

# DETECÇÃO DE COMPONENTES ÓPTICAMENTE ATIVOS NO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA A PARTIR DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS: UMA APLICAÇÃO DE ANÁLISE DERIVATIVA

MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO  
REJANE ENNES  
TIAGO MATSO SAMIZAVA

Universidade Estadual Paulista - Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT  
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP  
[rejane\\_e@yahoo.com.br](mailto:rejane_e@yahoo.com.br), [mlourdes@fct.unesp.br](mailto:mlourdes@fct.unesp.br), [tiagosamizava@yahoo.com.br](mailto:tiagosamizava@yahoo.com.br)

**RESUMO** – Para avaliar o potencial de dados hiperespectrais orbitais no estudo de corpos d’água, uma imagem Hyperion/EO-1 foi adquirida simultaneamente à mensuração de variáveis limnológicas em pontos georreferenciados no Reservatório de Itupararanga, responsável pelo abastecimento público na região de Sorocaba – SP. Por se tratar de um manancial de água destinado ao consumo humano, a concentração de constituintes opticamente ativos no corpo d’água é pequena, sendo necessária a utilização de métodos mais refinados para detectar variações sutis nos padrões reflectância e absorção espectrais. Uma abordagem com forte consistência teórica e que tem assegurado bons resultados em pesquisas desse gênero é a análise derivativa. Assim, para verificar o potencial da imagem hiperespectral na detecção de substâncias opticamente ativas no referido reservatório realizou-se, inicialmente, a correção atmosférica e geométrica da imagem Hyperion, e posterior extração de curvas espectrais nos pontos de coleta de variáveis limnológicas. Após um tratamento de suavização, aplicou-se a análise derivativa às curvas espectrais obtidas. Os dados resultantes foram correlacionados com algumas variáveis limnológicas opticamente ativas e mostraram que a técnica destacou importantes feições visualizadas na curva original e, ainda, que as maiores correlações foram obtidas para a variável pigmentos totais (medida indireta da variável clorofila *a*).

**ABSTRACT** - The objective of this work was evaluating the contribution of hyperspectral images in the identification of optically active substances presents in the Itupararanga Reservoir, destined to public provisioning in the area of Sorocaba, SP. To reach the proposed objective, an hyperspectral imagery of EO-1 Hyperion orbital sensor was acquired simultaneously with limnological variables collected in some points in the body of water. After the atmospheric effects correction, in the geographical locations of those points, spectral curves of the hyperspectral image were extracted and a technique of spectral derivative analysis was applied. The data resultants of the application of derivative analysis were correlated with some limnological variables and its showed that the technique enhanced important features of the original spectral curves and the largest correlations were obtained for the variable total pigments (indirect indicator of chlorophyll *a*). The results confirmed the capacity of hyperspectral image in detecting optically active constituents in the water, even present in small concentrations in the body of water.

## 1 INTRODUÇÃO

Os recentes avanços na tecnologia do Sensoriamento Remoto proporcionaram o desenvolvimento de sensores orbitais com altíssima resolução espectral, capazes de fornecer medidas radiométricas em bandas estreitas e contínuas para cada pixel da imagem, definindo curvas espectrais com potencial para discriminar diferentes componentes da matéria. A resolução espectral desses sensores está próxima dos dados obtidos por espectrorradiômetros de

campo ou de laboratório, que adquirem curvas espectrais em medidas pontuais para obter uma melhor compreensão dos fenômenos relacionados com a interação da energia eletromagnética com os objetos da superfície terrestre.

A vantagem dos sensores orbitais hiperespectrais, quando comparados com espectrorradiômetros é que se tratam de sistemas imageadores, o que viabiliza analisar a variação espacial e temporal de alvos da superfície terrestre. Tratando-se dos ambientes aquáticos, as contribuições são ainda maiores, pela possibilidade de investigar a origem e o deslocamento de substâncias

específicas, em suspensão ou dissolvidas na água, que causam mudanças da resposta espectral da água e que não são identificadas em imagens multiespectrais de baixa resolução espectral (Jensen, 2002).

Com desenvolvimento desses sensores, além da possibilidade de se trabalhar com feições de absorção e espalhamento em curvas de reflectância originais, pesquisadores também propuseram a análise desses dados com a utilização de técnicas de espectroscopia. Dentre as técnicas propostas, a análise derivativa tem se mostrado com forte consistência teórica para o uso em dados de Sensoriamento Remoto. A vantagem da aplicação de análise derivativa é a possibilidade de produzir dados hiperespectrais menos sensíveis às componentes que causam variações indesejáveis na radiação detectada por um sensor, que se comportam como constantes aditivas e espectralmente independentes ao longo do intervalo espectral de interesse, então, a subtração de medidas radiométricas entre duas bandas espaçadas pode reduzir os seus efeitos (RUDORFF, 2006). Assim, efeitos causados pela variação de intensidade de iluminação, se causados por mudanças no ângulo solar, cobertura de nuvens, ou pela topografia do local, podem ser minimizados (TSAI; PHILPOT, 1998).

Conceitualmente, a aplicação de uma operação de derivada sobre uma função, representa uma forma de quantificar a taxa de variação de uma determinada variável em relação à outra. No caso de um espectro, representa a taxa de variação de reflectância espectral do alvo em relação à variação do comprimento de onda da energia incidente (BARBOSA, 2005).

Em corpos d'água, os trabalhos existentes usando análise derivativa, relatam a utilização da técnica para decompor espectros de ambientes aquáticos, visando discriminar os efeitos e quantificar a concentração de sólidos em suspensão e clorofila na água (GOODIN et al., 1993; RUNDQUIST et al., 1996; CHEN et al., 1992).

Na análise derivativa, a reflectância espectral de um corpo d'água pode ser entendida como um sinal composto representado pela soma ponderada de três componentes: água, sólidos em suspensão e clorofila. Cada componente tem um padrão ou assinatura espectral distinto, e a mistura destes padrões produz a assinatura espectral do corpo. Essa assinatura pode ser representada como um polinômio de ordem  $N$ , sendo que  $N$  varia diferentemente para cada componente. Então, pela diferenciação sucessiva da assinatura espectral original, pode-se remover sistematicamente os efeitos dos componentes de menor ordem (GOODIN et al., 1993).

Goodin et al. (1993) desenvolveram uma pesquisa aplicando análise derivativa em curvas espectrais extraídas de corpos d'água contendo somente sólidos em suspensão ou clorofila e a mistura dos dois. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que efeitos de alguns componentes da água pura podem ser removidos pela primeira derivada e efeitos de sólidos em suspensão pela segunda, deixando uma curva que consiste somente de feições associadas à clorofila.

A área de estudo selecionada para o desenvolvimento da pesquisa foi o Reservatório de Itupararanga/SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba – médio Tietê/SP. Trata-se de um dos maiores mananciais de água potável da região, abastecendo aproximadamente 800.000 habitantes. Sabe-se que a principal característica desse reservatório é de possuir água de boa qualidade, de acordo com órgãos oficiais do Estado de São Paulo e por se tratar de um manancial de abastecimento, as concentrações de componentes opticamente ativos são relativamente pequenas, o que pode dificultar sua identificação em curvas espectrais. Porém, devido à necessidade de se dispor de indicadores capazes de medir a susceptibilidade ao risco de degradação de uma fonte de abastecimento público é essencial que se investiguem métodos que permitam inferir as variações na composição em corpos d'água com tais características.

O sensor orbital utilizado para obter curvas espectrais, foi o Hyperion, instalado no satélite *Earth Observing One* (EO-1), lançado no ano de 2000, que permite a aquisição de imagens em 242 bandas espectrais, localizadas nas faixas do visível e do infravermelho (comprimentos de onda entre 400 e 2.500 nm), com resolução espectral de 10 nm. (SKIDMORE, 2002). Tal sensor não foi desenvolvido para estudos em ambientes aquáticos, devido sua baixa relação sinal/ruído, contudo estudos preliminares já demonstraram seu potencial para corpos d'água (KRUSE, 2003; RUDORFF, 2006).

Assim, foi aplicada sobre curvas espectrais geradas a partir de uma imagem hiperespectral a técnica de análise derivativa, na tentativa evidenciar pequenas feições em curvas espectrais que reflitam a presença de alguns componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

O Reservatório de Itupararanga localiza-se no Estado de São Paulo, próximo à cidade de Sorocaba. A Figura 1 mostra sua localização no estado.

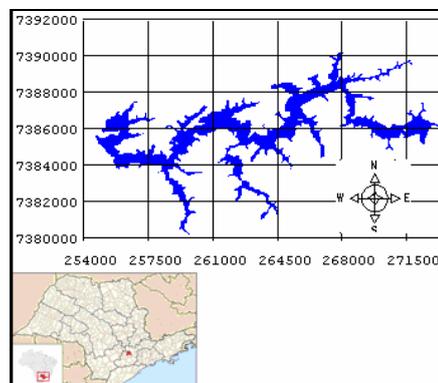


Figura 1 –Reservatório de Itupararanga – SP

As coordenadas no sistema de projeção UTM e datum WGS84, referentes à parte central do reservatório

são E (m): 264090,185 e N (m): 7385377,742 com e zona UTM 23.

O desenvolvimento do trabalho teve início com a realização de uma campanha de campo para medir dados limnológicos em 13 pontos de coleta para variável pigmentos totais e 26 pontos para as demais variáveis no dia 09 de outubro de 2007, cobrindo um segmento do reservatório, em que a imagem Hyperion foi adquirida simultaneamente. Para a definição do esquema de amostragem para a coleta e análise da água, utilizaram-se cenas ETM+/Landsat tomadas em maio de 2003 e de maio de 2001. Para a distribuição dos elementos amostrais, os seguintes critérios foram considerados: Águas espectralmente distintas, saídas dos principais afluentes, seleção da parte central do reservatório e inserção de alguns pontos na região litorânea

Na Figura 2 é apresentada a localização geográfica dos 26 elementos amostrais na represa. Os pontos circulados são os pontos de coleta para análise da variável pigmentos totais.

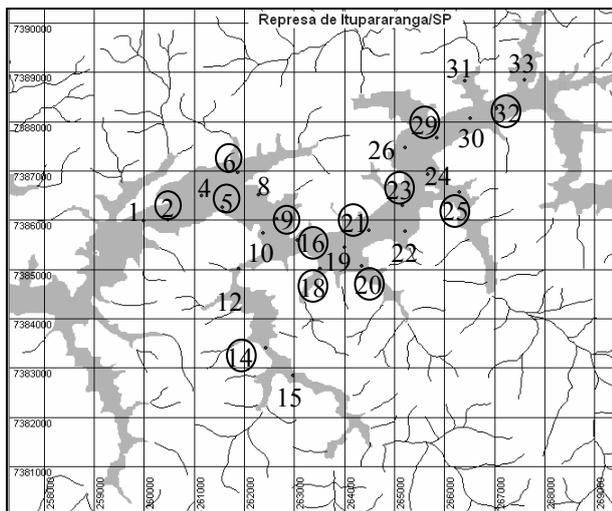


Figura 2 – Localização dos pontos de coleta para obtenção das variáveis limnológicas.

Em cada elemento amostral mostrado na Figura 2, foram coletadas as seguintes variáveis limnológicas: transparência (penetração vertical da luz solar na coluna d'água com o disco de Secchi), em metros, pH, condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), temperatura, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, sólidos totais, oxigênio dissolvido ( $\text{mg}/\text{L}$ ), turbidez (NTU-Nephelometric Turbidity Unit) e pigmentos totais (medida indireta de clorofila em  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) nos 13 pontos circulados. O sistema de posicionamento *Global Positioning System* (GPS) foi usado para registrar a localização geográfica.

Após a aquisição da imagem hiperespectral Hyperion, foram realizados pré-processamentos como remoção de pixels anômalos - ruídos, correção atmosférica, ajuste geométrico, aplicação de máscaras para isolar o corpo d'água, entre outros. Na remoção de pixels anômalos foi utilizada a metodologia proposta por

Goodenough *et al.* (2003) e Han *et al.* (2002), sendo substituída a resposta radiométrica dos pixels nas faixas ruidosas pela média de seus vizinhos na direção horizontal.

Para correção dos efeitos atmosféricos da imagem Hyperion, optou-se em utilizar o módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) que tem como base o código MODTRAN4, disponível comercialmente no *software* ENVI 4.4. Esse algoritmo procura minimizar os efeitos de espalhamento e absorção dos gases da atmosfera.

O georreferenciamento da imagem foi realizado no *software* ENVI 4.4, utilizando-se quatorze pontos de controle sobre feições correspondentes entre a imagem Hyperion e uma imagem ETM+/Landsat, que serviu como referência. Para a transformação foi usado um polinômio do primeiro grau, adotando-se o sistema de projeção UTM, datum WGS-84 e zona UTM 23. Após o georreferenciamento, foi avaliado o resíduo em unidades de pixel, seguido pela reamostragem dos pixels da cena Hyperion pelo método de vizinho mais próximo.

Na seqüência, nos pontos amostrais georreferenciados, em que se coletaram variáveis limnológicas, foram sobrepostos da imagem Hyperion, e nos pixels geograficamente correspondentes aos locais dos elementos amostrais, foram extraídas curvas espectrais a partir da média de 3x3 pixels na imagem. Para suavizar as curvas e evitar a presença de possíveis ruídos remanescentes e também reduzir as oscilações radiométricas, ainda observadas nos espectros Hyperion, os dados foram filtrados utilizando-se um filtro de média móvel simples com três pontos (bandas) (TSAI; PHILPOT, 1998). O filtro de média móvel calcula uma média dos valores espectrais de todos os pontos dentro de um intervalo discreto, com tamanho pré-especificado. Essa média então é definida como o novo valor do ponto central da janela. A aplicação do filtro nos espectros Hyperion reduziu algumas oscilações radiométricas introduzidas pela baixa razão sinal/ruído deste sensor.

Com as curvas espectrais filtradas, foi possível aplicar a técnica de análise derivativa. Para se obter derivadas utilizando dados hiperespectrais, é necessária a elaboração de módulos para o cálculo de derivadas em análises espectrais. Uma alternativa simples é através da técnica de aproximação por diferença simétrica, definida genericamente como aproximação simétrica. O resultado da aproximação é dependente da resolução (separação entre as bandas) e o tamanho do filtro ou da largura da banda. O benefício de utilizar a técnica de aproximação finita é que se trata de um método de fácil manipulação computacional. Desta forma, a primeira derivada do espectro de reflectância com relação ao comprimento de onda  $\lambda$ , em um determinado ponto  $n$ , pôde ser aproximada numericamente por um esquema de diferenças finitas usando a aproximação central ou simétrica. A equação (1) pode ser usada para estimar a primeira derivada de uma curva espectral (RUDORFF, 2006):

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_{\lambda_n} \approx \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda} \quad (1)$$

no qual  $\Delta\lambda$  é a separação entre bandas adjacentes;  $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$  para  $\lambda_j > \lambda_i$ , com o intervalo entre as bandas constante e  $\rho(\lambda_n)$  é o valor do espectro na faixa de comprimento de onda  $\lambda_n$ . A segunda derivada pode ser obtida aplicando-se a equação 1 na curva resultante da primeira derivada e assim por diante. Dessa forma, derivadas de altas ordens são calculadas iterativamente de modo que qualquer ordem de derivada é possível com o uso da aproximação central simétrica.

Após aplicação da técnica de análise derivativa, os dados resultantes desses processamentos e os originais foram correlacionados com variáveis limnológicas opticamente ativas coletados em campo (pigmentos totais e sólidos em suspensão) e variáveis auxiliares, como transparência e turbidez.

### 3 RESULTADOS

A partir da obtenção das variáveis limnológicas medidas “in situ”, realizou-se uma análise estatística e comparação com valores tidos como referência, que representam os valores máximos permitidos pela legislação para a classe de corpos d’água que o reservatório se enquadra. Nesta análise, observou-se que as variáveis limnológicas apresentam baixas concentrações indicadas pelas médias e pouca variabilidade, expostas nos baixos desvios padrão obtidos. Essas observações mostraram que o reservatório possui água de boa qualidade para consumo humano em relação às variáveis analisadas.

As curvas espectrais extraídas da imagem hiperespectral nos locais geográficos dos pontos de coleta de variáveis limnológicas são apresentadas na Figura 3 (a). Verifica-se que todas as curvas coletadas na imagem Hyperion do reservatório de Itapararanga apresentam forma similar. Espectralmente, as curvas obtidas revelaram uma baixa reflectância da água na faixa dos menores comprimentos de onda (entre 436 e 450 nm, principalmente), apesar da radiação eletromagnética na faixa do azul possuir maior penetração na água. A baixa reflectância nesse intervalo tem sido explicada por alguns autores em decorrência da forte absorção da matéria orgânica dissolvida e clorofila (GITELSON, 1992; KIRK, 1994).

Nota-se um pico de reflectância máxima no verde entre 560 - 570nm, um pequeno ponto de inflexão em torno de 630 nm, uma região de absorção no vermelho 671 nm e um pico de reflectância no infravermelho próximo (700 nm). Também se percebe a presença de dois outros picos pouco representativos em 770 nm e 820 nm. Essas variações nos valores de reflectância mostram-se muito similares àquelas analisadas nas curvas obtidas por Rundquist et al. (1996), Han et al. (1994) e Kirk (1994) para corpos d’água com presença predominante de clorofila *a*. Assim, em uma análise preliminar das curvas espectrais originais, considerou-se que a radiação eletromagnética, ao atravessar a camada superior do corpo d’água, tenha sido absorvida e espalhada principalmente por fitoplâncton.

Para cálculo das derivadas de primeira e segunda ordem considerou-se 26 espectros de reflectância em relação ao comprimento de onda, a Figura 3 apresenta as curvas obtidas após aplicação da primeira derivada (b) e segunda derivada (c), bem como as curvas dos espectros originais (a).

A aplicação de derivadas nos espectros de reflectância tem como função principal salientar feições de absorção e espalhamento pouco evidentes nos espectros de reflectância, que podem corresponder a baixas concentrações de substâncias opticamente ativas. Reportando-se novamente à Figura 3 (a), verifica-se que os maiores picos de absorção ou de reflexão das curvas originais, equivalem aos pontos de cruzamento no eixo das abscissas da curva de primeira derivada (Figura 3 (b)). Já as feições observadas na curva de primeira derivada representam regiões espectrais de maior inclinação da curva de reflectância original. De maneira análoga, os picos de absorção e de reflexão observados na curva de primeira derivada são referentes aos pontos de cruzamento das abscissas no eixo da curva de segunda derivada e as feições da curva de segunda derivada representam regiões espectrais de maior inclinação da curva de primeira derivada. Para curvas de segunda derivada, os resultados garantem um realce das feições características das curvas de primeira derivada (BRAGA, 1998).

Segundo Goodin et al. (1993) essas características permitem a eliminação progressiva, a cada derivação, do efeito de cada uma das substâncias com comportamento óptico ativo presentes na água, onde os efeitos de alguns componentes da água podem ser removidos pela primeira derivada e efeitos de sólidos em suspensão pela segunda, deixando uma curva que consiste somente de feições associadas à clorofila.

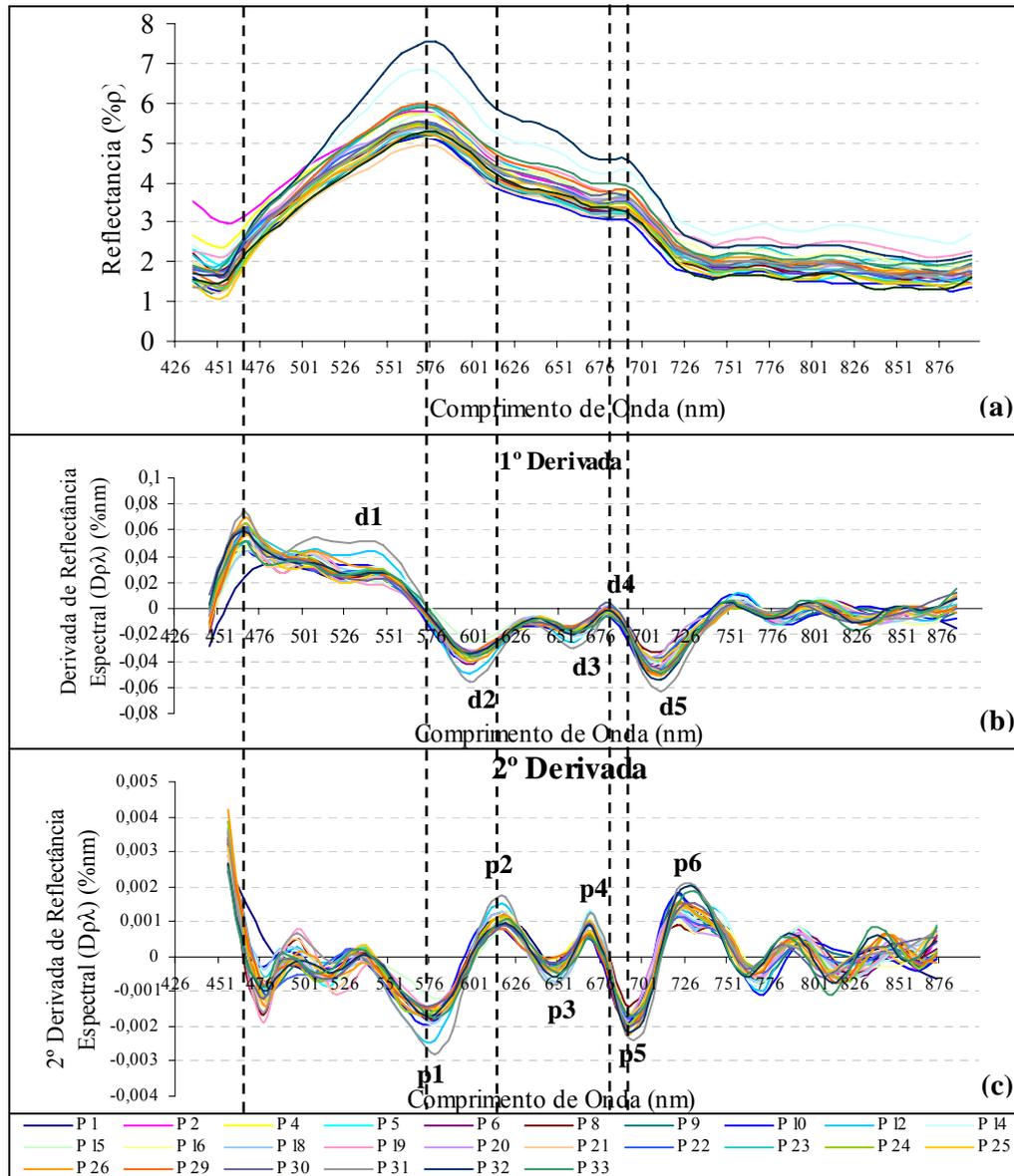


Figura 3 – Espectros originais da água (a); curvas resultantes da aplicação da primeira derivada (b); curvas resultantes da aplicação da segunda derivada (c)

Nas curvas de primeira derivada (Figura 3 (b)), observa-se um ponto de cruzamento no eixo das abscissas em aproximadamente 569 nm, no intervalo de *d1* (520 nm) a *d2* (600nm), correspondente ao pico de maior valor de reflectância no espectro original na região do verde. Mesmo os picos de reflexão de menores proporções que ocorrem na curva original em 660 nm a 690 nm, definem um ponto de cruzamento no eixo das abscissas, na região de *d3* (654 nm) a *d4* (671 nm) que caracteriza o declive acentuado pela absorção mínima no vermelho no espectro original.

Segundo Goodin et al. (1993), o pico definido em *d4* na curva de primeira derivada indica a região em que a clorofila apresenta melhor distinção entre os outros componentes opticamente ativos. Já a feição de absorção representada em *d5*, ocorre tanto na presença de clorofila, quanto na presença de sólidos em suspensão, sendo essa

feição considerada menos efetiva para discriminar os efeitos ocasionados por esses dois componentes. Nos dados desse autor, verificou-se que os picos definidos em *d4* são melhor definidos que aqueles obtidos neste trabalho.

Ainda na curva de primeira derivada, é possível visualizar pontos de inflexão em 630 e 751 nm que correspondem aos comprimentos de onda nos quais se identificaram feições de absorção nos espectros de reflectância originais. Nota-se que esse comportamento também ocorre, porém de modo mais sutil para a feição de absorção em 800 nm.

Nas curvas de segunda derivada representadas na Figura 3 (c) que, segundo Goodin et al. (1993), mantêm realçadas somente feições que manifestam a presença de clorofila na água, verificam-se feições expressivas nas regiões denominadas *p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5*. Comparando a

curva de segunda derivada com o espectro de reflectância original, pode-se dizer que:

- *p1* realçou o pico de reflectância máxima na região do verde da curva original;
- *p2* mostra uma suave feição de absorção da curva original com centro em 615 nm;
- *p3* indica um aumento sutil de reflectância curva original em 640 nm;
- *p4* mostra a feição de absorção causada pela absorção no vermelho na curva original em 671 nm;
- *p5* destacou o pico de reflectância no infravermelho próximo;
- *p6* realçou a feição de absorção com maior profundidade em 721 nm.

Com base nos estudos de Goodin et al. (1993), que indicam, que a segunda derivada realça feições que manifestam a presença de clorofila na água, percebe-se que as regiões indicadas por *p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5* apresentam fortes relações com as curvas de reflectância original, a qual possui comportamento aparentemente associado à presença de clorofila *a*.

### 3.1 Análise de correlação

Os componentes opticamente ativos considerados neste estudo (pigmentos totais e sólidos em suspensos) tiveram sua correlação avaliada com os espectros resultantes da aplicação de análise derivativa. A Figura 5 apresenta os correlogramas entre primeira e segunda derivada da reflectância com pigmentos totais.

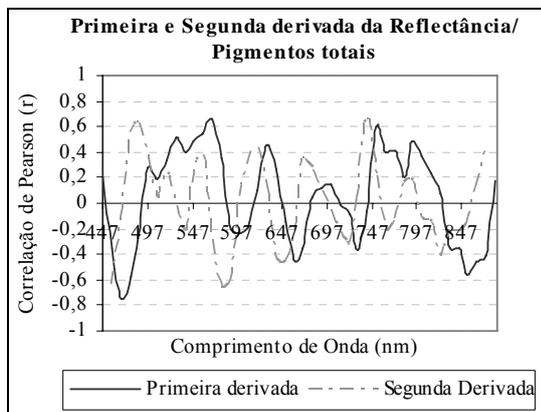


Figura 5 – Correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada com pigmentos totais

No correlograma de primeira derivada (Figura 33), verificam-se maiores valores de correlação nos primeiros comprimentos de onda, principalmente em 467 nm (-0,7), onde é possível visualizar um ponto de alta correlação negativa. Posteriormente, o correlograma de primeira derivada mostra um ponto de alta correlação positiva em 569 nm, com valor de 0,65. Sabe-se que nessas regiões, a presença de clorofila *a* na água provoca picos de absorção e reflectância, que é claramente visualizado nas curvas

espectrais originais obtidas na imagem Hyperion (Figura 3 (a)).

Outro pico de correlação acentuado observado no correlograma de primeira derivada ocorre em 752 nm com valores maiores que 0,6. Na curva de reflectância (Figura 3 (a)), verifica-se que essa região espectral mostra uma feição de absorção na transição da luz vermelha para o infravermelho.

O correlograma entre a curva de segunda derivada e pigmentos totais, também representado na Figura 5, mostra alta correlação (0,65) para a feição de absorção formada na curva original entre 436 a 487. Posteriormente, valores elevados de correlação (-0,66) foram observados em 579 nm, onde a curva de segunda derivada possui uma feição denominada *p1* (Figura 30 (c)), associada ao pico de reflectância máxima do verde.

A Figura 6 apresenta os correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada e a concentração sólidos em suspensão.

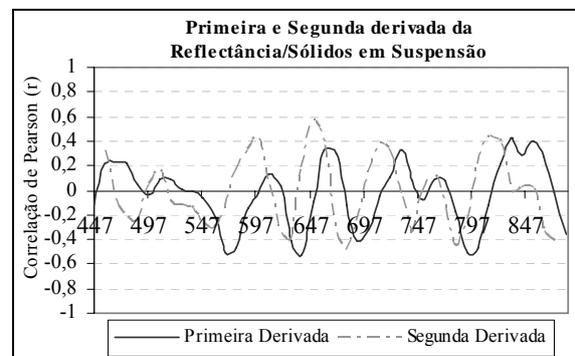


Figura 6 – Correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada com sólidos em suspensão

Visualizando a Figura 6 é possível verificar, que os coeficientes de correlação obtidos para a maioria dos comprimentos de onda são pouco significativos, ocorrendo várias oscilações nas curvas. A maioria dos picos positivos e negativos observados na primeira derivada resultou em coeficientes de correlação próximos a  $\pm 0,4$ . Observou-se um pico de correlação mais significativo (0,56) em 650 nm no correlograma de segunda derivada. Poder-se-ia supor que esse pico de correlação estivesse relacionado com uma pequena feição de reflexão que ocorre na curva original e que também apresenta alterações com a variação de sólidos em suspensão na água (JENSEN, 2000; GOODIN et al., 1993; BREUNIG et al., 2007b), mas o trabalho de Goodin et al. (1993) demonstrou que o efeito de sólidos em suspensão é eliminado dos espectros de água a partir da curva de segunda derivada.

Comparando os correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada com pigmentos totais e sólidos em suspensão, percebe-se que os valores de correlação obtidos entre as curvas de primeira e segunda derivada com pigmentos totais foram maiores que os obtidos com sedimentos em suspensão, sustentando a hipótese que o reservatório de Itaparanga apresenta

resposta espectral influenciada predominantemente por pigmentos totais

#### 4 CONCLUSÕES

A análise visual prévia das curvas espectrais obtidas para o reservatório e sua comparação com curvas espectrais explicativas da presença de componentes opticamente ativos na água mostradas na literatura (RUNDQUIST, 1996; KIRK, 1994; HAN et al.; 1994), sugeriu que a água do reservatório de Itapararanga tem presença de clorofila *a* e permitiu inferir que, a radiação ao atravessar a camada superior do corpo d'água, é absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton. Essa afirmativa foi confirmada posteriormente pelas análises de correlação que mostraram que a variável pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*) foi a que apresentou maior correlação.

A análise derivativa mostrou-se eficiente para realçar feições espectrais, tanto na primeira derivada, quanto na segunda derivada. Observou-se que a curva resultante da aplicação da primeira derivada, salientou feições das curvas espectrais originais que não eram muito evidentes. Como a curva de segunda derivada, definiu feições de absorção e reflexão nos mesmos pontos em que ocorrem feições nas curvas originais, as análises foram mais diretas nesse caso, principalmente pelo fato de Goddin et al. (1993) terem comprovado que as feições representadas no cálculo da segunda derivada realçam feições ocasionadas pela presença de clorofila.

Analisando os correlogramas resultantes da aplicação da técnica de análise derivativa com pigmentos totais, verifica-se que a feição de absorção centrada em 457 nm e o pico de reflectância localizado em 579 nm indicaram maiores valores de correlação. Na literatura, além dessas feições, normalmente outras feições também apresentam altas correlações com clorofila. As possíveis explicações para os dados deste trabalho não oferecerem correlações significativas em outras regiões observadas na literatura foram as baixas concentrações das variáveis limnológicas, a pequena quantidade de elementos amostrais, principalmente para variável pigmentos totais, e a pequena variabilidade nos valores de concentrações

#### AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa sob a forma de uma bolsa de estudo. Aos pesquisadores da FCA (Faculdade de Ciências Agrárias) - Unesp de Botucatu, engenheiros agrônomos Dr. Eduardo Negrisoni e Dr. Marcelo Rocha Corrêa que realizaram a coleta limnológica nos elementos amostrais definidos no reservatório de Itapararanga.

#### REFERÊNCIAS

- BREUNIG, F. M. et al. (a) Aplicação da técnica de remoção do contínuo para a discriminação espectral de diferentes dosagens de Nitrogênio aplicadas ao trigo (*Triticum aestivum*, L- IAC-370). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 91-98.
- CHEN, Z. et al. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing Environment.**, St. Paul, v. 40, p. 46-59, 1992.
- GITELSON, A., 1992. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration, **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3367-3373. nov. 1992.
- HAN, L. et al. The Spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**. Abingdon, v. 15, n. 18, p. 3707-3718. 1994.
- HAN, T.; GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; LOVE, J. Detection and correction of abnormal pixels in Hyperion images. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. Toronto, Canada. **Proceedings...** IEEE International, 2002. p. 1327-1330.
- GOODIN, D. G. et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Manhattan, v. 59, n. 4, p. 505-510, abr. 1993.
- GOODENOUGH, D. G. et al.. Processing Hyperion and ALI for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1321-1331, 2003.
- KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**, London, Cambridge University Press, 1994, v. 2, p. 507.
- KRUSE, F. A. Preliminary results - hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 12., 2003, Pasadena, USA. **Proceedings**. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. p. 157-173. 2003.
- RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/eo-1 e de espectrorradiômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

RUNDQUIST D. C. et al. Remote measurement of Algal Chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, Lincoln, v. 62, n. 2, p. 195-200, fev. 1996.

TSAI F., PHILPOT W. Derivative Analyses of Hyperspectral Data. **Remote sensing Environment**, St. Paul, v. 66, p. 41-51, 1998.