

INFERÊNCIA DA TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA - RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA/SP, A PARTIR DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS IKONOS E ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO

Inference of Water Transparency - Itupararanga Reservoir Through IKONOS Multispectral Images and Field Spectroradiometry

Adriana Castreghini de Freitas Pereira^{1,2}
Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo²
Edivaldo Domingues Velini³

¹**Universidade Estadual de Londrina – UEL**
Departamento de Geociências - Centro de Ciências Exatas – CCE
Rodovia Celso Garcia Cid / PR 445 Km 380 – Campus Universitário – Cx.Postal 6001
CEP 86051-980 Londrina, PR, Brasil
adrianacfp@uel.br; adrianaacastreghini@terra.com.br

²**Universidade Estadual Paulista - UNESP**
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Departamento de Cartografia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
mlourdes@fct.unesp.br

³**Universidade Estadual Paulista - UNESP**
Faculdade de Ciências Agrárias – Botucatu/SP
velini@fca.unesp.br

RESUMO

Pesquisas científicas de qualidade das águas utilizam modelos de inferência de componentes da água, a partir de outros observados em campo, permitindo uma maior representatividade espacial da variável, além de redução de custos. Pesquisadores da área ambiental utilizam a Profundidade de Secchi no cálculo indireto do coeficiente vertical de atenuação de luz na água e na avaliação da extensão da zona eufótica, para a classificação de tipos de água para os ecossistemas aquáticos brasileiros. O propósito desta pesquisa foi, então, realizar a inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água do Reservatório de Itupararanga/SP, utilizando uma imagem multiespectral IKONOS, nas bandas 1 (450 – 520 nm); 2 (520 – 600 nm); 3 (630 – 690 nm); e 4 (760 – 900 nm) e dados espectrais obtidos “in situ” com o espectrorradiômetro FieldSpec UV/VNIR (400 – 900 nm), assim como gerar um modelo de inferência da transparência da água, a partir dos dados disponíveis. Após ajustes e processamentos iniciais, os dados foram submetidos a uma análise de correlação, gerando-se o modelo de inferência, o qual, juntamente com as variáveis medidas “in situ” em pontos amostrais específicos, possibilitaram estimar o coeficiente de atenuação vertical de luz na água do reservatório; classificar a água como clara; e estimar a profundidade da zona eufótica, apresentando-se como estreita (entre 5,94 m e 7,96 m). Com isso concluiu-se que o reservatório em questão apresenta pouca concentração de sólidos em suspensão.

Palavras Chaves: Sensoriamento Remoto da Água, Profundidade da Zona Eufótica, Transparência da Água, Inferência Estatística, Reservatório de Itupararanga/SP.

ABSTRACT

Scientific researches focused on the water quality use, in general, empirical models of inference on water components from others observed in field, allowing a better spatial representation of the variable, beyond reduction of costs. Environmental researchers use the Secchi depth in indirect calculation of vertical attenuation coefficient for water irradiance and in the estimation of stretching euphotic zone to classify water types on Brazilian water ecosystems. Then, the main aim of this research was to realize the inference of water euphotic zone and the vertical attenuation coefficient

for water irradiance in Itupararanga Reservoir, using the IKONOS multispectral image, in spectral bands 1 (450-520 nm); 2 (520-600 nm); 3 (630-690 nm) and 4 (760-900 nm) and spectral data collected “in situ” with FieldSpec UV/VNIR (400-900 nm) spectroradiometer, and to generate an inference model of water transparency through available data. After initial data agreement and processing, the whole data was submitted to correlation analysis, generating an inference model which close to variables surveyed “in situ” in a specific points sampled enable to estimate the vertical attenuation coefficient of irradiation water in the reservoir; to classify the reservoir water as clear; and to estimate the euphotic zone depth arose like narrow (between 5,94 m and 7,96 m). So concluded that the reservoir presents not much concentration of suspension solids.

Keywords: Remote Sensing of Water, Euphotic Zone Depth, Water Transparency, Statistical Inference, Itupararanga/SP Reservoir.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas científicas relacionadas com a qualidade das águas utilizam, dentre os métodos estatísticos disponíveis para análises ambientais, as análises de correlação entre as concentrações dos componentes opticamente ativos e informações espectrais de corpos d’água obtidas em laboratório e em levantamentos de campo (Rundquist et al., 1996; Louchard, 2002; Barbosa, 2005; Nobrega, 2002; Rudorff, 2006), enquanto outros autores enfatizam a estimativa de concentrações desses componentes a partir de dados orbitais (Dekker, 1993; Ritchie & Cooper, 1998; Giardino et al., 2001; Ekercin, 2007; Galvão et al., 2003; Novo et al., 2006). Em ambos os casos, a construção de modelos empíricos para estimar alguns dos componentes, a partir de outros observados em campo, permitem uma maior representatividade espacial da variável e reduzem os custos do trabalho de campo, muitas vezes com a redução das análises de laboratório.

A água é uma série infinitamente variável de soluções aquosas de diferentes substâncias ou compostos químicos presentes na superfície do solo terrestre, que, dependendo da natureza e da concentração, pode ser benéfica, aceitável ou imprópria ao emprego que dela se pretende fazer (Branco & Rocha, 1977). O uso/ocupação do solo tem importância fundamental na ocorrência natural da água, sendo que as intervenções humanas, como o desmatamento e a urbanização, são fatores modificadores do ciclo hidrológico, pois diminuem a evapotranspiração, além de outras consequências danosas ao meio ambiente. A qualidade da água, representada por parâmetros que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas (Von Sperling, 1996; Braga, 1998; Di Bernardo, 2002) está intimamente relacionada a contaminação de mananciais, que impedem seu uso para abastecimento humano, agravando ainda mais o problema da escassez desse recurso, tão discutido nos dias atuais.

A transparência do corpo d’água é um dos parâmetros físicos observados na análise de sua qualidade. Este parâmetro pode ser obtido através da leitura da profundidade do disco de Secchi, ou seja, a partir da observação do desaparecimento de um disco branco mergulhado na água. O valor do disco de Secchi tem uma relação direta com a transparência da

água e inversa à quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos no percurso da luz e também ao coeficiente de atenuação da irradiância (Pereira Filho, 2000), ou seja, a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi corresponde àquela profundidade na qual a radiação de 400 – 740 nm (faixa visível) refletida do disco não é mais sensível ao olho humano (Esteves, 1998). A transparência da água, além de ser uma característica física de fácil obtenção em campo, apresenta correlação com a radiação eletromagnética superficial do corpo d’água, que pode ser avaliada, tanto por medidas espectrorradiométricas tomadas “in situ”, quanto pelas imagens multiespectrais tomadas por sensores instalados em plataformas orbitais.

Esteves (1998) considera que, embora a utilização do disco de Secchi seja às vezes criticada, sua simplicidade, custo reduzido, facilidade de transporte e principalmente o número de informações possíveis de serem extraídas a partir de seus valores, justificam sua utilização para análises de ambientes aquáticos. Além da importância em pesquisas científicas, visto que por ser um parâmetro universal, permite comparações. Mesmo considerando que a Profundidade do disco de Secchi não fornece dados sobre a qualidade e quantidade de radiação, autores como Esteves (1998), Kirk (1994) e Bukata (1995) utilizaram essa variável para o cálculo indireto do coeficiente vertical de atenuação de luz na água (Poole & Atkins (1929, segundo Esteves, 1998)), considerado o inverso da profundidade de Secchi. A medição dessa única característica física permitiu inferir o tipo de água de ecossistemas aquáticos; e a extensão da zona eufótica, indicando até que profundidade a radiação penetrante atinge no corpo d’água, de modo a possibilitar o desenvolvimento das comunidades fitoplanctônicas nesse ambiente. Para os cálculos são utilizadas relações matemáticas simples entre essas grandezas.

Estudos com o objetivo de correlacionar a resposta espectral de alvos com a ocorrência de componentes que indiquem a qualidade da água em ambientes aquáticos vem sendo desenvolvidos desde que dados espectrais tornaram-se disponíveis. As imagens multiespectrais do sensor Thematic Mapper - TM/Landsat, foram utilizadas em diversos experimentos para verificar se a resolução espacial dessas imagens permitia estimar a concentração dos componentes individuais da água. Porém verificou-se

que uma das grandes limitações desses dados está na sua resolução espectral inadequada para estudos da água, a qual não permite discriminar componentes opticamente ativos, principalmente quando ocorrem simultaneamente altas concentrações de clorofila e material inorgânico (Novo et al., 1994).

Apesar da tecnologia de sensoriamento remoto ter aplicações reais e potenciais para avaliar recursos aquáticos e monitorar a qualidade da água, limitações nas resoluções espacial e espectral dos sistemas sensores orbitais têm restringido a utilização de imagens de satélite em aplicações diretamente relacionadas com o monitoramento da qualidade da água (Ritchie et al., 2003).

No entanto, com a disponibilidade de imagens orbitais adquiridas por sensores de alta resolução espacial, assim como a crescente utilização de câmaras multiespectrais instaladas em aeronaves a questão da resolução espectral das imagens continua sendo a grande restrição ao seu uso, de modo que a maioria dos estudos sobre qualidade da água, utilizando o sensoriamento remoto, têm se limitado à detecção de particulados em suspensão e da vegetação aquática em grandes reservatórios (Galo et al., 2002, 2004). Hoje, tem-se a possibilidade de integrar dados obtidos por diferentes sistemas sensores e aumentar substancialmente a capacidade de analisar dados e extrair informações relevantes sobre ambientes aquáticos.

Nesse sentido Barbosa (2005) trabalhou com a hipótese de que a variação espaço-temporal de massas de água opticamente distintas presentes na planície de inundação amazônica poderia ser analisada através de imagens ópticas adquiridas em diferentes níveis da água, independentemente do ano de aquisição, uma vez que a circulação da água na planície é comandada pelo chamado “pulso de inundação” do rio Amazonas, que é cíclico. Para isso, integrou informações de diferentes naturezas: sensoriamento remoto, dados espectrorradiométricos e limnológicos adquiridos “in situ”, ao longo de um ciclo hidrológico. Definiu quatro estados relevantes para aplicar a hipótese pesquisada, que foram: períodos de cheia, vazante, água baixa e enchente, característicos das águas dessa região. Barbosa (2005) concluiu que a integração dos dados permitiu a identificação dos processos básicos que controlam a circulação e a qualidade das massas de água na planície ao longo do ciclo hidrológico: os dados limnológicos permitiram caracterizar a dinâmica de composição da água, enquanto os espectrais permitiram observar os efeitos dessa dinâmica na resposta espectral das massas de água; o conjunto de imagens orbitais permitiu delimitar as diferentes massas homogêneas de água que foram posteriormente caracterizadas pelos dados limnológicos e espectrais.

Já Ekercin (2007) correlacionou os parâmetros de qualidade da água: TSS, clorofila *a* e transparência (através da profundidade do disco de Secchi), com imagens multiespectrais de alta resolução

do satélite Ikonos, no mapeamento da qualidade da água de um lago na Turquia, a partir da análise em nove pontos de observação. O autor encontrou uma correlação alta entre os parâmetros medidos e os estimados ($R^2 = 0,97$), e realizou a distribuição espacial dos parâmetros de qualidade da água usando algoritmos de regressão múltipla, fornecendo informações sobre as variações na qualidade da água no lago para os especialistas ambientais.

Considerando o exposto, traçou-se como objetivo principal da pesquisa, a inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água do Reservatório de Ituparanga/SP, utilizando imagens multiespectrais de alta resolução espacial e dados obtidos por espectrorradiometria de campo. Como objetivo específico, pretende-se gerar um modelo de inferência da transparência da água, a partir das imagens multiespectrais e espectrorradiometria de campo, aplicado ao Reservatório de Ituparanga/SP.

2. MATERIAL E MÉTODO

Para o desenvolvimento da pesquisa, uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite IKONOS II (bandas espectrais 1, 2, 3 e 4, correspondentes respectivamente aos intervalos de comprimento de onda entre 450 e 520 nm; 520 e 600 nm; 630 e 690 nm; 760 e 900 nm) foi adquirida simultaneamente à realização de um levantamento de campo, no qual foi medida a Profundidade de Secchi e obtidas as curvas espectrais com espectrorradiômetro FieldSpec@UV/VNIR (Analytical Spectral Devices, Inc.) em pontos amostrais previamente definidos.

As medidas espectrais com o espectrorradiômetro foram feitas com ângulo de visada de 25°, cobrindo uma área de aproximadamente 0,22 m² e o Fator de Reflectância foi calculado medindo-se a radiância espectral de uma placa de referência Spectralon® com reflectância constante de 99% em todos os comprimentos de onda (de 400 à 900 nm), para calibração em laboratório.

A radiância espectral da água em cada ponto foi obtida a partir da média de três integrações, tentando-se manter a mesma geometria de visada para todos os pontos.

Análises de correlação entre os dados coletados “in situ” (Profundidade de Secchi e curvas espectrais) e a imagem multiespectral, foram realizadas. Métodos de regressão linear clássica foram aplicados a fim de gerar modelos de inferência de transparência da água, estimando-se, assim, a distribuição espacial da variável em estudo, para os modelos que consideram os dados da imagem multiespectral. Por fim, foi feita a inferência da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água do Reservatório de Ituparanga/SP, a partir de pontos amostrais obtidos do modelo de inferência gerado e da coleta “in situ”.

A Figura 1 apresenta a área de estudo da pesquisa, que foi o Reservatório de Itupararanga-SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba, por ser um dos maiores mananciais de água potável da região de Sorocaba, abastecendo os municípios de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque, num total de aproximadamente 800.000 habitantes, e considerado de boa qualidade da água, pelos órgãos oficiais.

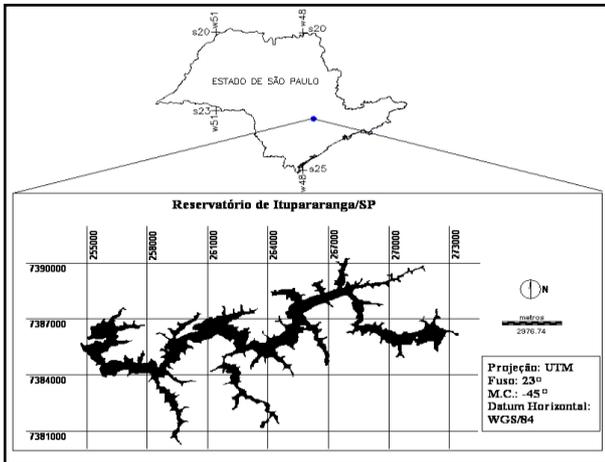


Fig. 1 – Localização do Reservatório de Itupararanga/SP no Estado de São Paulo

2.1 Aspectos Gerais

O planejamento do trabalho de campo é uma das etapas mais importantes na aquisição de dados espectrorradiométricos em corpos d'água, visto que a luz solar incidente e as características da superfície da água controlam o campo de luz submerso e, desse modo, o grau com que as medidas espectrais representam as propriedades ópticas do corpo d'água. Nesse sentido, as condições meteorológicas influenciam diretamente na tomada dos espectros em campo e, portanto, na qualidade das informações espectrais.

A coleta de dados "in situ" baseou-se em um esquema de amostragem pré-definido para distribuição dos elementos amostrais. Tal esquema considerou um número de pontos que permitisse a otimização das coletas e garantisse, ao mesmo tempo, a representatividade espacial dos parâmetros coletados para a análise da qualidade da água. Para tanto, baseou-se na variabilidade espectral do corpo d'água ao longo do tempo e na entrada dos principais afluentes no reservatório (Pereira et al., 2007).

No total foram definidos 72 pontos amostrais espalhados ao longo do Reservatório de Itupararanga/SP, e na entrada de tributários, garantindo uma boa representação das características limnológicas e espectrais a serem levantadas em campo. A Figura 2 mostra o Reservatório de Itupararanga e a posição dos 72 pontos definidos pelo esquema amostral para a coleta de dados "in situ".

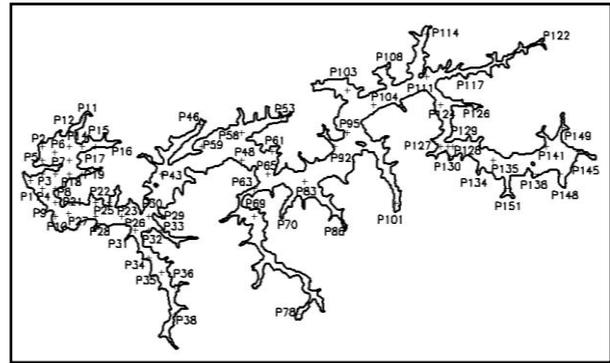


Fig. 2 – Reservatório de Itupararanga/SP e a posição dos 72 pontos definidos pelo esquema amostral para coleta de dados "in situ"

O levantamento de dados "in situ" ocorreu nos dias 07 e 08 de fevereiro de 2007. As condições de iluminação (nebulosidade) e vento (ondas na superfície da água) foram anotadas em planilhas de campo. No primeiro dia de campo foram realizadas medições em 31 elementos amostrais, com presença de sol, nuvens e vento. Já no segundo dia, com ocorrência de chuvas torrenciais e alguns momentos de estiagem com nuvens, foram avaliados apenas quatro elementos amostrais, totalizando 35 pontos amostrais.

Simultaneamente ao levantamento de dados em campo, foi adquirida uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite Ikonos II da área de estudo, correspondente às bandas B1 (faixa espectral de 450 – 520 nm); B2 (faixa espectral de 520 – 600 nm); B3 (faixa espectral de 630 – 690 nm) e B4 (faixa espectral de 760 – 900 nm). Tais imagens podem ser programadas para o período desejado pelo usuário, porém sem a definição específica do(s) dia(s) da tomada. Além disso, devido à necessidade de sincronismo entre a aquisição de diferentes tipos de medidas e tomada da imagem, a definição da melhor data para as coletas pode ser apenas aproximada.

Portanto, planejou-se o levantamento "in situ" e a aquisição da imagem para a semana de 05 a 09 de fevereiro, sendo que a imagem foi tomada pelo satélite Ikonos II em 05 de fevereiro, enquanto o trabalho de campo ocorreu nos dias 07 e 08 de fevereiro, portanto, defasado em 2 e 3 dias da aquisição da cena.

2.2 Dados Espectrais e Profundidade de Secchi coletados "in situ"

Devido à heterogeneidade das condições de tempo nos dois dias de trabalho de campo, houve a necessidade de classificar a amostra segundo as condições meteorológicas, no momento de sua aquisição, em quatro conjuntos, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRAIS SEGUNDO CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NO MOMENTO DA COLETA

| | Conj.1 | Conj.2 | Conj.3 | Conj.4 |
|------------------------|---------------|---|---|--|
| Amostras | 03 | 10 | 12 | 10 |
| Ptos | P30,P32, P36 | P22,P23, P25,P26, P27,P28, P29,P33, P34,P35 | P2,P5,P6, P7,P8,P9, P10,P12, P15,P16, P19,P31 | P1,P3, P14,P17, P18,P21, P104,P111 P117,P129 |
| Céu | Aberto | Aberto | Nublado | Nublado |
| Vento | Fraco | Médio | Fraco | Forte |
| Onda | Pequena | Pequena/média | Pequena | Média/alta |
| Hora | 14:51 à 15:32 | 14:03 à 16:06 | 11:32 à 15:12 | 10:58 à 14:10 |
| Local. | Setor oeste | Setor oeste | Setor extremo oeste (barragem) | Setores oeste e leste |
| Prof. Secchi média (m) | 2,20 | 2,37 | 2,45 | 2,13 |

Às curvas espectrais de cada elemento amostral, obtidas pelo espectrorradiômetro de campo (Tsai & Philpot, 1998; Rudorff, 2006) aplicou-se uma filtragem de suavização objetivando a redução dos efeitos dos ruídos observados no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm. Foram testados filtros de suavização lineares de média móvel de três, quatro, cinco, sete e nove pontos, além da suavização por transformada de Fourier. O filtro de suavização escolhido para cada curva foi aquele que reduziu o ruído aleatório sem alterar significativamente a posição das feições de espalhamento e absorção (λ_{max} e λ_{min}) e o módulo da derivada (valor máximo e valor mínimo), segundo Pereira (2008). As curvas de reflectância suavizadas dos pontos pertencentes a cada conjunto são apresentadas na Figura 3.

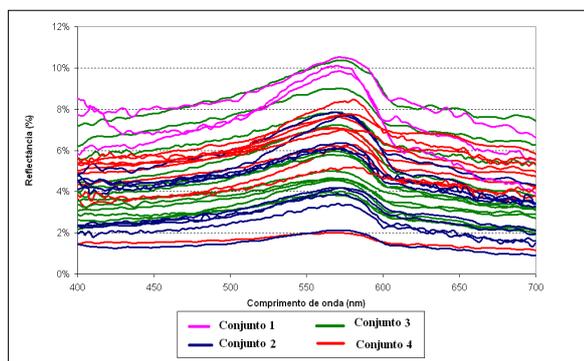


Fig. 3 – Curvas de reflectância suavizadas para cada um dos quatro conjuntos

A Figura 3 mostra que os pontos amostrais dos quatro conjuntos têm um comportamento espectral similar, com reflectâncias variando entre 2% e 10%.

Nenhum deles apresenta reflectância significativa na faixa da luz azul (400 – 450 nm), provavelmente devido à presença de vento, que tende a reduzir a transmissão da luz na interface ar/água. Verifica-se que, embora a geometria de aquisição de tomada dos dados tenha sido orientada para reduzir a componente especular da água, o sinal de superfície foi bem menor do que seria em condições de superfície da água plana, ou seja, sem vento.

Observa-se, em muitos dos pontos amostrais, um pico de reflectância máximo (entre 6% e 10%) na faixa do verde (560 - 570 nm), o qual pode estar associado à presença de clorofila, segundo Kirk (1994); Rundquist et al. (1996) e Barbosa (2005).

Técnicas de análise espectral, constituídas por razão e diferença de bandas foram aplicadas às curvas espectrais suavizadas, a partir da definição de intervalos espectrais que melhor caracterizaram os componentes do corpo d'água pesquisado em cada um dos quatro conjuntos. Para tanto, foram calculadas as médias das reflectâncias mínimas e máximas, aplicando a primeira derivada em todos os espectros suavizados para cada conjunto de espectros. Os intervalos espectrais que definiram feições de absorção e espalhamento foram: 571 a 698 nm para o conjunto 1; 571 a 696 nm para o conjunto 2; 568 a 648 nm para o conjunto 3 e 574 a 584 nm para o conjunto 4. As operações de razão consideraram as reflectâncias nos seguintes pontos: (571/698, 571/696, 568/648, 574/584) e as diferenças, (571-698, 571-696, 568-648, 574-584), tendo sido realizadas para cada um dos quatro conjuntos. Como a concentração das variáveis é baixa, optou-se em normalizar os dados por uma função logarítmica.

2.3 Imagem Multiespectral de alta resolução

A imagem multiespectral do Ikonos II, correspondente às bandas B1, B2, B3 e B4, com intervalos espectrais respectivamente de 450 – 520 nm; 520 – 600 nm; 630 – 690 nm e 760 – 900 nm, foi submetida a tratamentos a fim de torná-la espacial e radiometricamente compatível com os dados espectrais e Profundidade de Secchi tomados “in situ”. Tais tratamentos foram: georreferenciamento das cenas, máscara de recorte do corpo d'água e correções radiométrica e atmosférica.

O georreferenciamento da imagem foi realizado no programa SPRING, utilizando a Transformação Afim no plano e 12 pontos de controle. O resíduo da transformação geométrica foi de 1 pixel, considerado aceitável para o trabalho.

A delimitação do reservatório foi feita no Spring, a partir da escolha de uma segmentação por crescimento de regiões usando parâmetros de similaridade igual a 20 e área de 200 pixels, após testes realizados com outros valores, pelo fato desta ser a mais apropriada para delimitar o contorno da represa, por comparação com as demais. Aplicou-se a técnica de classificação não-supervisionada Isoseg para

agrupar as regiões definidas na segmentação, com valor de limiar igual a 90%. O mapeamento das classes temáticas foi realizado e a edição manual do contorno. A máscara gerada foi utilizada para o recorte dos Planos de Informação referentes às quatro bandas da imagem multiespectral.

A calibração radiométrica foi realizada com o objetivo de converter os ND's (números digitais) da imagem original em radiância espectral. Para tanto, a radiância espectral ou radiância no sensor foi calculada a partir de equações matemáticas apresentadas por Soudani et al. (2006) para as imagens Ikonos, sendo o fator de calibração usado para as bandas do Ikonos obtidos em Soudani et al. (2006) e Goward et al. (2003).

A correção atmosférica, que objetiva a conversão dos ND's (números digitais) ou valores de brilho da imagem original em reflectância aparente, foi realizada baseando-se no método empírico de Chavez (1989), denominado DOS - *Dark Object Subtraction* - utilizando para isso o aplicativo Idrisi. Dentre os parâmetros necessários à aplicação do método no Idrisi, tem-se o valor de *Dn haze* (número digital do pixel mais escuro), que foi obtido a partir da observação do histograma de frequências para a banda original que estava sendo corrigida. Estipulou-se que o valor de *Dn haze* seria aquele do ND anterior à frequência de mudança mais abrupta observada nos histogramas. Porém, foram observadas ocorrências de pixels com valores de brilho ou frequências já nos DN = 1 para todas as bandas da imagem Ikonos. Portanto, o valor de *Dn haze* adotado foi zero.

A imagem resultante do georreferenciamento, da calibração radiométrica e correção atmosférica foi submetida então, a uma suavização a partir da aplicação de filtros de média móvel simples, a fim de reduzir a possível presença de ruídos e oscilações radiométricas (Tsai & Philpot, 1998). Esse processamento foi realizado no aplicativo Idrisi, com janelas de tamanhos diferentes, sendo observado que os resultados de correlação com valores mais altos (maiores que 0,6) ao nível de significância de 5% se deram para o filtro de janela 3x3 pixels.

Realizadas as operações de pré-processamento da imagem, foi aplicada a razão de bandas aos valores extraídos nos pontos de interesse, a princípio, para os mesmos intervalos considerados nas análises dos dados espectrais (571 a 698 nm; de 571 a 696 nm; de 568 a 648 nm e de 574 a 584 nm) que estão relacionados com a presença de fitoplâncton, conforme Kirk (1994), Barbosa (2005) e Rundquist (1996). Esses intervalos então, estão incluídos nos comprimentos de ondas de 506,4 nm a 595 nm para a banda 2 (verde), de 631,9 nm a 697,7 nm para a banda 3 (vermelho), avaliando-se as operações entre as bandas:

- (B3/B2) (1)
- (B2/B3) (2)
- [(B2-B3)/(B2+B3)] (3)

Outras combinações também foram avaliadas, conforme indicado na bibliografia consultada (Kirk, 1994; Hoge et al., 1987; Gitelson, 1992) envolvendo as quatro bandas do Ikonos:

- [(B2-B4)/(B2+B4)] (4)
- (B4/B3) (5)
- (B3/B1) (6)
- (B4/B1) (7)
- (B3/B4) (8)
- (B1/B2) (9)
- (B1/B4) (10)

3. ANÁLISES DE CORRELAÇÃO

Considerando inicialmente os dados espectrorradiométricos tomados "in situ", para cada um dos quatro conjuntos de dados, separados conforme as condições do tempo, foi calculada a correlação linear de Pearson entre a reflectância da água e a variável Profundidade de Secchi. Embora o conjunto 1 seja aquele que apresenta as melhores condições do tempo para avaliação dos dados, este foi prejudicado devido ao número insuficiente de elementos amostrais (apenas 3 pontos), não sendo possível a análise de correlação significativa. Para os conjuntos 2, 3 e 4, com números de elementos que possibilitaram as análises estatísticas (n = 10, n = 12 e n = 10, respectivamente), foram calculadas as correlações.

A Figura 4 mostra o resultado das correlações para os quatro conjuntos, considerando os valores resultantes das operações de razão e diferença entre intervalos espectrais (com aplicação da função logarítmica) para a variável limnológica Profundidade de Secchi.

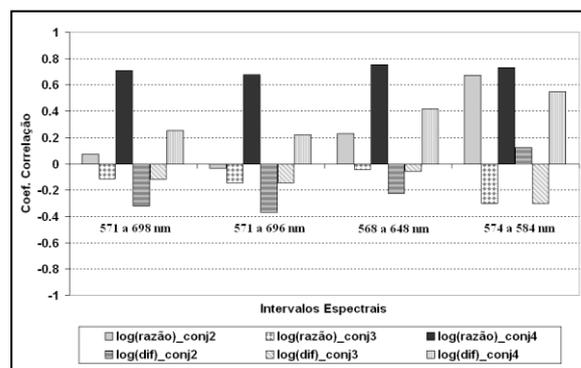


Fig. 4 – Coeficientes de Correlação entre Profundidade de Secchi e logaritmo das razões - log(razão) e diferenças – log(dif) para os intervalos espectrais, 571 a 698 nm; 571 a 696 nm; 568 a 648nm; 574 a 584 nm, nos quatro conjuntos

Pela Figura 4, verifica-se que a variável Profundidade de Secchi está correlacionada com log da razão entre os comprimentos de onda 574 e 584 nm (0,67; p = 0,032), sendo estatisticamente significativa ao nível de 5%, para o conjunto 2. Para os demais intervalos espectrais, além das correlações

apresentarem-se baixas ($< 0,4$), não são significativas a 5%. Portanto, para o conjunto 2, pode-se inferir que o intervalo de 574 e 584 nm para a razão de bandas foi o mais eficiente na detecção de transparência da água. A fraca correlação entre a variável Profundidade de Secchi e log das razões e diferenças de bandas nos comprimentos de onda estudados para o conjunto 3, além da não significância estatística a 5%, comprovam que as medidas obtidas para esses pontos foram muito prejudicadas pela presença de nuvens. Ainda na Figura 4, observa-se que a variável Profundidade de Secchi apresentou valores de correlação significativas a 5% para todas as razões entre os comprimentos de onda pesquisados (equações de 11 a 14) no conjunto 4. Já para as diferenças não houve correlação significativa a 5%.

$$\left(\frac{571}{698}\right)_{nm} \quad (0,70; p = 0,022) \quad (11)$$

$$\left(\frac{571}{696}\right)_{nm} \quad (0,67; p = 0,032) \quad (12)$$

$$\left(\frac{568}{648}\right)_{nm} \quad (0,75; p = 0,012) \quad (13)$$

$$\left(\frac{574}{584}\right)_{nm} \quad (0,73; p = 0,016) \quad (14)$$

Os valores de radiância de superfície obtidos das quatro bandas da imagem multiespectral Ikonos, para os mesmos pontos amostrados em campo, também foram submetidos a análises de correlação entre as bandas e a variável Profundidade de Secchi. Foram analisadas as correlações para os quatro conjuntos de dados em que a amostra foi dividida segundo as condições de tempo, porém, nem todos os pontos puderam ser lidos na imagem multiespectral, devido à presença de nuvens na imagem, de modo que as análises posteriores foram feitas utilizando-se os conjuntos 3, com 11 pontos, sendo o ponto 31 descartado por encontrar-se sob as nuvens; e o 4, com os 10 pontos.

A Figura 5 (a) apresenta os coeficientes de correlação entre a variável limnológica Profundidade de Secchi e os valores lidos nas bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos, para os conjuntos 3 e 4; enquanto que a Figura 5 (b) mostra os coeficiente de correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos, para os mesmos conjuntos. As razões de bandas testadas foram as apresentadas nas equações de 15 a 24 a seguir.

$$R1 = \left(\frac{B3}{B2}\right) \quad (15)$$

$$R2 = \left(\frac{(B2 - B3)}{(B2 + B3)}\right) \quad (16)$$

$$R3 = \left(\frac{(B2 - B4)}{(B2 + B4)}\right) \quad (17)$$

$$R4 = \left(\frac{B4}{B3}\right) \quad (18)$$

$$R5 = \left(\frac{B3}{B1}\right) \quad (19)$$

$$R6 = \left(\frac{B4}{B1}\right) \quad (20)$$

$$R7 = \left(\frac{B3}{B4}\right) \quad (21)$$

$$R8 = \left(\frac{B1}{B2}\right) \quad (22)$$

$$R9 = \left(\frac{B2}{B3}\right) \quad (23)$$

$$R10 = \left(\frac{B1}{B4}\right) \quad (24)$$

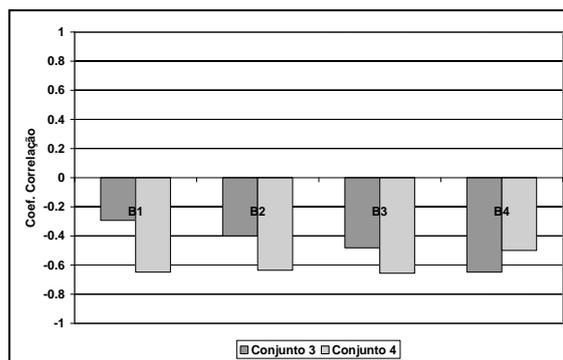


Fig. 5(a) - Coeficiente de Correlação entre Profundidade de Secchi e bandas multiespectrais da imagem Ikonos II, para os conjuntos 3 e 4

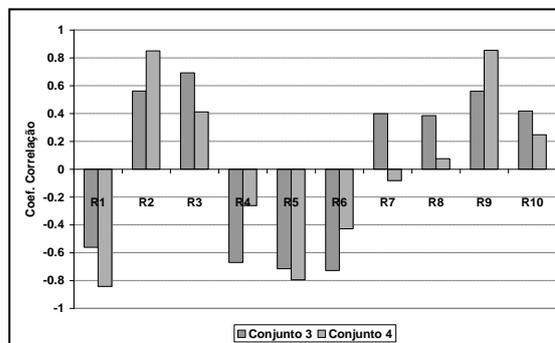


Fig. 5 (b) Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos e Profundidade de Secchi, para os conjuntos 3 e 4.

Observa-se, na Figura 5 (a), que, para o conjunto 3 as correlações significativas ocorreram apenas para a banda (B4) (-0,648; $p = 0,031$), sendo que as demais correlações não são significativas a 5%. Para o conjunto 4, observa-se que correlações significativas ocorreram para as bandas (B1) (-0,649; $p = 0,042$); (B2) (-0,636; $p = 0,048$); e (B3) (-0,656; $p = 0,039$), sendo não significativa em relação à banda (B4). Na Figura 5 (b) verifica-se que a melhor correlação encontrada para o conjunto 3 foi para a razão apresentada na equação (25), sendo alta também para a correlação apresentada na equação (26) e um

pouco menor para aquelas apresentadas em (27) e (28).

$$R6 = \left(\frac{B4}{B1}\right) \text{ com } r = -0,728; p = 0,011 \quad (25)$$

$$R5 = \left(\frac{B3}{B1}\right) \text{ com } r = -0,716; p = 0,013 \quad (26)$$

$$R3 = \left(\frac{(B2 - B4)}{(B2 + B4)}\right) \text{ com } r = 0,692; p = 0,018 \quad (27)$$

$$R4 = \left(\frac{B4}{B3}\right) \text{ com } r = -0,67; p = 0,024 \quad (28)$$

Para o conjunto 4 verifica-se altas correlações para as razões apresentadas nas equações de 29 a 32 a seguir.

$$R1 = \left(\frac{B3}{B2}\right) (-0,842; p = 0,002) \quad (29)$$

$$R2 = \left(\frac{(B2 - B3)}{(B2 + B3)}\right) (0,850; p = 0,002) \quad (30)$$

$$R5 = \left(\frac{B3}{B1}\right) (-0,795; p = 0,006) \quad (31)$$

$$R9 = \left(\frac{B2}{B3}\right) (0,854; p = 0,002) \quad (32)$$

4. MODELO EMPÍRICO DE INFERÊNCIA

As análises realizadas para a construção de modelos empíricos objetivando a inferência da transparência da água a partir das medidas de Profundidade de Secchi, no Reservatório de Itupararanga, foram feitas para os conjuntos 3 e 4.

Para o conjunto 3, que apresentou correlação significativa apenas para as bandas e razões de bandas da imagem Ikonos, os modelos testados envolveram essas variáveis e Profundidade de Secchi. Dentre os modelos possíveis, aquele que se mostrou mais adequado estatisticamente, segundo critérios definidos por Charnet et al. (1999) e Crusco et al. (2005), foi o que descreve a Profundidade de Secchi em função da

razão de bandas do Ikonos equação 20: $\left(\frac{B4}{B1}\right)$, com R^2 ajustado explicando 47,8% da variabilidade dos dados, σ^2 menor em relação aos demais e $Cp_Mallows$ adequado com $Cp = 0,9 \sim p = 1$. O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Profundidade de Secchi, resultou positivo para normalidade (A.D. = 0,316 e p-valor = 0,490), ao nível de significância de 5%; além do p-valor resultante da análise de variância da regressão (0,011). O modelo ficou então definido pela seguinte equação:

$$Prof. Secchi = 2,74 - 1,14 * \left(\frac{B4}{B1}\right) \quad (33)$$

Os gráficos dos resíduos do modelo demonstraram normalidade dos mesmos e variância constante. O resultado do teste Anderson-Darling confirma o resultado de normalidade (A.D. = 0,350 e p-valor = 0,402), sendo o modelo indicado para inferência de transparência da água a partir da Profundidade de Secchi, para os dados do conjunto 3.

Embora para o conjunto 4 tenham ocorrido correlações significativas para Profundidade de Secchi e os dados espectrais, e também para esta variável e as bandas e razões de bandas do Ikonos, os modelos de inferência gerados não satisfizeram as exigências estatísticas de normalidade dos resíduos e variância constante. Portanto, não foi possível gerar modelos de inferência de Profundidade de Secchi para esse conjunto.

4.1 Validação do modelo

A validação do modelo de regressão foi realizada pela adaptação do método de múltiplas subamostras, conhecido por “jackknife”, que é aplicado a amostras de tamanhos pequenos, pois permite a utilização de todas as observações na estimação dos parâmetros do modelo (Neophytou et al., 2000).

O método consiste em separar uma observação da amostra original, estimar os coeficientes do modelo com base no restante da amostra (n-1) e estimar a observação reservada utilizando a nova equação. O procedimento é repetido para toda a amostra (n vezes), tal que todas as observações sejam estimadas por modelos cujos parâmetros foram estimados com base nas demais. O percentual de classificações corretas é acumulado para todos os elementos amostrais da amostra, indicando a precisão global do modelo.

A Tabela 2 apresenta o intervalo de predição (IP) na estimativa de Profundidade de Secchi para os modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.

TABELA 2 - INTERVALOS DE PREDIÇÃO PARA PROFUNDIDADE DE SECCHI A PARTIR DOS MODELOS DE VALIDAÇÃO COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO ADAPTADO “JACKKNIFE”.

| El. Amostral excluído | Modelo de Validação: Secchi = $\beta_0 - \beta_1 * (B4/B1)$ | $\rho (B4/B1)$ | Secch real (m) | Limite inf. IP | Limite sup. IP |
|-----------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | Secchi=2,7251-1,1227*(B4/B1) | 0,167 | 2,6 | 2,1823 | 2,8926 |
| 2 | Secchi=2,7268-1,1236*(B4/B1) | 0,154 | 2,6 | 2,1949 | 2,9122 |
| 3 | Secchi=2,7726-1,2694*(B4/B1) | 0,046 | 2,6 | 2,3256 | 3,1025 |
| 4 | Secchi=2,6816-0,9935*(B4/B1) | 0,120 | 2,8 | 2,2496 | 2,8758 |
| 5 | Secchi=2,7220-1,1959*(B4/B1) | 0,244 | 2,7 | 2,1490 | 2,7122 |
| 6 | Secchi=2,7756-1,2452*(B4/B1) | 0,138 | 2,4 | 2,2805 | 2,9275 |
| 7 | Secchi=2,7343-1,1420*(B4/B1) | 0,212 | 2,5 | 2,1366 | 2,8484 |
| 8 | Secchi=2,7405-1,1338*(B4/B1) | 0,229 | 2,4 | 2,1306 | 2,8309 |

| | | | | | |
|----|------------------------------|-------|-----|--------|--------|
| 9 | Secchi=2,7573-1,1821*(B4/B1) | 0,174 | 2,4 | 2,2155 | 2,8876 |
| 10 | Secchi=2,7346-1,1397*(B4/B1) | 0,468 | 2,2 | 1,7109 | 2,6918 |
| 11 | Secchi=2,7148-0,9984*(B4/B1) | 0,399 | 2,2 | 1,9156 | 2,7168 |

Na Tabela 2, verifica-se que os valores reais de Profundidade de Secchi para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes β_0 e β_1 de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando $\alpha = 5\%$. Sendo os intervalos de confiança β_0 e β_1 , expressos por $2,5426 < \beta_0 < 2,9373$ e $0,3299 < \beta_1 < 1,9500$, verificou-se que todos os coeficientes β_0 e β_1 dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado a

partir da razão de bandas do Ikonos $\left(\frac{B4}{B1}\right)$ em transparência da água, a partir da variável Profundidade de Secchi, é confirmada.

Analisando o modelo, verifica-se que a razão

das bandas $\left(\frac{B4}{B1}\right)$ da imagem multiespectral Ikonos modelou as concentrações de profundidade de Secchi na água do Reservatório de Itupararanga, embora esta variável ocorra em baixas concentrações nesse corpo d'água, como pode ser observado na Tabela 1. O modelo empírico descrito na equação (33) foi aplicado à imagem Ikonos, utilizando o aplicativo Idrisi, e é apresentado na Figura 6.

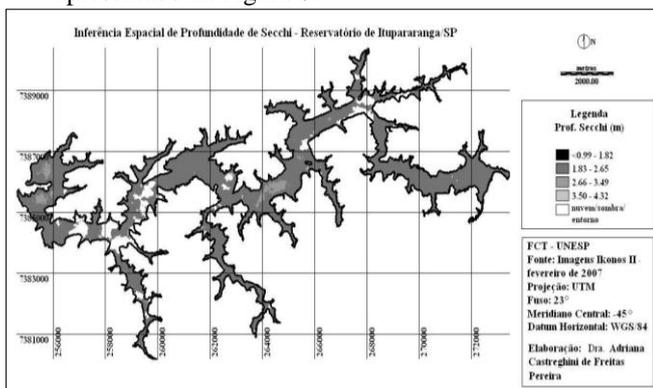


Fig. 6 – Distribuição espacial do modelo de inferência

Analisando a distribuição espacial de Profundidade de Secchi, segundo sua variabilidade em concentração a partir do modelo matemático que usa as bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 (Figura 6), pode-se verificar que essas concentrações apresentam valores homogêneos para todo o reservatório (entre 1,83 e 2,65 m), sendo que nas regiões oeste e central do reservatório, ocorrem valores um pouco mais altos de Secchi (maiores que 2,65 m).

As amostras de campo (Tabela 1) apresentaram valores de Secchi para os pontos pertencentes ao conjunto 3 que variaram entre 2 e 2,80 m, sendo que os dois pontos com maiores valores de Secchi encontram-se exatamente na região oeste do Reservatório (Figura 1). Isso demonstra que o resultado da aplicação do modelo empírico é coerente com os valores de Profundidade de Secchi e características do corpo d'água observados em campo, mesmo com a ocorrência de nuvens na imagem.

5. INFERÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA ZONA EUFÓTICA E COEFICIENTE VERTICAL DE ATENUAÇÃO DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA/SP

Autores como Poole & Atkins são citados por Esteves (1998) como precursores no cálculo do coeficiente vertical de atenuação a partir da Profundidade do disco de Secchi medido “in situ”. De acordo com sua proposta, a Profundidade de Secchi é o inverso do coeficiente de atenuação vertical, sendo a relação (34) definida para esse fim:

$$k = \left(\frac{1,7}{Zds} \right) \quad (34)$$

onde: Zds = Profundidade de Secchi;

1,7 = constante calculada por Poole e Atkins

O cálculo de k foi realizado para os valores de Profundidade de Secchi medidos “in situ” para o conjunto 3 e obtidos a partir do modelo gerado para Profundidade de Secchi (equação 33). A média entre as 11 medidas tomadas “in situ” para esse conjunto resultou em um valor de Profundidade de Secchi = 2,45 m e $k = 0,69$. Comparando esse valor obtido com os estudos de Esteves (1998), verifica-se que a constante k para o reservatório de Itupararanga aproxima-se do tipo de água “clara”, o que realmente é observado “in loco”. A aplicação do modelo gerado para Profundidade de Secchi (equação 32) para os 11 pontos do conjunto 3, resultou em valor médio de Profundidade de Secchi = 2,50 m e $k = 0,68$.

A Profundidade de Secchi também é utilizada para a avaliação da extensão da zona eufótica, conforme Esteves (1998); Bukata (1995) e Kirk (1994). Para tanto, o valor da Profundidade de Secchi é multiplicado pela constante 2,7. O valor obtido a partir desse cálculo é admitido pelos autores como sendo aproximadamente 1% da radiação superficial do corpo d'água.

A fim de analisar o comportamento da zona eufótica no reservatório de Itupararanga, apresenta-se na Tabela 3 o cálculo desta para os 11 pontos pertencentes ao conjunto 3, medidos “in situ”, a partir da constante de multiplicação igual a 2,7, bem como

para o modelo de regressão estimado para Profundidade de Secchi (equação 33).

TABELA 3 – ESTIMATIVA DA EXTENSÃO DA ZONA EUFÓTICA A PARTIR DA PROFUNDIDADE DE SECCHI

| Pontos | Dados estimados “in situ” | | Dados estimados pelo modelo | |
|--------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Prof. de Secchi (m) | Extensão da Zona Eufótica (m) | Prof. de Secchi (m) | Extensão da Zona Eufótica (m) |
| P02 | 2,6 | 7,02 | 2,55 | 6,88 |
| P05 | 2,6 | 7,02 | 2,56 | 6,91 |
| P06 | 2,6 | 7,02 | 2,69 | 7,26 |
| P07 | 2,8 | 7,56 | 2,60 | 7,02 |
| P08 | 2,7 | 7,29 | 2,46 | 6,64 |
| P09 | 2,4 | 6,48 | 2,58 | 6,96 |
| P10 | 2,5 | 6,75 | 2,50 | 6,75 |
| P12 | 2,4 | 6,48 | 2,50 | 6,75 |
| P15 | 2,4 | 6,48 | 2,54 | 6,86 |
| P16 | 2,2 | 5,94 | 2,21 | 5,97 |
| P19 | 2,2 | 5,94 | 2,30 | 6,21 |

Analisando a Tabela 3 verifica-se, para os dados medidos “in situ”, que o valor mínimo da profundidade da zona eufótica é igual a 5,94 m (P16 e P19) e o valor máximo corresponde à 7,56 m (P07). Esses valores indicam uma zona eufótica estreita para o reservatório de Itupararanga e com pouca concentração de sólidos em suspensão na água, o que a torna clara e quase transparente.

No que se refere aos dados estimados pelo modelo (Tabela 3), indicam, como nos dados de Profundidade de Secchi tomados “in situ”, que o valor mínimo da extensão da zona eufótica é igual a 5,97 m (P16) e o valor máximo corresponde à 7,26 m (P06). Novamente, como no caso anterior (Tabela 3) indicam uma zona eufótica estreita para o reservatório de Itupararanga e com pouca concentração de sólidos em suspensão na água, tornando-a clara e quase transparente.

Pode-se observar dos cálculos realizados para determinação da zona eufótica, que as discrepâncias entre os valores estimados a partir da Profundidade de Secchi medida “in situ” e a partir do modelo de regressão gerado pela pesquisa, são pequenas, variando entre 0 e 0,65 m, reafirmando a validade do modelo gerado para Profundidade de Secchi no conjunto 3.

6. CONCLUSÕES

O objetivo principal proposto para a pesquisa foi atingido, ou seja, foi possível a inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente de atenuação vertical de luz na água do Reservatório de Itupararanga. Ambos os resultados permitiram classificar o corpo d’água estudado como tipo de água clara, praticamente transparente, com pouca

concentração de sólidos em suspensão na água.

O objetivo específico também foi alcançado pela pesquisa, visto que foi desenvolvido um método de inferência da transparência da água do Reservatório

de Itupararanga, a partir da razão de bandas $\left(\frac{B4}{B1}\right)$ da imagem multiespectral Ikonos, correspondendo às faixas espectrais de 450 – 520 nm (B1) e 760 – 900 nm (B4). A distribuição espacial do modelo de inferência foi realizada e apresentou resultados de Profundidade de Secchi coerentes com aqueles encontrados em campo, para as regiões oeste e central do corpo d’água, indicando que o modelo é adequado para representar a transparência da água para o Reservatório de Itupararanga/SP. Isso é reforçado na validação estatística do modelo.

Embora os elementos amostrais tenham sido separados em conjuntos com condições de tempo semelhantes, não foi possível gerar modelos de inferência para transparência da água a partir dos dados espectrais coletados em campo, o que demonstra a complexidade em estudar corpos d’água, onde as condições externas definem mudanças nas características da água, muitas vezes não previstas no planejamento da amostra.

A maior dificuldade encontrada na pesquisa foi adequar a aquisição da imagem Ikonos às coletas limnológicas e espectrorradiométricas em campo, que teoricamente, deveriam ocorrer no mesmo dia. Na realidade, devido às condições de programação da imagem Ikonos, ocorreram com a defasagem de 2 e 3 dias do trabalho de campo e com considerável cobertura de nuvens, inclusive sobre parte dos pontos de interesse na água do reservatório. Ainda assim, foi possível a utilização das bandas dessa imagem na construção do modelo de inferência de transparência da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições e pessoas: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa na forma de uma bolsa de estudo; aos pesquisadores da Faculdade de Ciências Agrárias – Unesp, Campus de Botucatu, Dr. Eduardo Negrisoni e Dr. Marcelo Rocha Corrêa, por realizarem a coleta e análise limnológica nos elementos amostrais definidos no reservatório de Itupararanga; à pesquisadora do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dra. Evelyn M. L. de Moraes Novo, pela orientação informal dada à pesquisa, sem a qual esta não teria sido possível, e ao pesquisador MSc. Enner Alcântara, por realizar a coleta de dados espectrais em campo; à professora da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Unesp, Campus de Presidente Prudente, Dra. Vilma M. Tachibana, pela orientação estatística na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. São José dos Campos, 2005. 281 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE.
- BRAGA, C. Z. F. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila-a, transparência e profundidade da água na Lagoa de Araruama, RJ**. 1998. 147 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói.
- BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blucher, CETESB, 1977. 185p.
- BUKATA, R. P. J. KOONDRATYEV, K.Y.; POZOZDNYAKOV, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Taton: CRC, 1995. 362p.
- CHARNET, R.; FREIRE, C.A. De L.; CHARNET, E.M.R.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 356p, 1999.
- CHAVEZ, Jr., P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.55, p.1285-1294, 1989.
- CRUSCO, N.A.; ANJOS, C.S.; FREITAS, C.C.; RENNO, C.D.; EPIPHANIO, J.C.N. Análise de regressão linear múltipla para simulação da banda do SWIR com outras bandas espectrais. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, 2005, p.891-898.
- DEKKER, A G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 211 f. Tese (PhD theses) Free University, Amsterdam.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Paulo: RIMA, 2002. 237p.
- EKERCIN, S. Water quality retrievals from high resolution Ikonos multispectral imagery: a case study in Istanbul, Turkey. **Water air soil pollut**, v.183, p.239-251, 2007.
- GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.D.; TRINDADE, M.L.B.; SANTOS, S.C. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento de dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v.20, p.7-20, 2002. Edição Especial.
- GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.D.; TRINDADE, M.L.B.; LIMA, D.L. Uma aplicação de sensoriamento remoto orbital no monitoramento de áreas infestadas por plantas aquáticas. **I SIMGEO – I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, 1-3 setembro, 2004. Recife: DECart, PPGCGTG/UFPE, Anais CD-ROM, 2004.
- GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v.94, n.4, p.523-34, 2005.
- GIARDINO, C.; PEPE, M.; BRIVIO, P.A.; GHEZZI, P.; ZILIOLI, E. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. **The Science of the Total Environment**, v.268, p. 19-29, 2001.
- GOWARD, S.N.; DAVIS, P.E.; FLEMING, D.; MILLER, L.; TOWNSHEND, J.R. Empirical comparison of Landsat 7 and Ikonos multispectral measurements for selected Earth observation System (EOS) validation sites. **Remote Sensing of Environment**, v.88, pp.80-99, 2003.
- HOGUE, E. F., WRIGHT, C. W., & SWIFT, R. N. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. **Applied Optics**, v. 26, n. 11, p. 2082-2094, 1987.
- KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge University Press, 509p., 1994.
- LOUCHARD, E. M. et al. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments. **Optical express**. v. 10, n. 26, p.1573, 2002.
- NEOPHYTOU, E.; CHARITOU, A.; CHARALAMBOUS, C. **Predicting corporate failure: empirical evidence for the UK**. University of Southampton, Sep. 2000, Working Paper.
- NOBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. São José dos Campos, 2002. 87 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- NOVO, E.M.L.M.; BRAGA, C.Z.F.; TUNDISI, J.G. Use of TM/Landsat data to retrieve the optically active water constituents from a eutrophic tropical reservoir. **Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium: Resource and Environmental Monitoring**, Rio de

Janeiro, sept. 20-30, 1994, INPE, Vol.30, Part 76, 1994, p.258-262.

NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.C.F.; FREITAS, R.M.; SHIMABUKURO, Y.E.; MELACK, J.M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, 2006.

PEREIRA, A.C.F. **Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água associadas às variações espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.** Presidente Prudente, 2008. 206p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

PEREIRA, A.C.F.; GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.; NOVO, E.M.L.M. 2007. Amostragem em corpos d'água: Definição de elementos amostrais, posicionamento e coleta de dados "in situ". In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. 2007, Presidente Prudente. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2007, p.866-874.

PEREIRA FILHO, W. **Influência dos diferentes tipos de uso da terra em bacias hidrográficas sobre sistemas aquáticos da margem esquerda do Reservatório de Tucuruí – Pará.** São Paulo, 2000. 130 p. Tese (Doutorado em Geografia) – USP.

RITCHIE, J.C.; ZIMBA, P.V.; EVERITT, J.H. Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.69, n.6, p. 695-704, 2003.

RITCHIE, J.C.; COOPER, C.M. Comparison of measured suspended sediment concentration with suspended sediment concentrations estimated from Landsat MSS data. **International Journal for Remote Sensing**, v. 9, n.3, p.379-387, 1998.

RUNDQUIST, D. C.; LUOHENG, H.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SOUDANI, K.; FRANÇOIS, C.; Le MAIRE, G.; Le DANTEC, V. ; DUFRÊNE, E. Comparative analysis of Ikonos, Spot, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, pp.161-175, 2006.

TSAI F., PHILPOT W. Derivative Analyses of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**. v. 66, p. 41–51, 1998.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.