

Batimetria fluvial estimada através de geostatística em dados orbitais: estudo de caso no rio Paraguai com o sensor ASTER

Hiran Zani¹
Mario Luis Assine²
Aguinaldo Silva¹

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP/IGCE
Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente
AV. 24-A, 1515 - 13506-900 – Rio Claro – SP, Brasil
hيرانزاني@gmail.com.br; aguinald_silva@yahoo.com.br

² Universidade Estadual Paulista – UNESP/IGCE
Departamento de Geologia Aplicada
AV. 24-A, 1515 - 13506-900 – Rio Claro – SP, Brasil
assine@rc.unesp.br

Abstract. The Paraguay River is the main tributary of the Paraná River and has an extension of 1.693km in Brazilian territory. The navigability conditions are very important for the regional economy because most of the central-west Brazilian agricultural and mineral production is transported by the Paraguay River. Increased sedimentation along the channel requires continuous dredging to waterway maintenance. Systematic bathymetric surveys are periodically carried out in order to check depth condition along the channel using echo-sounding devices. In this paper, digital image processing and geostatistical analysis methods were used to analyze the applicability of the ASTER sensor to estimate channel depths in a segment of the upper Paraguay River. The results were compared with field data in order to choose the band with better adjustment and to evaluate the average error. Comparing the VNIR bands, the best fit was presented by the channel 2 (0.63 – 0.69 μ m), showing a good representation of the channel depths more shallow than 1.5m. Applying geostatistical methods, the model accuracy was enhanced from ± 43 cm to ± 36 cm and undesired components were slacked. It was concluded that the radiance data of band 2 converted to bathymetry information allows a good estimation of river depths and channel morphology.

Palavras-chave: ASTER, Paraguay River, bathymetry, applied remote sensing, rio Paraguai, batimetria, sensoriamento remoto aplicado.

1. Introdução

O rio Paraguai é um dos mais importantes rios de planície do Brasil e o principal tributário do rio Paraná. Percorre 2.621km de sua nascente a norte, na chapada dos Parecis, até sua confluência com o rio Paraná, na fronteira do Paraguai com a Argentina. Sua bacia de drenagem tem uma área de 496.000km², dos quais 396.800km² em território brasileiro (Figura 1). Possui boas condições para a navegação, mas com o aumento do desmatamento nas regiões próximas à suas nascentes, processos de sedimentação no canal comprometem a funcionalidade da hidrovia (Silva et al., 2007), demandando dragagem em áreas críticas para remoção de sedimentos que se acumulam sob a forma de barras arenosas.

Dados coletados por sensores orbitais constituem uma interessante alternativa para a avaliação da profundidade do leito de canais fluviais. Esta abordagem considera que a radiância superficial em um corpo de água óticamente raso é composta por informações de seu leito (Maritorena et al., 1994) e que a diferença de intensidade da energia eletromagnética em distintos níveis de profundidade pode revelar informações batimétricas, conforme demonstra a Equação de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{-c \cdot x} \quad (1)$$

onde: (e) é a base logarítmica natural, (I) é a intensidade da luz, (I_0) é a intensidade da luz em $x = 0$, (c) é constante de absorção média da luz através da coluna d'água e (x) é a espessura percorrida pela energia eletromagnética.

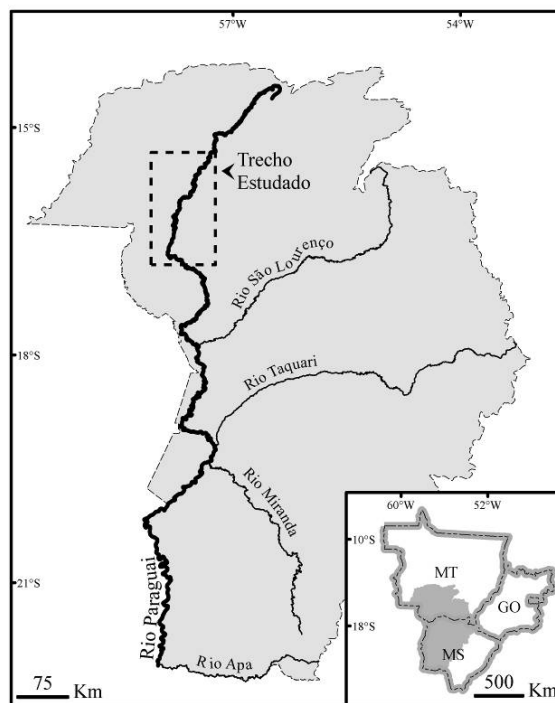


Figura 1. Localização da área do estudo na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai com seus principais afluentes.

Imagens multiespectrais têm se mostrado a melhor alternativa para este tipo de análise (e.g. Lyon et al., 1992; Hamilton et al., 1993; Fonstad e Marcus, 2005), em relação às ortofotos pancromáticas e coloridas. No entanto, são comuns em dados de sensores remotos erros e limitações inerentes ao seu processo de captação, como distorções geométricas e interferência atmosférica.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade do sensor ASTER na análise de profundidades do rio Paraguai e criar um modelo semi-empírico para a geração de mapas batimétricos do canal.

2. Metodologia

Neste estudo foram utilizados dois tipos de dados: dados de batimetria coletados em campo e imagens orbitais do sensor ASTER. Os dados de batimetria foram adquiridos pela Administração da Hidrovia do Rio Paraguai (AHIPAR) nos meses de julho e agosto de 2004. Estas informações foram coletadas em uma malha regular de dados, com resolução aproximada de 100m². Todas as posições foram registradas por DGPS, com posterior correção do sinal. Para as imagens ASTER utilizou-se o produto AST07XT da região do visível e infravermelho próximo (VNIR), subdividido em três bandas com resolução de 15m. A cena utilizada foi captada em 14/08/2004 e não apresenta cobertura de nuvens.

Primeiramente, interpolou-se os pontos de batimetria para a confecção de um plano *raster*. Foi utilizado o algoritmo da mínima curvatura, com resolução de saída idêntica ao sensor ASTER (15m). Uma máscara representando o canal foi criada e utilizada para o recorte dos dados de batimetria e da imagem ASTER. Foram realizados diagramas de dispersão entre os dados de batimetria interpolados, com os valores da radiância das três bandas do VNIR.

Estatísticas de correlação também foram obtidas, afim de se identificar a banda que melhor representa as informações batimétricas.

O método geoestatístico foi aplicado nos valores de radiância da banda com maior correlação com dados batimétricos. Foram extraídas amostras de 80 linhas por 40 colunas na região do canal, para a construção de semivariogramas experimentais. Amostras que demonstraram boa representatividade do leito foram ajustadas manualmente à um modelo teórico. Este processo foi fundamental para na análise variográfica, que forneceu os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar valores em pontos não amostrados para a interpolação dos dados orbitais, segundo a krigagem ordinária. Este procedimento foi inserido nos métodos na tentativa de excluir elementos da imagem que não possuem correlação espacial (e.g. sedimentos em suspensão, vegetação macrófita).

Para a aplicação da Equação 1, considerou-se que a intensidade da luminosidade incidente é homogênea em toda a cena e que a espessura percorrida pela luz na coluna d'água (x) representa a profundidade do canal (z). Desta maneira, os valores de intensidade (I) utilizados na Equação 1 podem ser substituídos pela radiância (L_λ) e isolada a variável batimétrica (z), segundo a Equação 2:

$$z = -1/c \ln (L_\lambda / L_{\lambda 0}) \quad (2)$$

A constante ($L_{\lambda 0}$) foi determinada através da mediana do valor de *pixel* das barras longitudinais emersas do rio Paraguai. Considerou-se que estes elementos são compostos pelo mesmo material do leito submerso e que seu comportamento radiométrico não sofre alterações ao longo do canal. Já a constante de absorção da luz na coluna d'água (c) foi obtida a partir de uma correlação empírica entre os dados orbitais da imagem com as informações batimétricas interpoladas.

3. Resultados e discussão

Como pode ser visualizado na Figura 2, os diagramas de dispersão apontaram a banda 2 do sensor ASTER como intervalo com maior coeficiente de correlação linear com os dados batimétricos obtidos diretamente no campo.

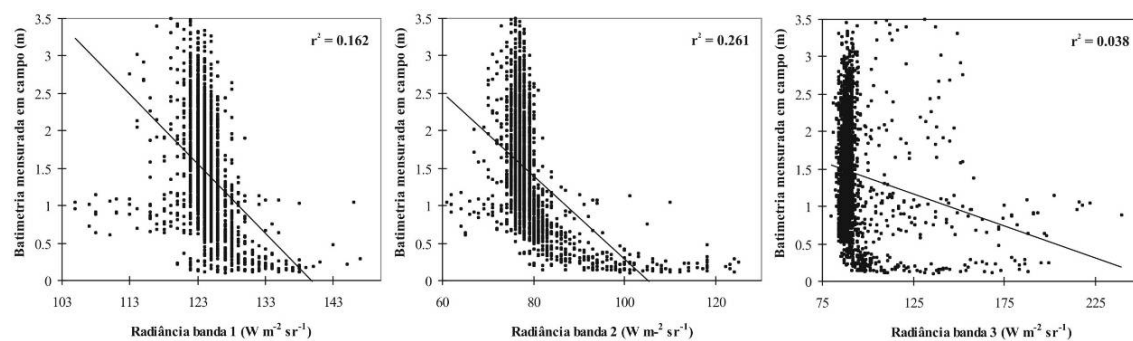


Figura 2. Correlação entre os valores digitais de radiância das bandas 1, 2 e 3 com os dados batimétricos interpolados.

A distribuição dos pontos plotados também é compatível com a característica exponencial, prevista pela Equação 1, para modelo de estimação da profundidade de corpos d'água. Desta maneira os procedimentos de análise geoestatística, a determinação das constantes e a aplicação da Equação 2 foram restritos ao comprimento de onda que a banda 2 representa. Os resultados alcançados são semelhantes aos de Winterbottom e Gilvear (1997) e Fonstad e Marcus (2005), que também identificaram maior representatividade nesta porção do espectro eletromagnético. Entretanto, diferem dos de Bryant e Gilvear (1999) e Legleiter et al.

(2004), para quem as bandas que melhor resultado apresentaram foram, respectivamente, as do infravermelho (0.91-1.05 μm) e do azul (0.53-0.61 μm). Semelhante aos resultados de Lyzenga (1981) e Carbonneau et al. (2006), estes gráficos também evidenciaram que a relação entre x e y deixa de ocorrer em profundidades superiores a 1.6m, restringindo a visibilidade do leito a profundidades máximas de 1.5m de coluna d'água.

Segundo Fonstad e Marcus (2005) é admissível que para cada ambiente fluvial, uma banda espectral específica represente mais adequadamente as informações de seu leito. De acordo com Lafon et al. (2002) a turgidez da água e a profundidade do canal são as características que mais influenciam nas diferentes respostas espectrais de corpos de água, impedindo a generalização de um único comprimento de onda para este tipo de análise.

Na análise variográfica, regiões com profundidades de até 0.8m forneceram as melhores amostras espaciais de radiância. Semivariogramas experimentais orientados para 0°, 45°, 135° e 225° demonstraram a mesma estrutura do fenômeno e atestaram o comportamento isotrópico dos valores de radiância no espaço (Figura 3). A razão entre o efeito pepita e o alcance, presentes no ajuste do modelo teórico, evidenciam média componente aleatória das amostras.

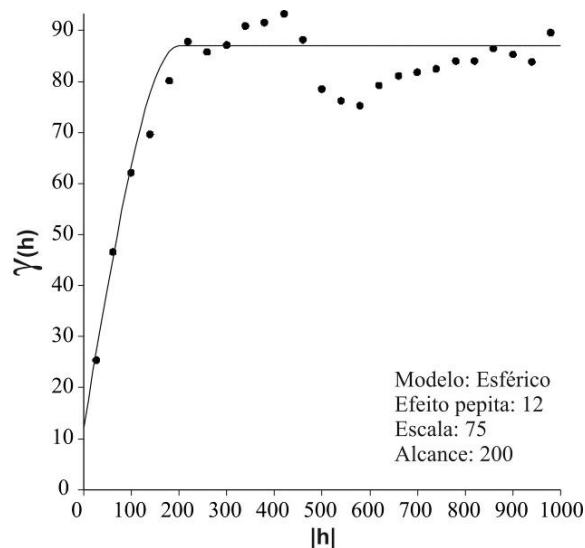


Figura 3. Semivariograma experimental e teórico construído com as amostras aleatórias dos dados de radiância da banda 2.

Após a aplicação do método geoestatístico na banda 2 foi identificada a constante (c) da Equação 2. Uma regressão não-linear entre os dados do ecobatímetro e de radiância da banda 2 resultou em valor de $c = 0.061$; a outra constante ($L_{\lambda 0}$) foi obtida através da mediana dos valores de radiância da própria imagem, sob barras emersas úmidas, sendo $L_{\lambda 0} = 123$. Desta maneira o modelo para a estimação dos valores batimétricos foi obtido através da Equação 2, que incorporando as constantes conhecidas, ficou definido segundo a Equação 3:

$$z = -1/0.061 \ln (\text{Banda 2} / 123) \quad (3)$$

A aplicação do método geoestatístico resultou no aumento da correlação entre os dados estimados e aqueles coletados em campo. Valeriano et al. (2006) utilizou metodologia semelhante para a modelagem de dados topográficos e concluiu que o método geoestatístico eliminou componentes indesejados, como edificações e antenas, mantendo a acurácia dos dados. Este procedimento, empregado nos valores de radiância da banda 2, resultou em um aumento da correlação com os dados batimétricos medidos com ecobatímetro (Figura 4) e

forneceu maior acurácia ao modelo. O desvio padrão das amostras após a interpolação dos dados de radiância foi de $\pm 36\text{cm}$, contra $\pm 43\text{cm}$ sem a aplicação da análise geoestatística.

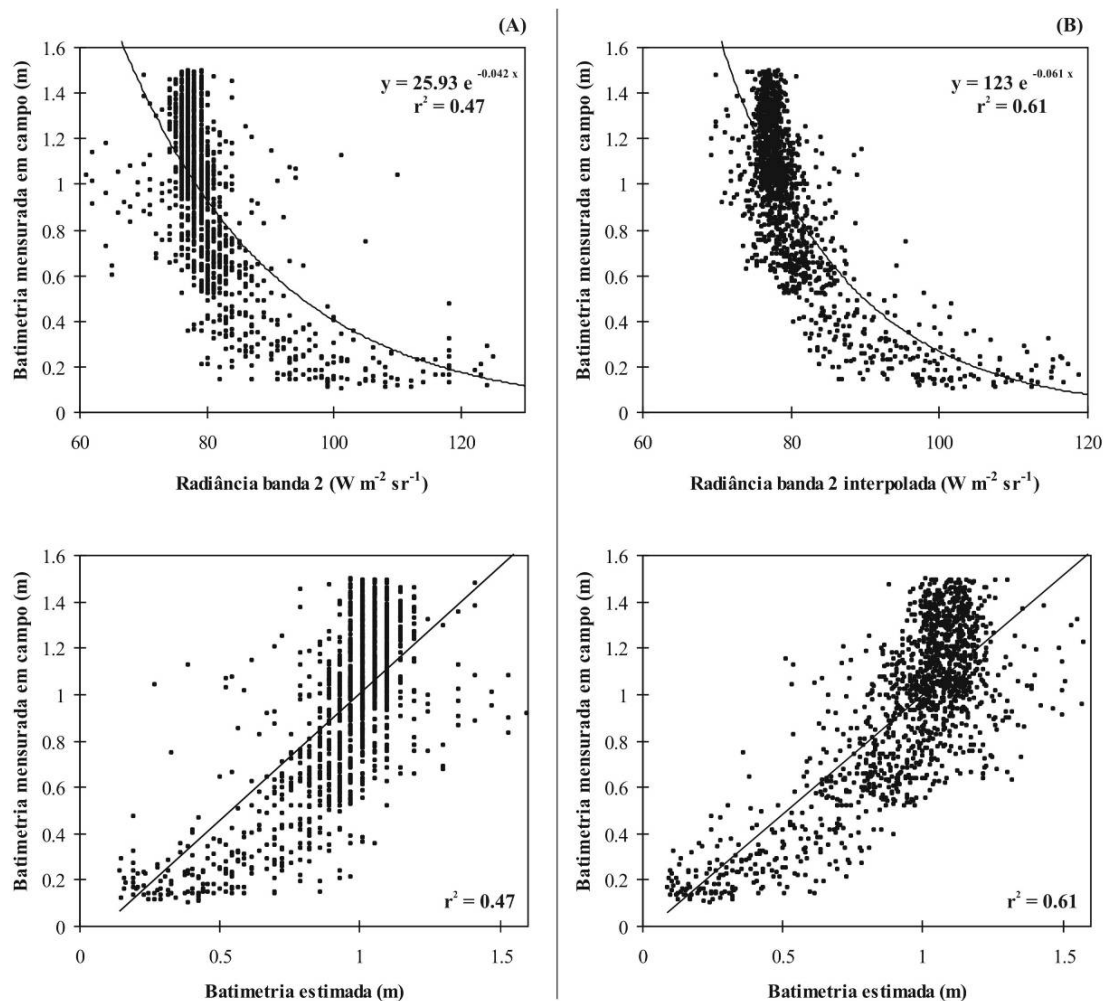


Figura 4. Comparação entre modelos batimétricos. A) sem análise geoestatística; B) com a aplicação do método geoestatístico.

O aumento da correlação entre os dados e o incremento na precisão do modelo sugerem que o método de estatística espacial mitigou a influência radiométrica dos componentes indesejados presentes no canal. Portanto, a maior dispersão presente na Figura 7-A pode ser atribuída à presença de elementos como vegetação macrófita ou carga sedimentar suspensa, que obstruem a visibilidade do leito mas não possuem correlação espacial.

Tolk et al. (2000) concluiu que cargas sedimentares superiores a 100mg/l comprometem a análise das informações radiométricas do leito. No rio Paraguai os valores quantificados em período seco não excedem 25mg/l (Silva, 2006), no entanto a distribuição deste valor não é homogênea. Em canais de padrão meandrante as maiores concentrações de sólidos suspensos estão na parte côncava do canal, em profundidades de 10 a 30cm (Younis, 1996). Zonas próximas às barras não vegetadas também possuem maior volume de sedimentos suspensos. Nestes locais os valores batimétricos extraídos a partir da radiância são subestimados, resultando em valores menores de profundidade (Figura 5). Ao contrário dos sólidos suspensos, as vegetações do tipo macrófita estão espacialmente concentradas em locais de menor turbulência. Regiões marginais, meandros abandonados e braços secundários tenderão

a apresentar valores superestimados (maior profundidade). Portanto, quando se assume que a constante (c) da Equação 3 é homogênea para todo o rio, tem-se um desvio padrão maior dos valores estimados nestas porções do canal.

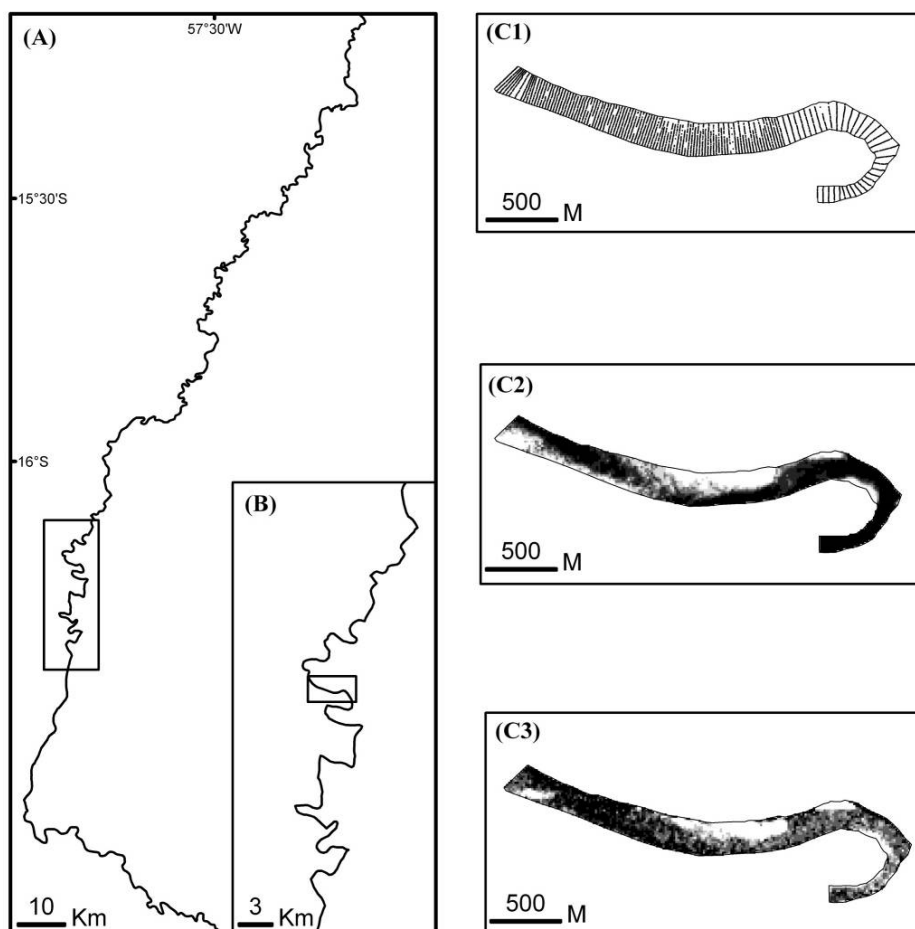


Figura 5. Comparação visual entre dados batimétricos de campo com os obtidos remotamente. A) Trecho estudado do rio Paraguai; B) segmento do rio conhecido por Passagem Velha; C1) malha de dados batimétricos coletados em campo; C2) dados batimétricos de campo interpolados; C3) dados batimétricos extraídos da banda 2 do sensor ASTER. Em preto estão as profundidades maiores que 1.5m, em branco profundidades menores que 0.2m. Nota-se a semelhança entre a morfologia das barras fluviais identificadas. Os valores subestimados na porção côncava de C3 estão associados a maior concentração de sedimentos suspensos nesta porção do canal.

A resolução espacial do produto gerado pelo modelo possui a mesma dimensão do pixel da imagem. Deste modo, a cada 225m² foi estimado um valor de profundidade. A elaboração de perfis transversais a partir dos dados obtidos pelo modelo permitiu identificar a forma do canal e a localização do talvegue (Figura 6). Barras de areia no interior do canal e depósitos de barra em pontal se destacam na representação dos dados, apresentando boa definição batimétrica. Estes elementos possuem um arranjo espacial compatível com a dinâmica de sedimentação em canais fluviais.

No segmento ilustrado pela Figura 6 predomina um padrão retilíneo de canal. Conforme Schumm (1977), rios com esta configuração e que possuem moderada carga sedimentar em

suspensão tendem a favorecer a construção de barras alternadas, justificando a assimetria dos perfis 1, 2 e 4.

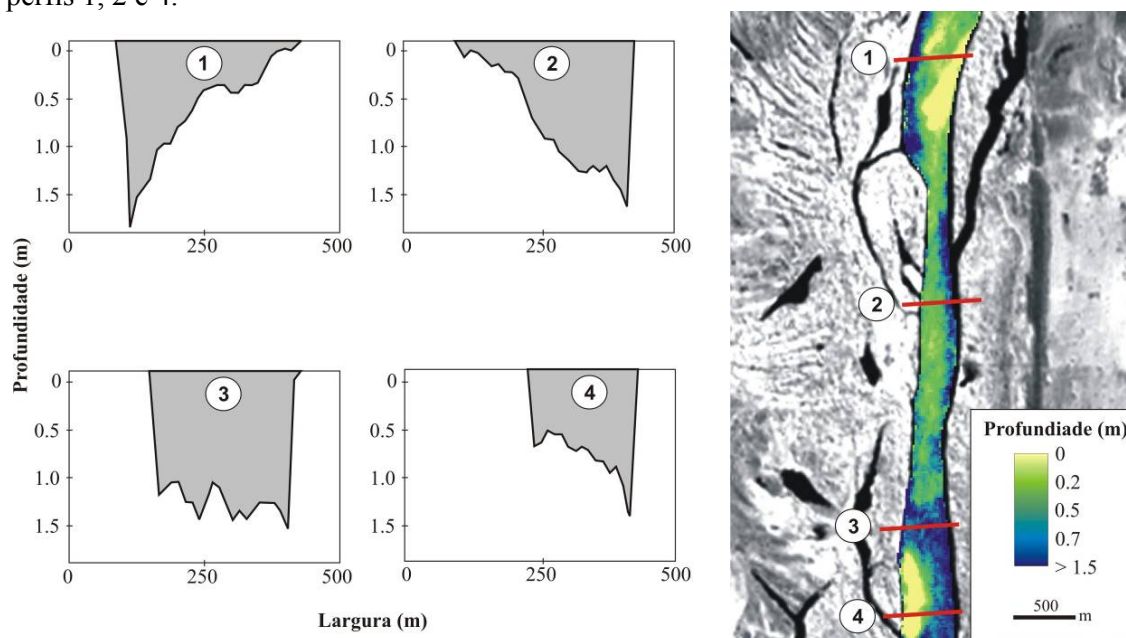


Figura 6. Perfis transversais do rio Paraguai derivados de valores batimétricos estimados a partir de dados orbitais da banda 2, sobrepostos a um recorte da banda 3 do sensor ASTER.

4. Considerações finais

Informações batimétricas coletadas em campo com ecobatímetro possuem alta resolução e abrangência, constituindo o método mais preciso para a caracterização detalhada das profundidades do canal. Projetos de grande porte e de ampla importância regional, como a construção de uma hidrovía, necessitam de informações minuciosas para o planejamento e bom funcionamento do sistema. Neste caso, a coleta de dados de profundidade deve ser realizada com grande controle de campo. Técnicas de sensoriamento remoto, quando empregadas para análise batimétrica, devem ser aplicadas com cautela, porque ainda necessitam de mais testes de confiabilidade.

Este trabalho representa uma contribuição neste sentido. A principal conclusão é que informações obtidas a partir do sensor ASTER permitiram reproduzir com fidelidade as formas e a profundidade do canal, constituindo uma ferramenta de baixo custo para análises expeditas. Avanços recentes na resolução espacial de sensores orbitais comerciais poderão fornecer futuramente dados para a elaboração de produtos com maior detalhe e confiabilidade.

A técnica utilizada pode também auxiliar em estudos sobre a evolução de sistemas fluviais como o do rio Paraguai. Imagens obtidas em diferentes datas podem fornecer importantes informações sobre a dinâmica de sedimentação ao longo do canal, permitindo assim traçar cenários a respeito de seu comportamento futuro.

Agradecimentos

Os autores externam seus agradecimentos à FAPESP pela concessão de bolsa de mestrado a Hiran Zani (06/02381-8) e pelo apoio às pesquisas no Pantanal Mato-Grossense (processo 07/55987-3), ao CNPq pela concessão de bolsa PQ a Mario L. Assine (308724/2006-2) e de doutorado a Aguinaldo Silva; aos professores Paulo M. Barbosa Landim e Edvard Elias de Souza pela leitura crítica do texto, correções e sugestões apresentadas.

Referências bibliográficas

Bryant, R. G.; Gilvear, D. J. Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland. **Geomorphology**, v. 29 n. 3-4, p. 307–321, 1999.

Carbonneau, P. E.; Lane, S. N.; Bergeron, N. Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31 n. 11, p. 1413-1423, 2006.

Fonstad, M. A.; Marcus, W. A. Remote sensing of stream depths with hydraulic assisted bathymetry (HAB) models. **Geomorphology**, v. 72 n. 1-4, p. 320-329, 2005.

Hamilton, M. K.; Davis, C. O.; Pilorz, S. H.; Rhea, W. J.; Carder, K. L. Estimating chlorophyll content and bathymetry of Lake Tahoe using AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44 n. 2-3, p. 217-230, 1993.

Lafon, V.; Froidefond, J. M.; Lahet, F.; Castaing, P. SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 81 n. 1, p. 136-148, 2002.

Legleiter, C. J., Roberts, D. A., Marcus, W. A., Fonstad, M. A. Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat: physical basis and feasibility. **Remote Sensing of Environment**, v. 93 n. 4, p. 493–510, 2004.

Lyon, J. G.; Lunetta, R. S.; Williams, D. C. Airborne multispectral scanner data for evaluating bottom sediment types and water depths of St. Marys river, Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58 n. 7, p. 951-956, 1992.

Lyzenga, D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2 n. 1, p. 71–82, 1981.

Maritorena, S.; Morel, A.; Gentili, B. Diffuse reflection of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. **Limnology and Oceanography**, v. 39 n. 7, p. 1689-1703, 1994.

Schumm, S. A. **The fluvial system**. Nova York, John Wiley and Sons, 1977, 338p.

Silva, A. **Padrões de Canal do rio Paraguai na região de Cáceres–MT**. 2006. 80 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR. 2006.

Silva, A.; Assine, M. L.; Zani, H.; Souza Filho, E.; Araújo, B. Compartimentação geomorfológica do rio Paraguai na borda norte do Pantanal Mato-Grossense, região de Cáceres – MT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59 n. 1, p. 73-81, 2007.

Tolk, B.L., Han, L.; Rundquist, D.C. The impact of bottom brightness on spectral reflectance of suspended sediments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21 n. 11, p. 2259-2268, 2000.

Valeriano, M. M.; Kuplich, T. M.; Storino, M.; Amaral, B. D.; Mendes, J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. **Computer & Geosciences**, v. 32 n. 8, p. 1169-1181, 2006.

Winterbottom, S. J.; Gilvear, D. J. Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. **Regulated Rivers: Research and Management**, v. 13 n. 6, p. 489–499, 1997.

Younis, B. A. Progress in turbulence modeling for open-channel flows. In: Anderson, M.; Walling, D.; Bates, P. (Org.). **Floodplain Processes**. Nova York: Wiley, 1996. Cap. 9. 658p.