

APLICAÇÃO DE ANÁLISE DERIVATIVA AO ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA ÁGUA EM UMA REGIÃO DO RIO PARANÁ

*Thiago Statella*¹

*Germán Torrijos Cadena*²

RESUMO: Este trabalho estimou o fator de refletância da água em alguns pontos do rio Paraná em conjunto com outras medidas de campo para obter a caracterização aproximada da composição do corpo d'água naquela região. O fator de refletância foi medido com um espectro-radiômetro e as curvas geradas passaram por uma análise derivativa. Os dados coletados demonstraram que as respostas espectrais provenientes do rio Paraná apresentam baixos valores de fator de refletância. A análise dos dados mostrou que a concentração de sedimentos é mais significativa nos pontos estudados que a concentração de clorofila.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto, qualidade da água, análise derivativa, comportamento espectral.

ABSTRACT: This paper derived of a study which estimated the water reflectance factor of a few points in the Parana River along with other field measurements in order to obtain the approximated characterization of the water body composition in the region. The reflectance factor was measured with a spectro - radiometer and a derivative analysis was applied to the reflectance curves. The data gathered showed low values for the spectral responses in the Paraná River. Derivative analyses revealed that sediment concentration on the studied area is more significant than chlorophyll concentration.

KEYWORDS: Remote Sensing, water quality, derivative analysis, spectral response.

1 Mestre em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista; professor do Depto de Construção Civil do IFMT – Campus Cuiabá. E-mail: thiago.statella@cba.ifmt.edu.br.

2 Engenheiro Cadastral e Geodésico, pela Universidade Distrital Francisco José de Caldas; professor titular da Faculdade do Meio Ambiente e Recursos Naturais da Universidade Distrital Francisco José de Caldas, em Bogotá-Colômbia. E-mail: germanatorrijos@gmail.com.

INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto (SR) tem sido amplamente utilizado para detectar e quantificar parâmetros de qualidade da água em corpos d'água naturais e reservatórios. Sensores com ampla variedade de resoluções espectral, espacial e temporal têm sido utilizados para avaliar poluentes químicos, sólidos suspensos e quantidade de clorofila.

Como salientam Goodin et al. (1993), um dos principais problemas em SR de sólidos suspensos (incluindo sólidos orgânicos), é separar os efeitos da turbidez causada por sedimentos em suspensão dos efeitos causados pela clorofila das algas. Isto é especialmente importante em lagos e reservatórios, pois o nível de clorofila é indicador de estado trófico e indicador indireto de poluição por fertilizantes, pesticidas e herbicidas.

Sensores multiespectrais que obtêm imagens em baixa resolução espectral não ajudam a resolver esse problema. Como exemplo, o sistema Landsat coleta dados em amplas bandas espectrais, não conseguindo detectar grande parte das estruturas espectrais mais sutis associadas com sólidos suspensos na água.

Porém, mesmo quando dados com alta resolução espectral estão disponíveis, fazer a distinção entre a turbidez causada por sedimentos suspensos e por clorofila é uma tarefa difícil. Ao analisar o comportamento espectral da água, Quibel (1991) sugeriu que as feições espectrais formadas pelo aumento da reflectância em 710nm e sua diminuição em 660nm, causadas pela presença de algas, permanecem razoavelmente constantes em face da variação de sedimentos suspensos e podem, portanto, ser usadas para inferir o conteúdo de clorofila na água. Demetriades-Shah, Steven e Clark (1990) propuseram a utilização de análise derivativa do espectro da água para separar os efeitos dos sedimentos e da clorofila.

O trabalho apresentado aqui pretende fazer uso da análise derivativa para examinar o conteúdo de clorofila e sedimentos suspensos em alguns pontos do rio Paraná em seu trecho que separa as cidades de Presidente Epitácio-SP e Bataguassu-MS. Os dados são provenientes de uma campanha para medição do comportamento espectral de nove pontos sobre o leito do rio Paraná, além de informações sobre temperatura, pH e turbidez da água.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

RADIOMETRIA

Radiometria é a medida quantitativa da intensidade de qualquer tipo conhecido de radiação, como, por exemplo, a radiação eletromagnética (REM), emitida pelo sol ou por uma fonte artificial, como uma lâmpada. A REM, por ter a propriedade de se propagar no espaço vazio ou vácuo, é a que se presta para fins de SR, pois o sensor que detecta esse tipo de radiação, seja ele uma câmera fotográfica ou um imageador multiespectral, nunca estará em contato físico direto com o objeto (MENESES, 2001).

A REM pode ser classificada de acordo com seu comprimento de onda. A essa representação dá-se o nome de espectro eletromagnético.

Quando a REM atinge um alvo, ela pode ser transmitida, absorvida ou refletida pelo alvo. Em sensoriamento remoto o que se mede é a parcela refletida. No caso de sensores orbitais, a grandeza radiométrica medida é a radiância. Ao se dispor de instrumentos conhecidos como espectro-radiômetros, é possível se medir o fator de reflectância dos alvos. A esta atividade dá-se o nome de espectro-radiometria de reflectância, realizada em experimentos de laboratório ou de campo. De acordo com Meneses (2001), a espectro-radiometria é definida como a medida de distribuição da energia radiante proveniente de um objeto. De acordo com Novo (2008), a reflectância pode ser definida da seguinte maneira:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}, \quad (1)$$

em que:

ϕ_r = fluxo radiante refletido; e

ϕ_i = fluxo radiante incidente.

Como a energia incidente e a refletida têm a mesma unidade de medida (watts/cm²λ), a medida de reflectância pode ser expressa graficamente em porcentagem na forma de curvas denominadas de espectros de reflectância.

MEDIDAS ESPECTRO-RADIOMÉTRICAS

De acordo com a equação 1, a reflectância é obtida pela razão espectral (isto é, por comprimento de onda) entre a radiância refletida da superfície do alvo e a irradiância incidente sobre esta superfície. Para se medir a radiação incidente, tanto em laboratório quanto em campo usa-se uma placa de referência padrão com reflectância conhecida (placa refletora revestida com óxido de magnésio ou sulfato de bário). Ao se fazerem as medidas, o sensor, a fonte e o alvo estão dispostos em certa configuração e as posições relativas entre eles poderão favorecer ou não as medidas. Neste caso, o termo Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) deve ser usado (MENESES, 2001). O FRB pode ser calculado como segue:

$$FRB = \frac{dL_a}{dL_p} k, \quad (2)$$

em que:

dL_a = radiância do alvo;

dL_p = radiância da placa; e

K = fator de correção da placa.

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA

Segundo Meneses (2001), geralmente, de posse de uma imagem colorida, quer-se saber por que este ou aquele alvo apresenta determinada cor. Ou seja, procura-se saber o que causa aquela cor para se descobrir as propriedades do alvo. A interpretação do significado da variação das cores da água em imagens de satélite é ainda mais complexa do que sua interpretação para os demais alvos. Há pelo menos cinco razões para isso:

1. A região de maior penetração de luz na água (400 a 500 nm) e de maior interação entre a REM e os componentes da coluna

d'água é profundamente afetada pela atmosfera. Cerca de 90% da energia detectada sobre um corpo d'água por um sensor orbital pode ser atribuída à interferência atmosférica;

- 2** A transmitância da água é muito alta e variável, o que faz com que a energia emergente do volume d'água integre informações relativas a diferentes profundidades para um mesmo corpo d'água;
- 3** Os componentes opticamente ativos da água apresentam espectros de absorção semelhantes, o que muitas vezes torna difícil sua discriminação quando ocorrem simultaneamente no ambiente;
- 4** A reflectância da água é muito pequena, em torno de 4%, o que faz com que os sensores disponíveis sejam muitas vezes insensíveis às mudanças de cores;
- 5** A reflectância da superfície da água é mais elevada que a do volume e afetada por fatores como vento e a geometria de aquisição.

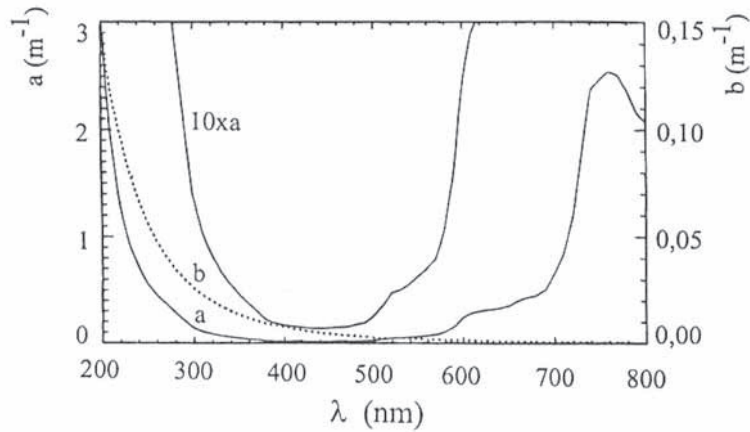
Na água, são dois os fatores que influenciam o seu comportamento espectral: a absorção e o espalhamento. Assim, o fluxo de energia detectado por um sensor remoto é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento da água e inversamente proporcional ao seu coeficiente de absorção (MENESES, 2001).

Os componentes que afetam o comportamento espectral da água podem ser classificados em três amplas categorias:

- a)** Organismos vivos (fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton);
- b)** Partículas em suspensão; e
- c)** Substâncias orgânicas dissolvidas.

A variação espectral dos coeficientes de absorção e espalhamento da água pura é mostrada na Figura 1. Nesta, pode-se perceber que a água apresenta uma absorção muito baixa nas regiões espectrais do azul e do verde (400 a 600 nm, aproximadamente) e que esta absorção aumenta acentuadamente do vermelho ao infravermelho próximo. Já o espalhamento é maior para o comprimento de onda do azul, decaindo exponencialmente em direção ao vermelho. Assim, um corpo d'água puro em uma composição colorida natural tenderá a aparecer na cor azul.

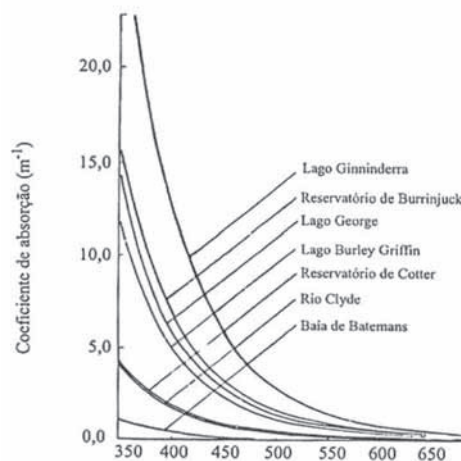
Figura 1. Absorção e Espalhamento na Água Pura.



Fonte: MOBLEY, 1994, p. 89.

Como discutido anteriormente, a resposta da água varia de acordo com a absorção e espalhamento. Matéria orgânica dissolvida altera as características de absorção da água pura e, portanto, sua resposta espectral. A Figura 2 mostra o coeficiente de absorção da água com diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida.

Figura 2 Diferentes Concentrações de Matéria Orgânica Dissolvidas na Água.

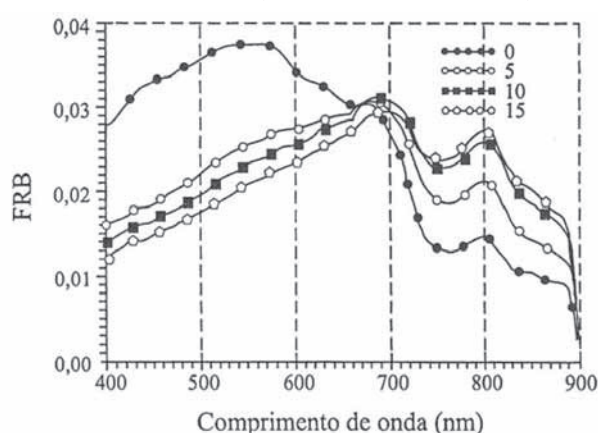


Fonte: KIRK, 1994, p. 60.

Na Figura 2, são mostradas curvas de resposta para diferentes sistemas aquáticos, com distintas concentrações de matéria orgânica. As curvas com maior absorção referem-se a sistemas com mais matéria orgânica.

Para enfatizar isso, a Figura 3 mostra o comportamento do FRB quando se varia a concentração de matéria orgânica na água.

Figura 3. Influência da Matéria Orgânica Dissolvida na Água em seu FRB.

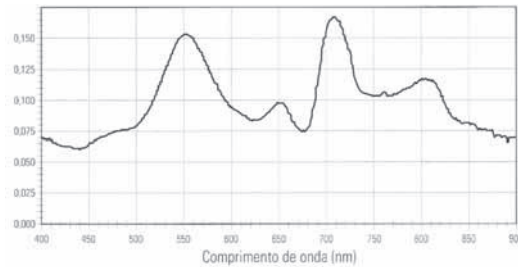


Fonte: MANTOVANI, 1993, p. 240.

Analisando-se a Figura 3, percebe-se que com o aumento da matéria orgânica na água há uma redução sistemática do FRB na região do azul. Quando as concentrações ficam muito altas, há um aumento da resposta da água no infravermelho próximo. É possível concluir que em uma composição colorida natural usando as bandas do azul, verde e vermelho, a água com matéria orgânica primeiramente se apresentará em tons amarelados. Se a concentração de matéria orgânica dissolvida aumentar, sua cor tenderá ao vermelho. Segundo Meneses (2001), se a concentração for muito grande, como no caso do Rio Negro, a absorção suplantará o espalhamento e a água adquirirá uma aparência negra quando em grande volume.

A Figura 4 mostra o efeito da presença de fitoplâncton na água. A maior ou menor biomassa fitoplanctônica na água pode ser indicada pela concentração de clorofila, que é o pigmento mais comum nos diferentes gêneros presentes na coluna d'água.

Figura 4. Influência do Conteúdo de Clorofila na Reflectância da Água.

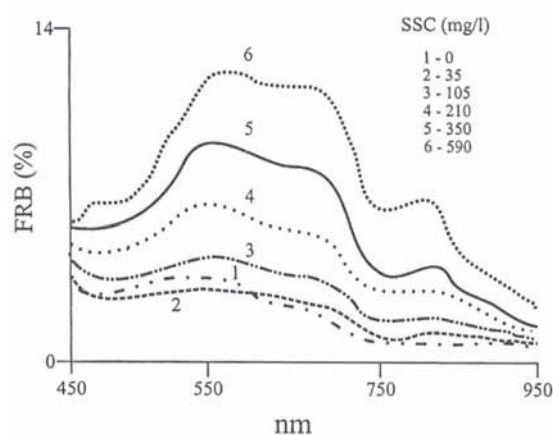


Fonte: NOVO, 2008, p. 239.

O aumento da biomassa fitoplanctônica provoca um aumento da reflectância em todos os comprimentos de onda, mas principalmente na região do infravermelho próximo, onde o espalhamento celular supera o efeito de absorção pela água (NOVO, 2008). Ainda, da análise da Figura 4, percebe-se que a concentração de clorofila aumenta a resposta espectral na região do verde e mostra um pico de reflectância na região de transição entre o vermelho e infravermelho (720 nm), bastante característico da presença de clorofila.

Outro fator de bastante influência no comportamento da água é a concentração de partículas inorgânicas. Quanto maior for esta, maior será o coeficiente de espalhamento, e maior a reflectância. A Figura 5 exibe esse comportamento.

Figura 5. Influência do Conteúdo de Clorofila na Água.

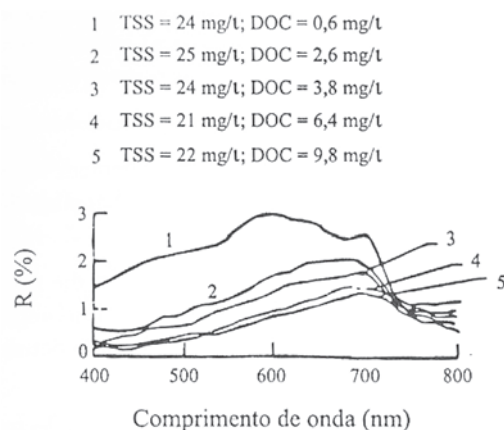


Fonte: CHEN et al., 1991, p. 218

A Figura 5 também mostra que as maiores respostas se dão nas faixas do verde e vermelho, dando aspecto amarelado às composições coloridas das bandas do azul, verde e vermelho.

Um panorama mais complexo é quando se tem combinações de substâncias na água: sedimentos suspensos, matéria orgânica e clorofila, por exemplo. Witte et al. (1982) investigaram o efeito do aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida (DOC) sobre o comportamento espectral de sólidos em suspensão (TSS). As curvas de reflectância são mostradas na Figura 6.

Figura 6. Influência do Conteúdo de Matéria Orgânica Dissolvida sobre Sedimentos Suspensos.



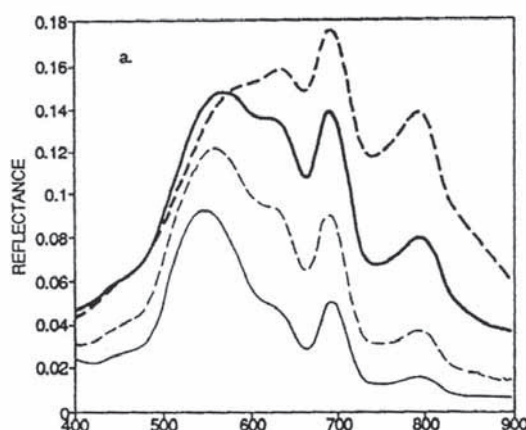
Fonte: WITTE et al., 1982, p. 122.

Pela Figura 6, percebe-se que, ao se manter a concentração de sólidos aproximadamente constante e ao se aumentar a concentração de matéria orgânica dissolvida, há uma diminuição da reflectância em toda região do visível. Observa-se, entretanto, que numa estreita região entorno de 740nm, a reflectância espectral parece ser independente da presença de DOC. Esse comportamento sugere que essa região teria grande potencial para se estimar as concentrações de sólidos em suspensão na presença de quantidades variáveis de DOC (MENESES, 2001).

ANÁLISE DERIVATIVA

Segundo Goodin et al. (1993), a reflectância espectral de um volume de água turva em um lago ou reservatório pode ser conceituada como um sinal composto da soma ponderada das três componentes: água, sedimentos suspensos e clorofila. Cada componente pode ser representado por um polinômio de ordem N . Se N varia para cada componente, então sucessivas diferenciações da curva original devem eliminar os efeitos de ordem inferior. A Figura 7 exibe curvas de reflectância para a água com clorofila e sedimentos suspensos. A concentração de clorofila permaneceu aproximadamente constante enquanto a quantidade de sedimentos variou.

Figura 7. Influência do Conteúdo de Sedimentos sobre Clorofila na Água.



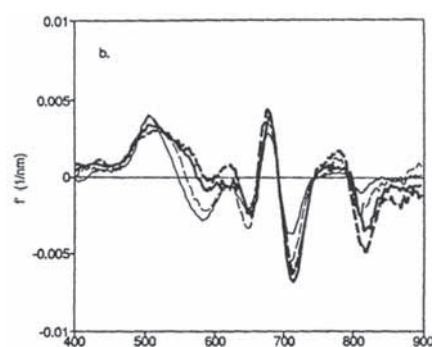
Fonte: GOODIN et al., 1993, p. 509.

Na Figura 7, as curvas com maior quantidade de sedimentos são aquelas de maior reflectância. Percebe-se que o pico, geralmente bem definido, de reflectância da clorofila em 550 nm foi mascarado pelo aumento na concentração de sedimentos suspensos. Porém, em 660 nm, aproximadamente, a absorção permaneceu praticamente inalterada. Nas Figuras 8 e 9 são mostradas a primeira e segunda derivadas das curvas, respectivamente.

A primeira derivada apresentou um crescimento sistemático com o aumento da concentração de sedimento em aproximadamente 720 nm, enquanto que a segunda derivada permaneceu essencialmente constante para todas as concentrações. Assim, Goodin et al. (1993) alegam que a segunda derivada na região de 720 nm responde especificamente para concentração de clorofila.

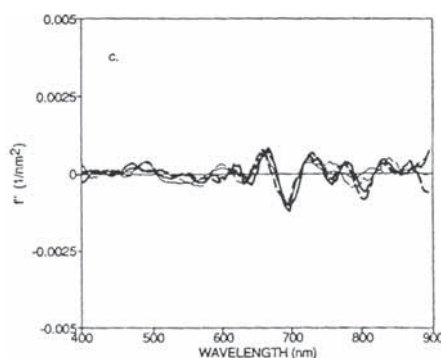
Isso apoia a suposição de que derivadas de segunda ordem podem ser usadas para filtrar os efeitos de sedimentos suspensos das respostas espectrais compostas. E mais, a segunda derivada pode ser utilizada como um índice de concentração de clorofila na água.

Figura 8. Primeira Derivada das Curvas de Reflectância Exibidas na Figura 7.



Fonte: GOODIN et al., 1993, p. 509.

Figura 9. Segunda Derivada das Curvas de Reflectância Exibidas na Figura 7.

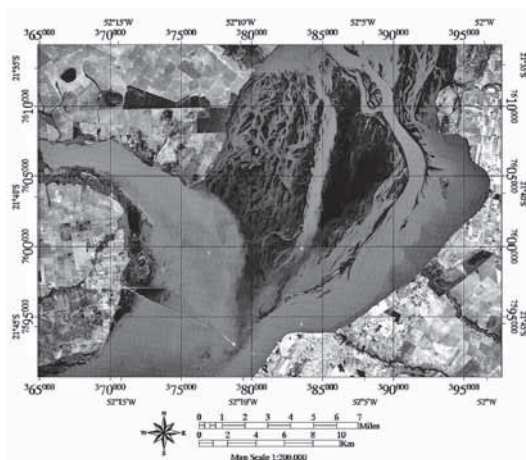


Fonte: GOODIN et al., 1993, p. 509.

RESULTADOS

As atividades de campo ocorreram no dia 16/07/09 no trecho do rio Paraná que separa as cidades de Presidente Epitácio-SP e Bataguassu-MS. A área de estudo é mostrada na Figura 10.

Figura 10. Área de Estudo.



Foram utilizados um barco a motor, equipamentos para medição de temperatura, Ph e turbidez da água, um GPS de navegação e um espectro-radiômetro FieldSpec Handheld para coleta de informações em nove pontos do rio.

As medidas de Ph, temperatura, O₂ dissolvido, condutividade e turbidez realizadas são mostradas na Tabela 1. Além destas, foram feitas também medidas de fator de reflectância e radiância nos pontos.

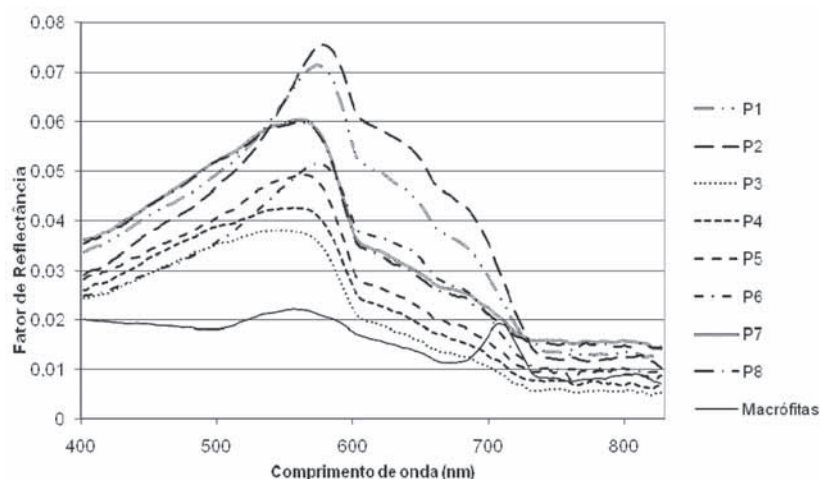
Tabela 1. Medidas de Temperatura, Turbidez, Ph e O₂ Realizadas em Campo.

Pto.	Lat.	Long.	pH	T. C°	O ₂	Turb.
1	21°44' 57"	52°10' 59'	7,6	21,0	9,1	12,6
2	21°42' 45"	52°11' 40'	7,66	21,5	9,5	16,7
3	21°43' 05"	52°09' 25"	8,76	21,7	8,8	1,47
4	21°42' 58"	52°07' 30"	7,93	21,9	8,5	5,9

5	21°43' 24"	52°06' 34"	8,03	22,1	8,6	7,82
6	21°45' 22"	52°06' 09"	7,86	22,9	8,9	9,43
7	21°45' 43"	52°05' 48"	7,81	22,9	7,5	10,6
8	21°45' 05"	52°07' 38"	7,58	22,4	8,9	8,42
9	21°45' 38"	52°08' 57"	7,47	22,4	8,5	8,08

Os dados brutos de fator de reflectância foram processados no *software* Excel. Como pré-processamento, foram aplicados filtros de média aos dados para sua suavização. Foram aplicados filtros com máscaras de tamanho 3, 5 e 7. Optou-se pela adoção do resultado da suavização com a máscara de tamanho 7. Em seguida, foram calculadas a primeira e segunda derivada dos dados. O resultado da suavização das curvas é mostrado na Figura 11. O espectro-radiômetro FieldSpec capta informação do espectro num intervalo de 325 a 1075 nm. Uma vez que a informação mais significativa sobre a água está contida no intervalo de 400 a 900 nm aproximadamente, este foi o intervalo utilizado para os processamentos, conforme se observa pela Figura 11. A resolução espectral do aparelho é de 3 nm.

Figura 11. Curvas de Fator de Reflectância Suavizadas com Máscara de Tamanho 7.



As Figuras 12 e 13 mostram os resultados da primeira e segunda derivada das curvas de reflectância.

Figura 12 Primeira Derivada das Curvas de Fator de Reflectância.

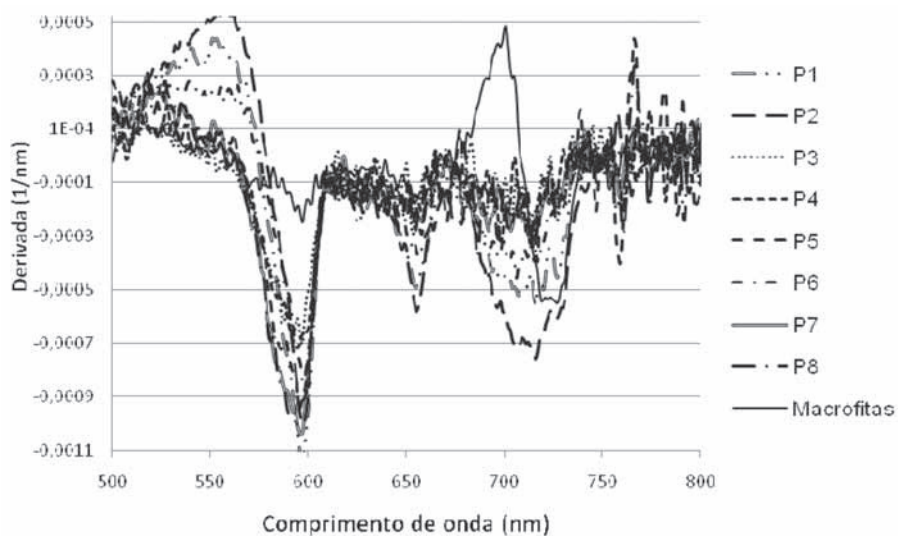
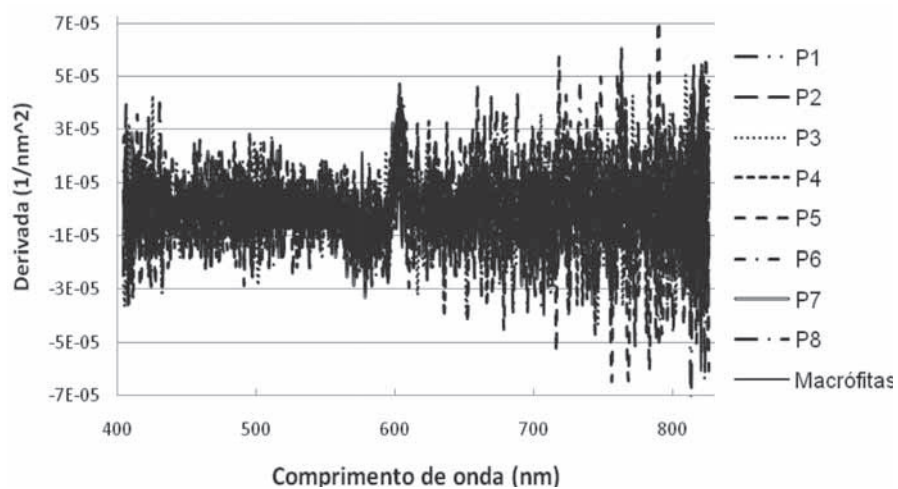
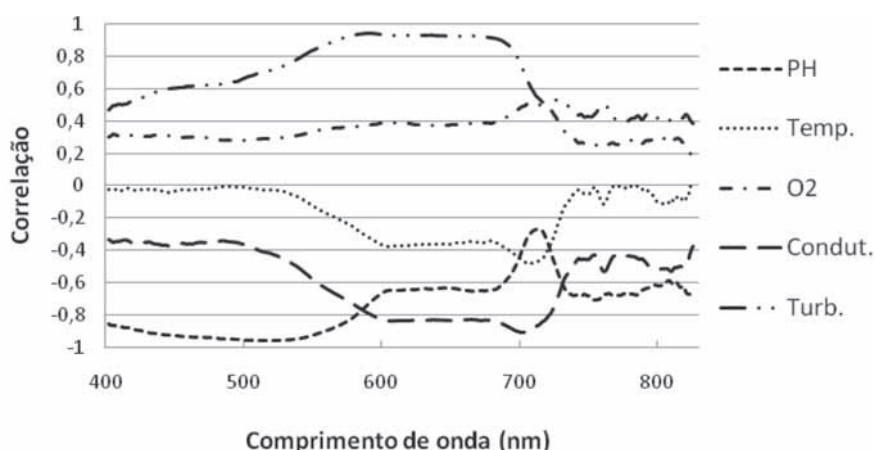


Figura 13 Segunda Derivada das Curvas de Fator de Reflectância.



Por fim, foi realizado o cálculo da correlação entre os fatores de reflectância e demais parâmetros medidos em campo. Este resultado é mostrado na Figura 14.

Figura 14 Correlação entre os Fatores de Reflectância e Demais Parâmetros Medidos em Campo.



CONCLUSÕES

Da observação da Figura 11 percebe-se que, de uma maneira geral, à exceção do ponto 9 (onde foram tomadas medidas diretamente sobre macrófitas), as curvas de reflectância possuem forma semelhante. As respostas mais baixas foram obtidas nos comprimentos de onda do azul e do infravermelho próximo. Para os pontos P1 a P8, percebeu-se, como esperado, um aumento na reflectância das faixas do verde e vermelho, conforme o aumento da turbidez da água (ver Tabela 1). A curva do ponto 9, em que as medições foram feitas diretamente sobre macrófitas, apresentou os valores mais baixos de reflectância. A máxima reflectância ficou em torno de 0,02. Também é possível perceber um pico de reflectância característico de corpos d'água com clorofila em torno de 720nm e dois picos suaves de absorção nas regiões do azul e vermelho, causados principalmente por clorofila.

De acordo com a discussão feita na fundamentação teórica, a análise derivativa deveria acusar a presença de clorofila na água na segunda derivada. Observando-se a Figura 13 não é possível encontrar um comportamento característico das curvas, isto é, com valores de mínimo variando de acordo com a concentração de clorofila em 720 nm. Esse é um forte indicador de que as concentrações de clorofila nos pontos estudados é muito baixa.

Da Figura 12, percebe-se que as curvas, de maneira geral, produzem valores de máximo e mínimo para as derivadas nos comprimentos de onda aproximados de 550 e 600 nm, respectivamente, e estão fortemente correlacionadas com a turbidez (Figura 14). A exceção é a curva para o ponto com macrófita, que exibe valores de máximo e mínimo na região de 700 nm. Esse comportamento acontece por causa do pico de reflectância da clorofila em torno de 720 nm.

A análise dos dados mostrou que a concentração de sedimentos no rio Paraná, na região estudada, e para a data de coleta dos dados, é mais significativa que a concentração de clorofila, com exceção do ponto com infestação de macrófitas. Para um perfil mais detalhado e preciso da composição da água naquele trecho, mais medidas ao longo de um período maior deverão ser coletadas e os mesmos processamentos realizados.

REFERÊNCIAS

- CHEN, Z.; HANSOM, J. D.; CURRAN, P. J. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus 1268 data. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, Inglaterra, v. 12, n. 1, p. 215 – 222, 1991.
- DEMETRIADES-SHAH, T. H.; STEVEN, M. D.; CLARK, J. A. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, [s.l.]-EUA, v. 33, n. 1, p. 55-64, 1990.
- GOODIN, D. G. et al. Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, Bethesda-EUA, v. 59, n. 4, p. 505-510, 1993.

KIRK, J. T. O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems* New York: Cambridge University Press, 1994.

MANTOVANI, J. E. *Comportamento espectral da água*: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria orgânica particulada. São José dos Campos, 1993. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE.

MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. *Sensoriamento Remoto*: reflectância dos alvos naturais. Brasília: Ed. UnB, 2001.

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

MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. São José dos Campos: INPE, 2001.

NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto*: princípios e aplicações. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

QUIBEL, G. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae. *International Journal of Remote Sensing*, London-England, v. 12, n. 1, p. 177-182, 1991.

WITTE, W. G. et al. Influence of dissolved organic material on turbid water optical properties and remote sensing reflectance. *Journal of Geophysical Research*, Washington DC, v. 87, 1982.