

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CLOROFILA E DOS SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NAS ÁGUAS DO LAGO GRANDE DE CURUAI (PARÁ), NA ÉPOCA DA SECA, ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE CAMPO

Eduardo Moraes Arraut ¹
Conrado de Moraes Rudorff ¹
Cláudio Clemente Faria Barbosa ¹
João Carlos Carvalho ¹
Waterloo Pereira Filho ²
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo ¹

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

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

Abstract. Spectral reflectance curves of water collected at 51 sampling stations at Lake Curuai (LGC), Mid-Amazon, Brazil, were analyzed in search of features that would indicate the presence of Chlorophyll (Chl-a) and Total Suspended Solids (TSS). Three spectral water classes previously identified were used as starting point to investigate the suitability of several analytical techniques to assess the relationship between spectral reflectance and water components. TSS concentration was found to be positively correlated with reflectance integrated in the ranges between 600-700nm and 750-850nm, and with a spectral depression centered at 720nm. The band centered at 676nm was found to be related to Chl-a concentration, which was reinforced by its order-1 derivative. An R^2 of 71.5% was found when the order-1 derivative at 720nm and the integral reflectance from 750-850nm were regressed against TSS concentration. Response due to TSS was dominant in most of the spectra.

Palavras-chave: Remote Sensing, water, derivative analysis, Suspended Sediments, Chlorophyll, Sensoriamento Remoto, água, análise derivativa, Sólidos em Suspensão, Clorofila.

1 Introdução

O fitoplâncton – *phyto* vem da palavra grega *phuton*, que significa ‘planta’, e plâncton, da palavra grega *plagtos*, que significa ‘vagando’ (Allaby, 1996) – é um grupo heterogêneo composto principalmente por algas fotossintetizantes que se distribui por grande parte dos ambientes marinhos e aquáticos continentais do mundo. Nestes ambientes, é o principal responsável pela captação da energia eletromagnética e sua transformação em energia química - em um processo chamado de fotossíntese -, desempenhando, portanto, importante função no sistema. As moléculas que captam e transformam a energia são chamadas de pigmentos fotossintetizantes, e alguns exemplos são as clorofilas a, b e c e os carotenóides. Estas moléculas absorvem a energia em bandas espectrais características - por exemplo, 438 e 676nm para a Clorofila a (Chl-a) e 480nm para o β -caroteno (Weaver and Wrigley, 1994). As bandas são geralmente estreitas, e por isto captadas apenas por sensores de alta resolução espectral.

O parâmetro Total de Sólidos em Suspensão (TSS) é definido como o conjunto de partículas em suspensão filtradas por uma malha de um determinado tamanho, geralmente 45 μ m (Mobley, 2004). Em geral as partículas inorgânicas dominam amplamente esta categoria, enquanto as orgânicas – incluindo o fitoplâncton - representam uma fração menor.

Em campo, estudos do comportamento espectral destes dois componentes da água são feitos usando espectroradiômetros, equipamentos de alta resolução espectral capazes de captar as estreitas feições características dos pigmentos fotossintéticos e cuja utilidade se estende também para componentes com respostas espectrais mais amplas, como o TSS. Talvez a principal dificuldade para o uso de espectros amostrados *in situ*, entretanto, seja a alta variabilidade existente na informação registrada. Esta variabilidade pode ser decorrente, por exemplo, de variações no ângulo solar e/ou na cobertura de nuvens, que por sua vez resultam em variações às vezes imprevisíveis nas condições de iluminação. Como consequência destes fatores, além da componente radiativa proveniente da sub-superfície - a única que interagiu com as substâncias presentes no corpo d'água, sendo, portanto, a única que possui informação sobre seus constituintes -, vários outros fluxos radiantes retornam ao sensor (refletido pela superfície da água e pelo fundo, espalhada pela atmosfera).

Uma abordagem usada para reduzir o efeito das componentes que não trazem a informação de interesse é a análise derivativa. Experiências com amostras de água realizadas por Goodin *et al.* (1993) demonstram que a primeira derivada permite remover o sinal de reflectância da superfície da água, facilitando a detecção de sedimentos em suspensão, e que a segunda derivada remove o efeito espectral das partículas inorgânicas em suspensão, mantendo nos dados apenas a informação associada à presença da clorofila. Estas conclusões foram corroboradas por Rundquist *et al.* (1996) e Tsai e Philpot (1998).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi estudar as concentrações de Chl-a e de TSS nas águas do Lago Grande de Curuai coletadas em novembro de 2003 (período da seca). Trata-se de uma continuação da pesquisa iniciada por Barbosa *et al.* (2003), usando a classificação dos espectros em três classes ópticamente distintas obtidas por Rudorff *et al.* (2004). Foram usadas técnicas de análise matemática para identificar feições espectrais características da Chl-a e do TSS. Além disto, através de análise de regressão foram gerados modelos explicativos das concentrações destes dois componentes.

2 Materiais e Método

2.1 Área de estudo

As amostras de água foram coletadas por Barbosa *et al.* (2003) no Lago Grande de Curuai (LGC), localizado na planície do baixo Amazonas, ao sul da cidade de Óbidos, estado do Pará, em novembro de 2003. A **Figura 1** mostra a região de estudo e os pontos onde foram realizadas as coletas das variáveis limnológicas e feitas as medidas espectrais.

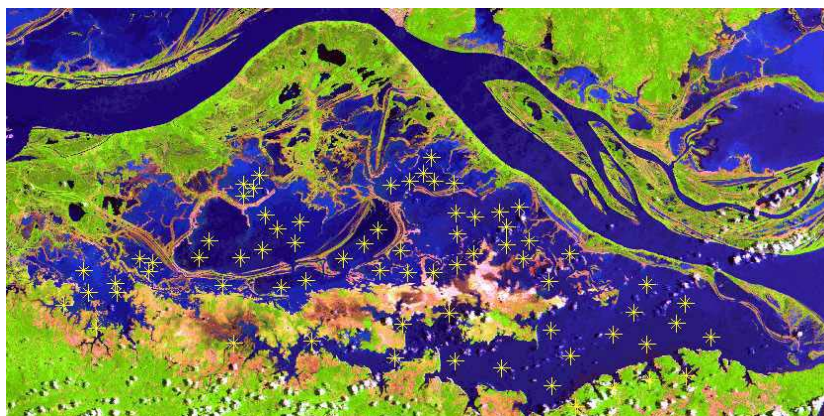


Figura 1 – Imagem Landsat-TM (23/09/2001) do Lago Grande de Curuai. Composição colorida RGB-543. Pontos amarelos representam as localizações das estações de coleta de dados.

2.2 Dados radiométricos e variáveis limnológicas

Os dados de espectroscopia foram obtidos por Barbosa et al. (2003) usando o espectrorradiômetro *Spectron*, que opera entre 368,4 e 1113,7nm com resolução espectral de 3,2nm. Em cada ponto de coleta foram feitas, na sub-superfície da água, as medidas dos seguintes parâmetros limnológicos: turbidez, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e temperatura. Foram também feitas observações complementares como profundidade total do lago e profundidade do disco *Secchi*, dentre outras. As variáveis limnológicas obtidas a partir de análises das amostras de campo foram: concentração de clorofila (Chl-a, em µg/l), Total de Sólidos em Suspensão (TSS, em mg/l) e Carbono Orgânico Dissolvido (COD).

2.3 Análise derivativa

Foram calculados os valores da primeira derivada para os comprimentos de onda de 661,4 e 720,4nm e da segunda derivada para o intervalo de bandas entre 664,3 e 687,8nm. Tomando como base a matriz de correlação entre os valores obtidos para as derivadas e as concentrações de Chl-a e TSS, foram gerados modelos de regressão linear entre estas duas variáveis (dependentes) e os parâmetros obtidos via análise derivativa (variáveis independentes) que apresentaram maior correlação com as variáveis dependentes.

3 Resultados e discussão

3.1 Classes 1 e 2

O padrão das curvas de reflectância apresentadas no gráfico da **Figura 2a** indica dominância da resposta espectral do TSS, que tende a formar um patamar de reflectância entre 600 e 700nm e a aumentar a reflectância na região do infravermelho. Além disto, as bandas de absorção características de pigmentos fotossintéticos não estão aparentes. Estes padrões são característicos de águas turvas, encontradas no LGC no período da seca (setembro a janeiro), quando a profundidade é menor e a movimentação das águas por ação dos ventos contribui para manter os sedimentos suspensos na coluna d'água.

No entanto, há indícios da presença de fitoplâncton, principalmente na amostra PCN 27, que, mesmo apresentando a maior concentração de TSS (133,9 mg/l), possui a menor diferença entre os valores de reflectância integrada entre 600-700nm e 750-800nm; i.e. maior proximidade entre o vermelho (absorvido pelos pigmentos) e o infravermelho (espalhado pela estrutura celular). Isto foi confirmado pela concentração de Chl-a obtida via análise laboratorial - o maior valor (15,18 µg/l) obtido foi o da amostra do ponto PCN 27. Nas amostras dos pontos PCN30 (85,82 mg/l TSS; 4,92 µg/l Chl-a), PCN71 (66,28 mg/l TSS; 2,46 µg/l Chl-a) e PCN73 (53,94 mg/l TSS; 1,62 µg/l Chl-a), a baixa concentração de Chl-a fez com que a diferença de reflectância entre as regiões do vermelho e do infravermelho fosse maior.

Este efeito também pôde ser notado no gráfico da primeira derivada, apresentado na **Figura 2b**. Neste, observa-se que na faixa entre 700 e 720,4nm as amostras coletadas nos pontos PCN 30, PCN 71 e PCN 73 apresentam valor menor do que a coletada no PCN 27, indicando maior gradiente de variação nesta banda para as três primeiras amostras.

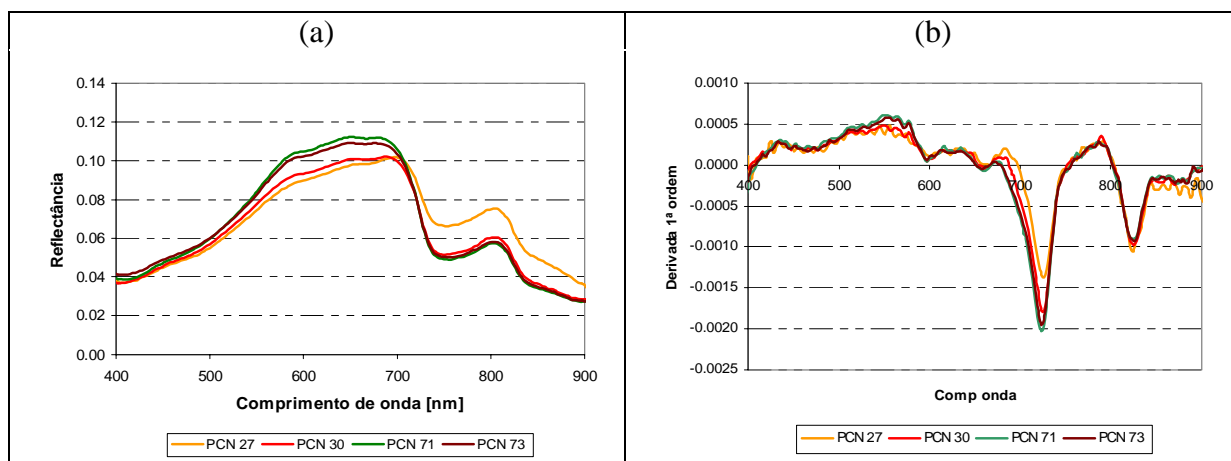


Figura 2 – (a) Curvas espectrais de pontos com altas concentrações de sedimentos em suspensão e baixas concentrações de clorofila. (b) Primeira derivada das curvas espectrais.

O padrão geral das curvas de reflectância apresentadas no gráfico da **Figura 3a** (amostras apresentadas na **Tabela 1**), semelhante ao da **Figura 2a**, indica que estas também possuem concentrações elevadas de TSS. No entanto, nota-se que a diferença entre a região do vermelho (V) e do infravermelho (IV) é menor do que a encontrada nas curvas da **Figura 2a**, o que pode ser explicado pelos valores mais elevados de TSS nas amostras cujos gráficos são mostrados na **Figura 3a**. Além disso, o efeito da presença da Chl-a, o aumento da diferença entre as faixas espectrais 700-705nm e 675-680nm – efeitos decorrentes, respectivamente, do espalhamento e da absorção por este pigmento -, também pode ser observado mais nitidamente em algumas curvas da **Figura 3a** (por exemplo, amostras PCN 43, 44, 55 e 70).

Comparando as curvas da Figura 3a entre si, observa-se uma depressão espectral na região em torno de 676nm mais acentuada nas curvas das amostras PCN 43 e 44 e menos acentuada nas curvas das amostras PCN 29 e 52. As primeiras possuem as maiores e as segundas as menores concentrações de Chl-a, como pode ser observado na **Tabela 1**. A análise conjunta das curvas das **Figuras 2 e 3** aponta esta como uma banda de absorção característica da Chl-a.

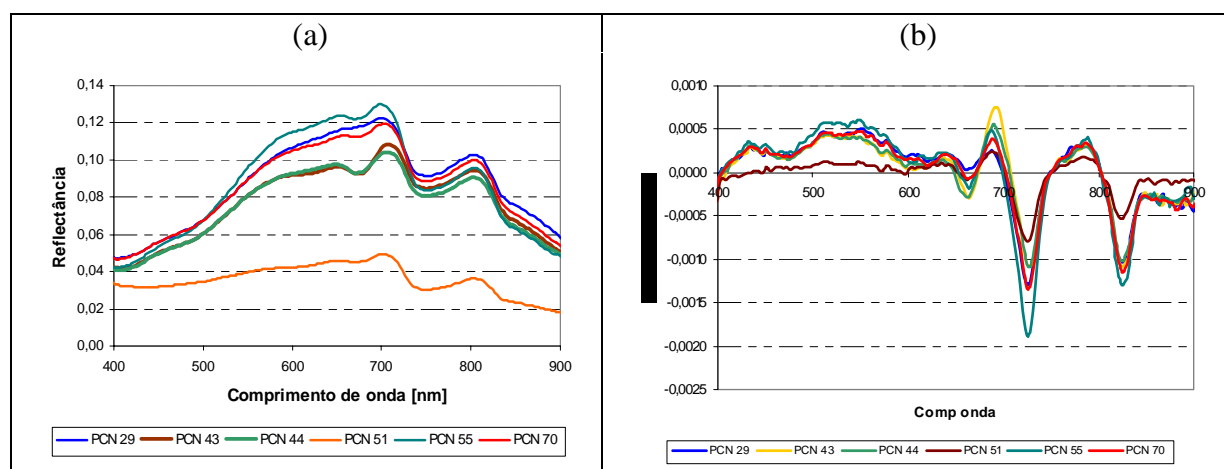


Figura 3 – (a) Curvas espectrais de amostras da classe 2, com a banda de absorção centrada em 676nm, característica da Chl-a. (b) Primeira derivada das curvas em (a).

Tabela 1 – Concentrações de TSS e Chl-a das amostras das Classes 1 e 2 (cores semelhantes ao gráfico da Figura 3a).

	TSS (mg/l)	Chl-a (µg/l)
PCN 29	222,88	18,16
PCN 43	158,36	86,28
PCN 44	184,73	82,59
PCN 51	59,35	21,49
PCN 55	110,79	23,58
PCN 70	188,61	30,41

A primeira derivada (gráfico na **Figura 3b**) aplicada na banda centrada em 676nm apresenta uma correlação de 0,912 com a Chl-a. Como pode ser observado através do gráfico da **Figura 3b** e da **Tabela 1**, os dois menores valores da derivada-1 a 676nm foram obtidos para as amostras PCN 43 e 44, que possuem as maiores concentrações de Chl-a, reforçando portanto a idéia de que o aumento da concentração deste pigmento atua na diferença entre as faixas espectrais 700-705nm e 675-680nm. Isto está em acordo com o que foi relatado por Mobley (1994) e Novo (2001). Além disto, de forma semelhante ao que foi observado para a Classe 1, a depressão centrada em torno de 720nm aumenta com o aumento do TSS e a diminuição da Chl-a (como pode ser observado na **Figura 3b**), resultando em um maior contraste entre as regiões espectrais do vermelho e do infravermelho.

Na **Figura 4** é apresentado o gráfico da segunda derivada calculada para os espectros das observações das classes 1 e 2 conjuntas. Encontrou-se uma correlação de 0,79 entre Chl-a e a segunda derivada na faixa entre 664 e 687nm, indicando esta como uma potencial faixa de interesse para estudos posteriores.

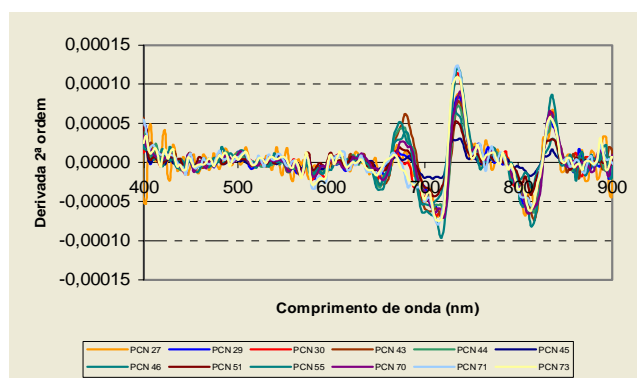


Figura 4 – Segunda derivada das curvas das Classes 1 e 2.

Para se ter uma idéia da relação entre a concentração de Chl-a e a segunda derivada na faixa entre 664 e 687nm, ajustou-se uma regressão linear entre estas duas variáveis (gráfico apresentado na **Figura 5**) - o pequeno número de amostras limita uma abordagem estatística mais refinada, e, portanto, este procedimento serviu apenas para uma análise exploratória. Foi obtido um $R^2 = 63,1$ (DP = 18,6). Segundo Goodin (1993), a aplicação da segunda derivada retira os efeitos decorrentes da reflectância da água em si (na primeira derivação) e dos sedimentos em suspensão (na segunda), facilitando assim a identificação do conteúdo de Chl-a. No entanto, neste caso, provavelmente por causa da ampla dominância espectral do TSS, a aplicação da segunda derivada gerou curvas com forte irregularidade, dificultando a observação desta relação e conseqüentemente minimizando a capacidade explicativa do modelo de regressão.

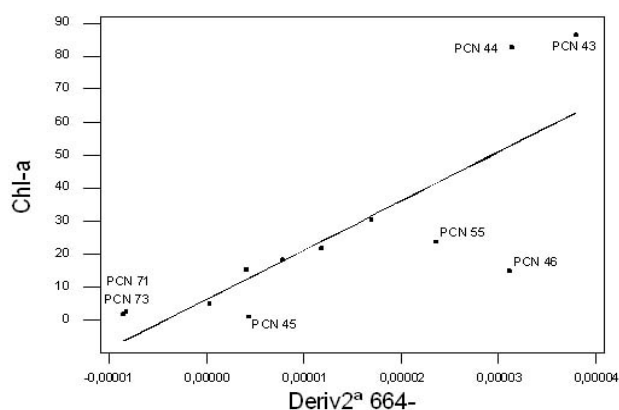


Figura 5 – Reta de regressão ajustada para os valores de Chl-a em função da segunda derivada na faixa entre 664 e 687nm dos espectros das classes 1 e 2 ($R^2 = 63,1$ e $DP = 18,6$).

3.2 Classe 3

Quando comparadas às curvas apresentadas nas **Figuras 2 e 3**, nota-se nas curvas apresentadas na **Figura 6** a reflectância mais elevada no intervalo entre 600-700nm, a quase completa ausência da banda de absorção pela Chl-a (centrada em 676nm) e a elevada reflectância na região do IV. A curvas desta classe são de águas de cor alaranjada, com ampla dominância espectral do TSS, o dificulta a análise da Chl-a a partir de dados radiométricos.

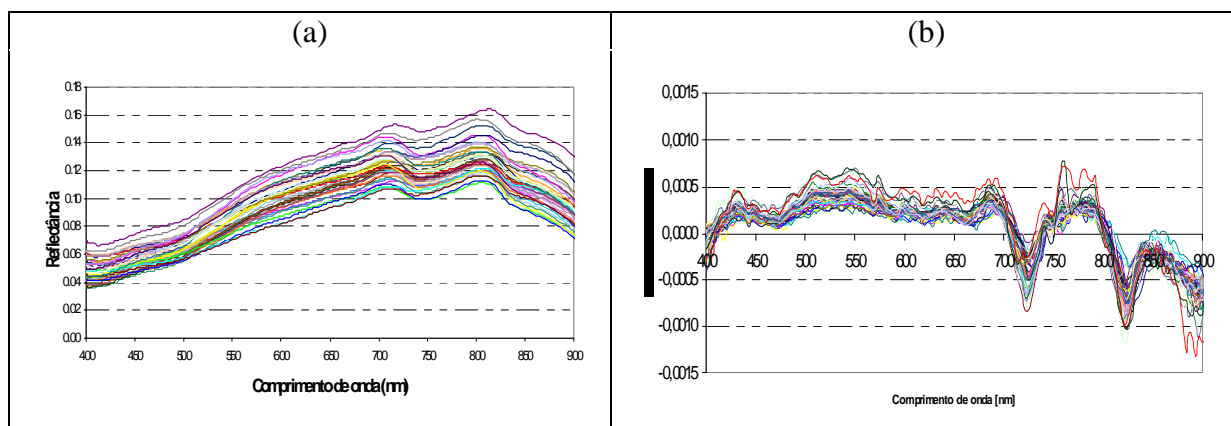


Figura 6 – (a) Curvas espectrais de amostras da classe 3. (b) Primeira derivada das curvas.

Com o intuito de tentar explicar a concentração de TSS a partir da reflectância, após análise da matriz de correlação e de testes com diferentes variáveis, foi ajustado um modelo de regressão linear tomando como variáveis independentes os parâmetros: 1) derivada da reflectância em 720nm e 2) integral entre 750 a 850nm.

Como pode ser observado na **Figura 7**, a regressão do TSS (dependente) contra as variáveis independentes primeira derivada da reflectância a 720,4nm (**Figura 7a**) e reflectância integrada de 750 a 850nm (**Figura 7b**) resultou, respectivamente, em $R^2 = 41,7$ ($DP = 125,169\text{mg/l}$) e $R^2 = 45,1$ ($DP = 121,457\text{mg/l}$). Com base nos valores destes coeficientes de determinação, e na baixa correlação entre estas duas variáveis (0.340), foi feita uma regressão considerando ambas conjuntamente contra TSS (**Tabela 2 e Figura 8**). Foi obtido um $R^2 = 71,5$ ($DP = 91,92\text{mg/l}$).

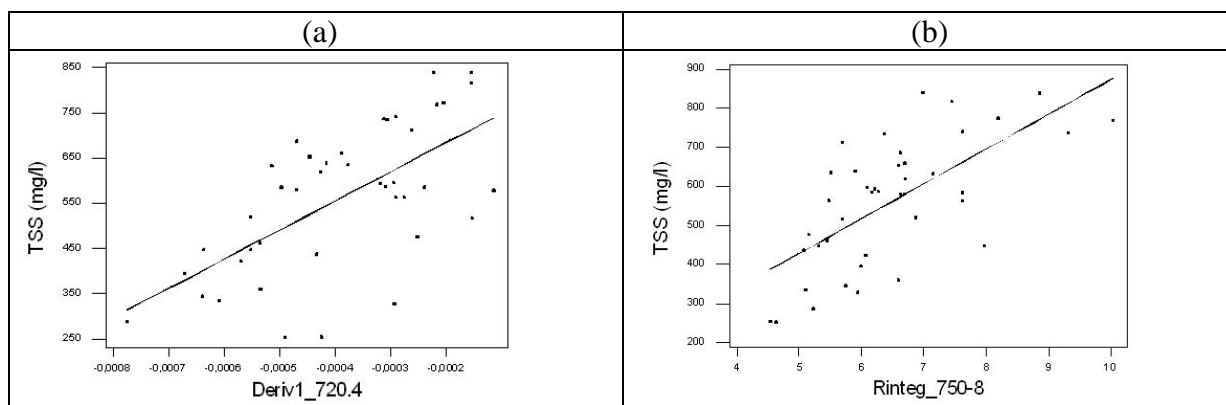


Figura 7 – Retas de regressão ajustadas para TSS em função de (a) primeira derivada na banda 720,4nm ($R^2 = 41,7$ e DP = 125,2) e (b) reflectância integrada na faixa de 750 a 850nm ($R^2 = 45,1$ e DP = 121,5).

O coeficiente de determinação obtido para a regressão acima indica que 71,5% da concentração de TSS pode ser explicada por uma relação linear entre a tendência geral de aumento da diferença entre o *plateau* de reflectância entre 600 e 700nm, causado pelo TSS, e a banda centrada em 720,4nm (o valor negativo da inclinação da curva na transição entre estas duas regiões diminui à medida que o TSS aumenta), e o aumento geral da reflectância na faixa entre 750 e 850nm (o pico mais alto da **Figura 6a**), também causada principalmente pelo TSS.

Tabela 2 – Regressão multivariada do TSS (dependente) contra a primeira derivada a 720,4nm e a reflectância integrada entre 750 e 850nm (independentes), com a equação final.

$$\text{TSS (mg/l)} = 242 + 525255 \text{ Deriv1_720.4} + 83,7 \text{ Rinteg_750-850}$$

Preditiva	Coef	SE Coef	T	P
Constante	242,0	121,6	1,99	0,056
Deriv1_720,4	525255	102868	5,11	0,000
Rinteg_750-850	83,73	16,12	5,19	0,000

$$S = 91,92 \quad R\text{-Sq} = 71,5\% \quad R\text{-Sq(aj)} = 69,6\%$$

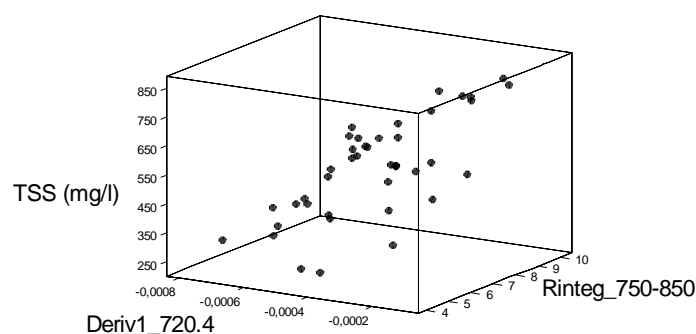


Figura 8 – Ilustração da regressão da primeira derivada a 720,4nm e da reflectância integrada entre 750 e 850nm (independentes) contra concentração de TSS, mostrada na Tabela 2.

4 Considerações Finais

Provavelmente por causa da alta heterogeneidade da resposta espectral do ambiente aquático em decorrência da variação na concentração de seus constituintes opticamente ativos, observou-se que o uso conjunto de técnicas distintas – neste caso os valores de reflectância integrados em determinadas bandas e as análises derivativas – é importante. Cada técnica ressaltou melhor determinadas características espectrais. Por exemplo, as primeiras derivadas mostraram-se eficientes na caracterização dos efeitos do TSS, sob o ponto de vista do contraste entre a influência deste componente em diferentes regiões do espectro (diferença entre regiões espectrais contíguas, indicando variação entre elas com certo grau de independência), e da Chl-a, ressaltando as bandas de absorção, enquanto as integrais provaram-se úteis para evidenciar tendências de aumento da reflectância em regiões específicas das curvas por ação do TSS.

Os modelos apresentados possuem valor ilustrativo e não conclusivo, já que seriam necessárias análises mais aprofundadas com quantidades maiores de amostras de diferentes localidades para, talvez, generalizar os padrões observados. Os resultados podem, no entanto, servir de ponto de partida para estudos posteriores.

Referências

Allaby, M. **The Concise Dictionary of Zoology**. Oxford University Press. 508p. 1996.

Barbosa, C.C.F.; Novo, E.M.L.M.; Carvalho, J.C.; Filho, W.P.; Mantovani, J.E. Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2003. p. 1099-1106. Disponível na biblioteca digital URLib: <http://iris.sid.inpe.br:1908/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.17.20.11/doc/18_329.pdf>. Acesso em: 13 out. 2004.

Goodin D.G.; Han L.H.; Fraser R.N.; Rundquist D.C.; Stebbins W.A. Analysis of suspended-solids in water using remotely sensed high-resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 59 (4): 505-510 APR 1993.

Mobley, C.D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 1994. 592p.

Rundquist D.C.; Han L.H.; Schalles J.F.; Peake J.S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: The case for the first derivative of reflectance near 690nm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 62 (2): 195-200 FEB 1996.

Novo, E.M.L.M. Comportamento Espectral da Água. In: P.R. Menezes & J.S. Madeira-Netto (Org.). **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Editora Universidade de Brasília e Embrapa Cerrados, 2001.262 p.

Rudorff, C.M.; Arraut, E.M.; Barbosa C.C.; Carvalho, J.C.; Filho, W.P.; Novo, E.M.L.M. Avaliação de algoritmos bio-óticos em massas d'água amazônicas. (Submetido ao Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2004, Goiânia).

Tsai F.; Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data. **Remote sensing of the environment** 66 (1): 41-51 OCT 1998.

Weaver, E. C.; Wrigley, R. **Factors Affecting the Identification of Phytoplankton Groups by Means of Remote Sensing**. NASA Technical Memorandum 108799. 1994.