chamados por ele de rios de *água branca*; rios de água limpa e transparente, de cor verde, verde amarelo, verde oliva são chamados de rios de *água clara*; os rios de água transparente, de cor verde escuro, marrom, são chamados de rios de *água preta*. Quando atingem as planícies de inundação, estas águas se espalham pelos diferentes ecossistemas alagados, tornando-se uma componente importante dos processos biogeoquímicos que ali ocorrem.

Diante das dimensões e complexidades dos diferentes corpos de água da Amazônia, o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto (S.R.) associado a dados de campo, apresenta-se como uma boa solução para um entendimento regional da planície de inundação da

Amazônia. Diversas pesquisas têm demonstrado que imagens da região óptica do espectro eletromagnético são as fontes mais eficientes de informação para traçar o caminho da água e para determinar a região de influência de águas fluviais em ecossistemas alagáveis em relação à influência de água de origem local (Mertes et al., 1995). Os sedimentos inorgânicos em suspensão na água funcionam como traçador natural da dinâmica espacial da água na planície.

2. Objetivos e Área de estudo

O objetivo principal deste estudo é caracterizar espectralmente as diferentes massas d'água que circulam pela várzea de Curuaí, a partir de espectros de campo coletados em 144 estações amostrais, cuja distribuição espacial foi determinada por Barbosa (2002), a partir da análise de uma série temporal de imagens TM. A análise descrita de forma sucinta neste artigo é parte de um estudo mais amplo cujo objetivo é modelar a dinâmica espacial e temporal das massas d'água na bacia Amazônica.

A área de estudo, denominada de Lago Grande de Curuaí, está localizada na transição entre o médio e o baixo Amazonas, a jusante da cidade de Óbidos, estado do Pará (Figura 1). Esta área de 2000 Km² é formada por sedimentos arenosos quaternários e pode ser caracterizada como uma planície fluvial inundável sujeita ao regime natural de águas do rio Amazonas. A **Figura 1** mostra uma composição BGR das bandas 1, 2 e 3 (colorido normal) do sensor LANDSAT 7/ETM+, da área de estudo com a localização das estações de coleta. Vale ressaltar que as áreas de Terra Firme foram subtraídas da imagem.

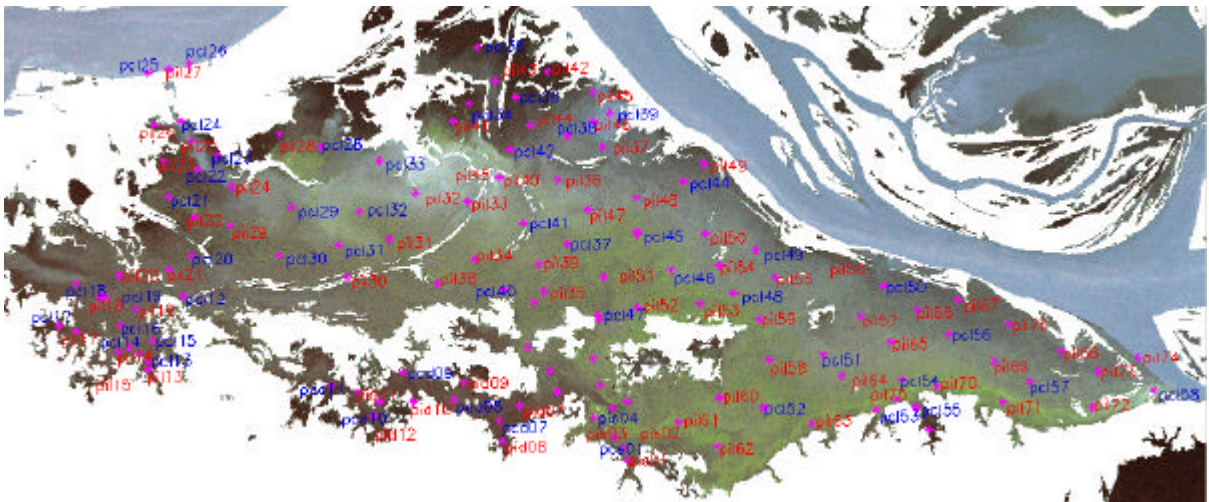


Figura 1- Composição colorida das bandas 1,2,3(BGR) com a localização das estações amostrais

3. Fundamentação Teórica

O comportamento espectral da água pura é determinado, basicamente, pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. Como pode ser observado na **Figura 2** o coeficiente de absorção (**a**) da água pura é mínimo na região compreendida entre 400 e 600 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho. O coeficiente de espalhamento (**b**) da água pura, ao contrário, é máximo na região do azul, e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Se o espectro de reflexão da água pura pode ser estimado pela razão (**b/a**), pode-se concluir que a energia refletida pela água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho. Portanto pode-se concluir que a água pura, quando

observada a partir de um satélite tenderá a apresentar a cor azul, principalmente se a dimensão do corpo d'água for suficiente para atenuar os efeitos das margens e fundo.

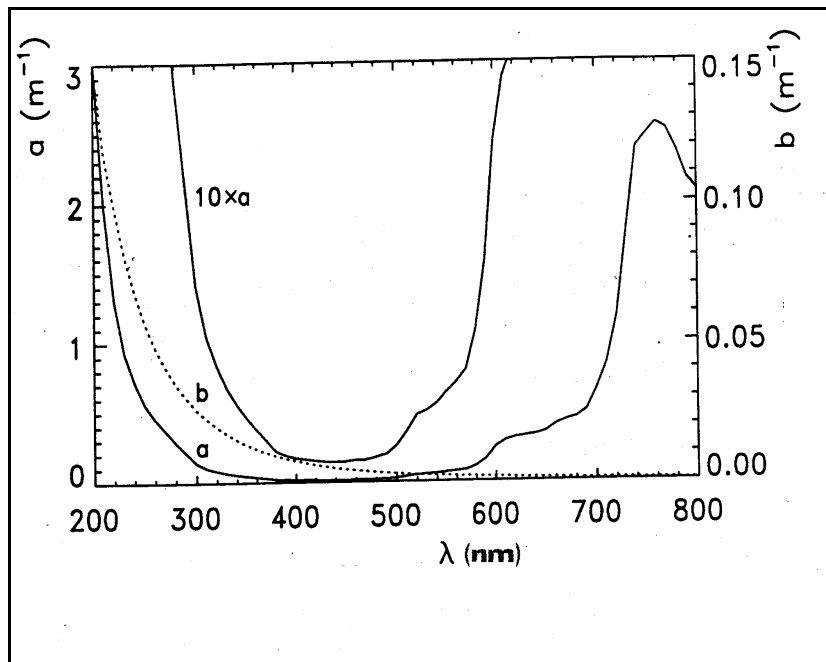


Figura 2 - Coeficiente de Absorção (a) e de Espalhamento (b) da Água Pura (Fonte: Mobley, 1994).

Entretanto, em águas naturais, os componentes opticamente ativos presentes na água, passam a ser determinantes na reflectância de corpos d'água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e matéria orgânica dissolvida são os principais componentes responsáveis pelo comportamento espectral da água. As regiões de absorção e espalhamento destes constituintes da água é que vão definir a forma final da curva de reflectância, enquanto sua concentração é responsável pela magnitude das feições e pela magnitude da energia refletida em subsuperfície (Kirk, 1993; Mobley, 1994).

A **Tabela 1** mostra os pontos de absorção de plânctons encontrados na literatura (Dekker, 1993; Weaver and Wrigley, 1994) enquanto na Tabela 2 podem ser observadas as regiões de fluorescência de pigmentos fitoplancctônicos.

Tabela 1 – Comprimento de onda de absorção dos pigmentos (Fonte: Dekker, 1993; Weaver and Wrigley, 1994)..

Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton	Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton
438	Clorofila a	Todos os tipos	615	c-ficocianina	cianobactéria
470	Hexa-ficoxantina	cianobactéria	624	Cp -cianina	Cianobactérias
480	βcaroteno	Dinoflagelados, diatomáceas, crisófitas	627	ficorobilina	cianobactérias
493	ficorobilina	cianobactérias	650	aloficocianina	cianobactéria
493(in vivo)	ficoeritrina	cianobactéria	673 (in vitro)	Clorofila a	
562	c-ficoeritrina	cianobactérias	676	Clorofila a	
567	ficorobilina	cianobactérias	680 (in vivo)	Clorofila a	Cianobactéria e eucariotes

A análise da **Tabela 1** mostra que absorção pelos pigmentos fitoplanctônicos é a grande responsável pela captura de fótons na região do azul, provocando assim, substanciais modificações na cor da água. A absorção de fótons na região do azul, por sua vez, traz como consequência à emissão em outras regiões conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Regiões de Emissão por fluorescência de diferentes pigmentos (Weaver and Wrigley, 1994).

Fluorescência (nm)	Pigmento	Tipo de plâncton
685	Clorofila a	Todos os tipos
560-570	ficobilina	cianobactérias
650-660	Ficocianina	cianobactéria
570-580	ficoeritrina	cianobactéria

A presença da matéria inorgânica em suspensão é responsável pelo aumento do coeficiente de retroespalhamento (b), e portanto, pelo aumento da reflectância da água. A porcentagem de energia refletida aumenta com o aumento da concentração de sedimentos inorgânicos na água. Outra característica marcante é que o máximo de energia refletida migra para comprimentos de onda mais longos, na medida em que aumenta a concentração (Curran e Novo, 1988)

4. Metodologia

Dado às dimensões da área de estudo, 2000 Km², e as dificuldades de acesso, devido a distância de centros urbanos, uma equipe de 10 pessoas permaneceu a bordo do barco mostrado na **Figura 3**, no período de 13 a 22 de julho de 2002. O acesso a localização das estações de coleta era feito por duas lanchas, cada uma com uma equipe de 3 pessoas. As 144 estações amostrais, foram separadas em dois tipos, em função das coletas realizadas. Em 68 estações, denominadas de completas e representadas por **pcl** e em na cor azul na **Figura 1**, foram realizadas medidas radiométricas, medidas limnológicas e coleta de amostras de água para análise de laboratório. Nas estações restantes, denominadas de incompletas e representadas por **pil** e em na cor vermelha na **Figura 1**, não foram realizadas coletas de amostras de água. As medidas espectrais foram realizadas pelo espectro-radiômetro modelo UV/VNIR da Analytical Spectral Devices, Inc. As medidas limnológicas foram realizadas com o equipamento Horiba, modelo U10.



Figura 3 – Barco e lancha utilizados durante a campanha de campo.

Para se efetuar a análise dos dados radiométricos, inicialmente, as estações amostrais foram agrupadas a partir de uma inspeção sobre uma superposição da localização das estações de coleta com a composição colorida das bandas 1, 2 e 3 do sensor ETM+ do Landsat, de uma imagem cuja passagem do satélite sobre a área de estudo aconteceu a 4 dias do início do

trabalho de campo. Posteriormente refinou-se este agrupamento das estações baseando-se no resultado de uma classificação não supervisionada das bandas 1,2,3,4 do ETM+. O passo seguinte baseou-se na análise visual das curvas espectrais de cada grupo, buscando caracteriza-los pela forma das curvas, e pela reflectância máxima e média do grupo. Os espectros foram submetidos à análise derivativa (Nóbrega,2002) de modo a identificar as principais feições de absorção e espalhamento presentes nos diferentes espectros.

5. Resultados Preliminares

Para a caracterização de cada grupo de espectros, tomou-se por base, o comportamento mais freqüente das curvas espectrais das estações que compõem uma determinada massa de água. Por exemplo, as curvas espectrais das estações 7, 8, 9, 10 mostraram-se as mais representativas do grupo I, formado principalmente por águas provenientes de rios da margem sul da várzea, que são rios típicos de águas claras. Essa massa de água se estende de oeste para leste, visto que essa é a direção dominante do fluxo pela influência do gradiente geral da planície e da direção de escoamento do Rio Amazonas.

A análise da curva espectral da estação10, posicionada mais a oeste, **Figura 4**, permite inferir que o processo dominante na faixa de 400 a 900 nm é o espalhamento molecular e que as águas aí presentes são águas claras, com baixa concentração de fitoplâncton e baixa concentração de material particulado. A alta transparência da água (profundidade Secchi superior a 1 metro) explica a baixa reflectância da água (entre 5 e 9 %) em todos os comprimentos de onda. O aspecto achatado do espectro sugere que ele é dominado pela reflectância de superfície e não pela reflectância do volume. A partir da curva da estação 9, que possui um valor médio menor de reflectância, pode-se inferir houve uma deposição do pouco material particulado exportado da Terra Firme. Ao atingir as estações 8 e 7, a água já apresenta algumas feições que podem sugerir a presença de fitoplâncton.

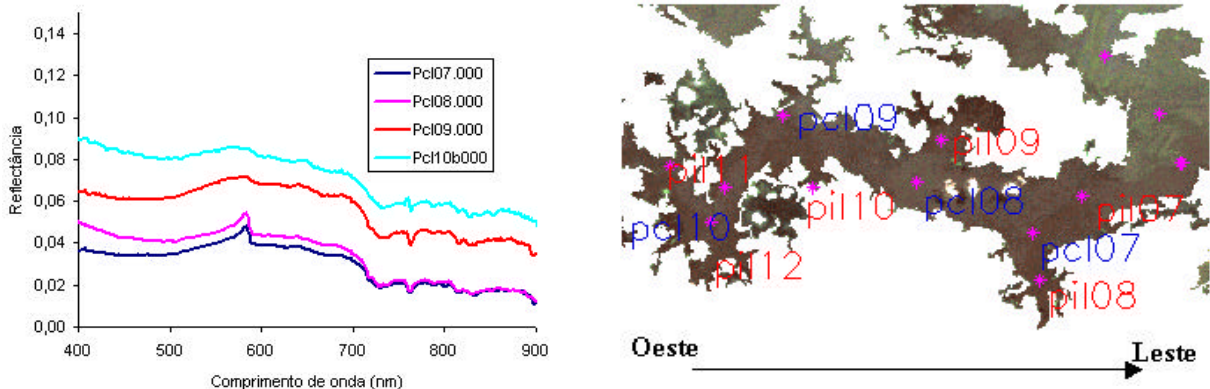


Figura 4 – Curvas espectrais e imagem da área com as estações do grupo 1.

Contrastando com o grupo 1 acima, o grupo 2 apresenta curvas de resposta espectral com pontos de absorção bem definidos ao longo de vários comprimentos de onda. Vale ressaltar que os pontos de absorção identificados não coincidem exatamente com os comprimentos de onda descritos na **Tabela 1**. Estes deslocamentos nos pontos de absorção devem-se ao fato da interação entre os processos de absorção e espalhamento dos vários constituintes presentes na água. Nesta análise utilizou-se utilizando a primeira derivada da curva de reflectância para uma identificação mais precisa dos pontos de absorção. Outro fato a ser observado neste grupo, é o comportamento das curvas das estações 38 e 42. De 400 a 680 nm, a curva da estação 38, apresenta maior reflectância e bandas de absorção de clorofila mais

bem definidas do que a curva da estação 42. Uma possível explicação para este comportamento é a de que as águas no local na estação 38 possuem maior concentração de fitoplâncton, que dão uma forma mais definida para os pontos de absorção por clorofila e maior reflectancia na região do verde. Já espectro da estação 42 sugere que o fitoplâncton se encontra em processo de senescência, com a liberação de matéria orgânica dissolvida, o que explica a alta absorção no azul e em uma ampla região espectral, sem que se caracterizem feições específicas. Além disso, a partir de 680 nm, há um aumento da reflectância da estação 42. Isto pode ser atribuído ao efeito do espalhamento por partículas de células fitoplanctônicas mortas, que perdem sua capacidade de flutuação e passam a ser “empilhadas” mais à superfície da água pelo efeito do vento e da turbulência.

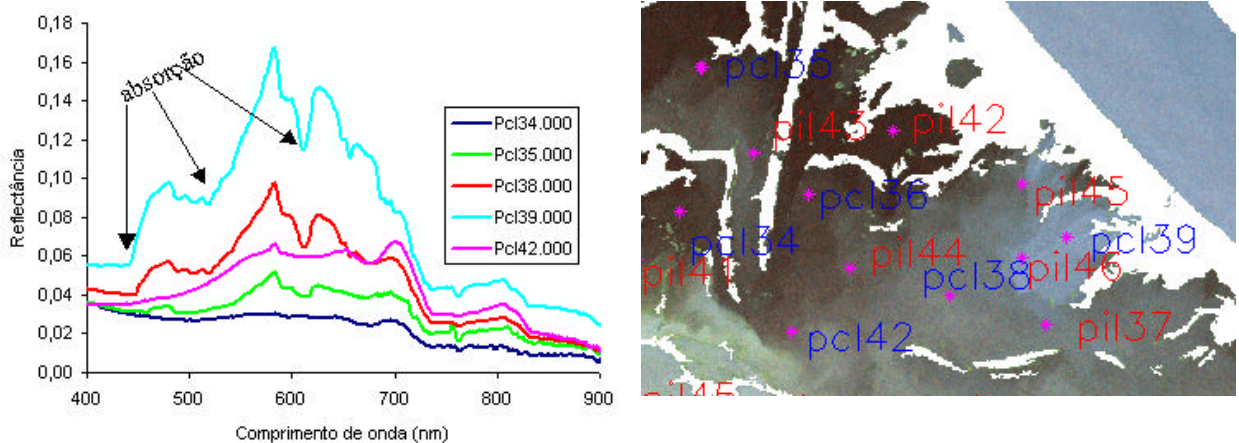


Figura 5 – Curvas espectrais e imagem da área com as estações do grupo 2.

6. Considerações finais

Obviamente, as análises apresentadas acima são bastante preliminares, mas mostram o grande potencial de informação contido nos espectros coletados, um potencial que vai muito além da identificação dos componentes da água, permitindo mesmo o levantamento de hipóteses sobre os processos biológicos e suas interações com a hidrodinâmica do lago no momento da coleta. Apesar da diferença da data de aquisição da imagem LANDSAT e das coletas de campo variar de 4 a 13 dias, em uma análise preliminar encontrou-se boa correlação entre as curvas espectrais de campo e os níveis digitais das imagens.

Conforme mencionado anteriormente, a análise aqui apresentada de forma sucinta, é parte de um estudo mais amplo cujo objetivo é modelar a dinâmica espacial e temporal das massas d'água na bacia Amazônica. Neste sentido uma outra análise a ser efetuada, será a avaliação conjunta dos dados radiométricos e limnológicos, buscando quantificar a correlação entre eles.

7. Agradecimentos

Agradecemos a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro, sob processo N.º 2002/00785-3, para a realização desta pesquisa e ao projeto LBA-LC-07 pelo apoio durante o trabalho de campo.

Referências

- Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Costa, M. Remote Sensing for Sampling Station selection in the study of water circulation from river system to and Amazon floodplain lakes: a methodological proposal. II Conferência Científica Internacional do Experimento LBA, Manaus(AM) , julho de 2002.
- Curran, P. J.; Novo, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. *Journal of Coastal Research*, v. 4, n. 3, p. 351-368, 1988.
- Dekker, A.G. Detection of Optical Water Quality Parameters for Eutrophic Waters by High Resolution Remote Sensing. University of Amsterdam. 1993.
- Junk, W.J.; Piedade, M.T.F. Plant life in the floodplain with special references to herbaceous plantas. In: *The Central Amazon Floodplain, Ecology of a pulsing system*, 1997.
- Kirk, J.T.O *Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* , London, Cambridge University Press, 1983
- Melack, J. M. Amazon floodplain lakes: shape, fetch, and stratification., *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verch.* 22: 1278-1281, 1984.
- Mertes, L.A.K., Daniel, D.L.; Melack, J.M; Nelson, B., Martinelli, L.A. and Foresberg, B.R. Spatial patterns of hydrology, geomorphology and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective, *Geomorphology*, 13: 215-232, 1995.
- Mobley, C. D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. San Diego. Academic Press. 1994.
- Nobrega, I. W. *Análise Espectral de Sistemas Aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.
- Weaver, E. C.; Wrigley, R. Factors Affecting the Identification of Phytoplankton Groups by Means of Remote Sensing. NASA Technical Memorandum 108799. 1994