

Mapeamento das áreas sazonalmente inundáveis do alto curso do Rio Paraná, utilizando dados altimétricos do SRTM e de imagens aéreas

Tiago Matsuo Samizava^{1,2}
Nilton Nobuhiro Imai²
Paulo Cesar Rocha²

¹ Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB
tiagosamizava@yahoo.com.br;

² Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP
19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
{nnimai, pcrocha}@fct.unesp.br

Abstract. Major flooding or flood pulses are important for the connectivity of different habitats in the floodplain. Thus, this paper attempts to contribute to the understanding of hydrodynamic processes and spatio-temporal connectivity environments of the floodplain of the upper course of the Parana River through mapping of seasonally flooded areas, using altimetry data from the SRTM and extracted by aerial digital images. So, it was applied several procedures on the SRTM data as interpolation-based geostatistics and trend surface modeling to eliminate noises and improve the spatial resolution. The altitude of the aerial images was extracted by photogrammetric methods. The DEM's were referred to the hydrometric level of Porto São José fluviometric station and were sliced into classes for analysis the dynamics of flooding. The quality control of the elevation models were performed using three-dimensional coordinates collected with geodetic GPS and the mapping of flooded areas was compared using orbital images of the TM sensor. The results showed that the models able to create suitable scenarios, and flood static simulations allow outlining a conceptual model more well-defined of the hydrodynamic processes in the fluvial system.

Palavras-chave: Floodplain, SRTM, geostatistic, Planície de inundação, SRTM, geoestatística.

1. Introdução

Os pulsos de inundação são considerados a maior força controladora da biota em sistemas rio-planície de inundação (Junk et al, 1989), que consistem no aumento do nível das águas do rio e transbordamento sobre as margens, inundando as áreas marginais mais baixas, conectando os sistemas lóticos aos outros ambientes da planície de inundação.

Segundo Ward e Stanford (1995), o grau de conectividade espaço-temporal determina os padrões sucessionais, a heterogeneidade de habitats, a produtividade e a biodiversidade, e é responsável pela manutenção da integridade ecológica dos sistemas rio planície de inundação.

Para o rio Paraná a fase de enchimento e vazante conforma períodos complementares do pulso e ambas as fases têm alta capacidade reguladora do macrossistema fluvial por meio de ajustes de equilíbrio, podendo apresentar vários pulsos durante um mesmo ciclo hidrológico, bem como oscilações em curto período de tempo, com intervalos semanais ou diários, que são observados com frequência durante o período de águas baixas (Neiff, 1990; Thomaz et al, 1997).

Devido às características agrícolas e industriais, a bacia do Rio Paraná sofreu intensamente ações humanas nas últimas décadas, sendo que a construção de barramentos comparece como um dos impactos que promoveram alterações mais abruptas no regime hidrológico do rio. Segundo Ward e Stanford (1995), essa forma de controle hidráulico reflete-se na diminuição da variabilidade sazonal do fluxo à jusante, contribuindo para alteração das características hidrodinâmicas e ambientais.

Nesse contexto, é necessário entender como ocorrem os processos de inundação e qual é a influência das alterações hidrológicas nos padrões da conectividade dos ambientes da planície do alto curso do Rio Paraná. O presente trabalho busca auxiliar no entendimento destes processos através do mapeamento das áreas sazonalmente inundáveis utilizando dados altimétricos do SRTM e de imagens aéreas digitais. Destaca-se que o mapeamento utilizando

dados do SRTM foi realizado em toda planície, enquanto que o modelo extraído das imagens áreas compreende apenas um trecho da planície, que será estudado com maior nível de detalhe.

2. Área de estudos

A planície de inundação do alto curso do Rio Paraná (Figura 1) é o último trecho livre de represamento deste rio em território brasileiro, localizado entre os estados de Mato Grosso do Sul e Paraná, a jusante do reservatório de Porto Primavera (S 22° 25' e W 52° 57') e a montante de Porto Guaíra (S 24° 4' e W 54° 15').

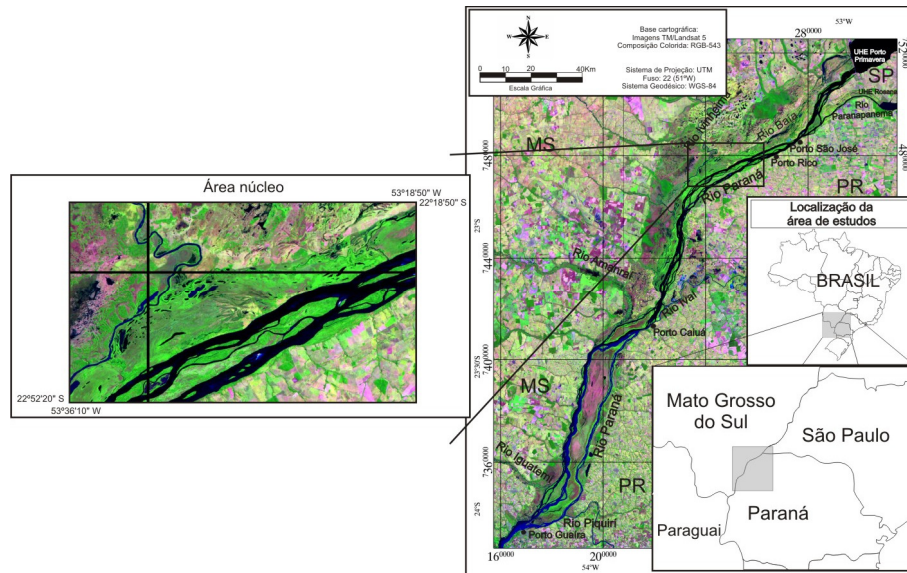


Figura 1. Definição da área geográfica de estudo.

A planície fluvial do alto curso do Rio Paraná apresenta diferentes níveis topográficos e características geomorfológicas particulares. As áreas mais altas topograficamente são representadas por diques marginais, por leques de rompimento de dique marginal e formas de paleobarras, onde ocorre a formação de vegetação do tipo arbórea. Um nível topográfico intermediário é ocupado pelas bacias de inundação, alagadas anualmente pelo Rio Paraná e contribuintes, com vegetação típica de arbustos, herbáceas e higrófilas; enquanto que as áreas mais rebaixadas compreendem áreas inundadas (lagoas, canais ativos/inativos) e as barras do canal do Rio Paraná.

2. Material e Método

2.1. Materiais

Foram utilizados os seguintes dados de sensoriamento remoto para desenvolvimento do presente trabalho:

- Imagens digitais coloridas aéreas de alta resolução espacial, adquiridas por uma câmera digital Hasselblad H3D de 39 megapixels;
- MDE interferométrico do SRTM, adquirido gratuitamente em <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>;
- Imagens do sensor TM/Landsat, adquiridas gratuitamente no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>.

2.2. Metodologia

Os dados altimétricos foram primeiramente tratados para representar o relevo de forma a ajustar-se às características do ambiente e das imagens multiespectrais. Assim sendo, interpolações, análise de tendência e outros processamentos foram aplicados. Finalmente, com simples aplicação da técnica de fatiamento de modelo numérico de terreno com base em pulsos conhecidos foram produzidos cenários que mostram como ocorrem os padrões de conectividade do ambiente, bem como o fluxo e a distribuição espacial da lâmina de água. Esses cenários são confrontados com resultados de mapas de áreas inundadas obtidos da classificação de imagens orbitais do Landsat/TM de algumas datas a fim de analisar a correspondência entre a estimativa baseada nas representações do relevo e as estimativas obtidas das imagens classificadas.

3. Processamento dos dados do SRTM

O mapeamento das áreas sazonalmente alagáveis foi realizada utilizando modelos digitais de elevação (MDE) extraídos de imagens digitais aéreas e dos dados SRTM.

Para os dados do SRTM foi aplicada uma interpolação baseada em geoestatística para correção dos ruídos e reamostragem dos pixels para 30 m (originalmente 90 m), uma vez que segundo Valeriano (2004, 2008), a krigagem apresenta-se como uma abordagem adequada para manusear variações espacialmente aleatórias, como os dados altimétricos. A característica do relevo suavizado pela aplicação da geoestatística não prejudicou a análise, tendo em vista que o processo de inundação foi avaliado de forma regional.

A krigagem ordinária foi aplicada sobre um trecho amostral de 30x30 células, uma vez que uma amostragem maior inviabiliza computacionalmente as análises estruturais. Primeiramente, foram gerados semivariogramas de superfície e direcionais experimentais, ajustando-se um modelo teórico esférico isotrópico com alcance aproximado de 470 m. Após a aplicação da krigagem foi realizada uma análise de tendência, baseada em Galo e Camargo (1994) e Nogueira Jr (2003), aplicando-se o teste t de *student*, utilizando pontos de controle coletados no terreno com GPS geodésico como referência, o qual mostrou que o SRTM apresentou uma tendência positiva em 2 m. A tendência apresentada pode estar relacionada com a influência da vegetação do entorno dos locais de coleta dos pontos de controle.

Considerando que o macrossistema pode ser entendido como um sistema de vasos comunicantes, os processos de inundação dos subsistemas ocorrem primeiramente pelos canais de ligação, ativos ou inativos, passando para áreas mais rebaixadas até as mais altas topograficamente. Baseado nessa concepção considerou-se que o nível d'água da calha do Rio Paraná seria o referencial para as análises de inundação. Como o rio apresenta uma linha de declividade, ajustou-se uma superfície de tendência sobre os dados de elevação do nível d'água do rio. Dessa forma, o Rio Paraná torna-se o referencial para o início das inundações.

Nos ajustes das superfícies de tendência, realizou-se o teste F de *Snedecor* do incremento do polinômio e dos resíduos e verificou-se que a melhoria não é significativa quando se ajusta o polinômio de grau 2, ou seja, uma superfície plana foi adequada para representar a tendência. Além disso, a análise de variância (ANOVA) e teste de hipótese F de *Snedecor* indicou que os coeficientes angulares são diferentes de zero, portanto o modelo ajustado é adequado.

Como o objetivo é analisar as inundações com base nos níveis hidrométricos da estação fluviométrica de Porto São José, a superfície foi referenciada à estação fluviométrica somando-se o valor pontual da cota hidrométrica da estação em todas as células do modelo numérico do terreno. Por fim, o modelo digital é fatiado em classes de inundação. Dessa forma, é feita a seguinte leitura: 3 m de cota representa a área que pode ser inundada a partir da elevação de 3 m na estação fluviométrica de Porto São José.

4. Processamento das imagens aéreas

As imagens digitais aéreas foram adquiridas por levantamento vertical realizado em novembro de 2008, sobre um trecho da planície de inundação, na região de influência do rio Ivinheima e Baía, numa área de 33 x 8 km, aproximadamente. As imagens foram adquiridas com resolução espacial aproximada de 32 cm, obtida por câmeras não métricas (Hasselblad H3D), totalizando 263 fotos.

O tratamento das imagens aéreas e a respectiva extração do modelo digital de elevação foram realizados com base em procedimentos fotogramétricos.

Também foi realizada a análise de tendência das médias de *t* de *student* para a altimetria e foi verificado que a representação do relevo não apresenta tendência em altimetria. Os mesmos procedimentos de supressão da tendência da linha de declividade do Rio Paraná através de ajuste de superfície de resposta foram adotados para o MDE.

5. Produção e análise de cenários

Na Figura 2 apresenta-se o resultado do modelo fatiado em classes de inundação utilizando o SRTM. De forma geral, verifica-se que a região em que ocorrem as inundações está associada à área a montante da foz do Rio Avaí. O compartimento Ilha Grande apresenta ilhas que estão situadas em patamares mais altos topograficamente e dificilmente encontram-se inundados.

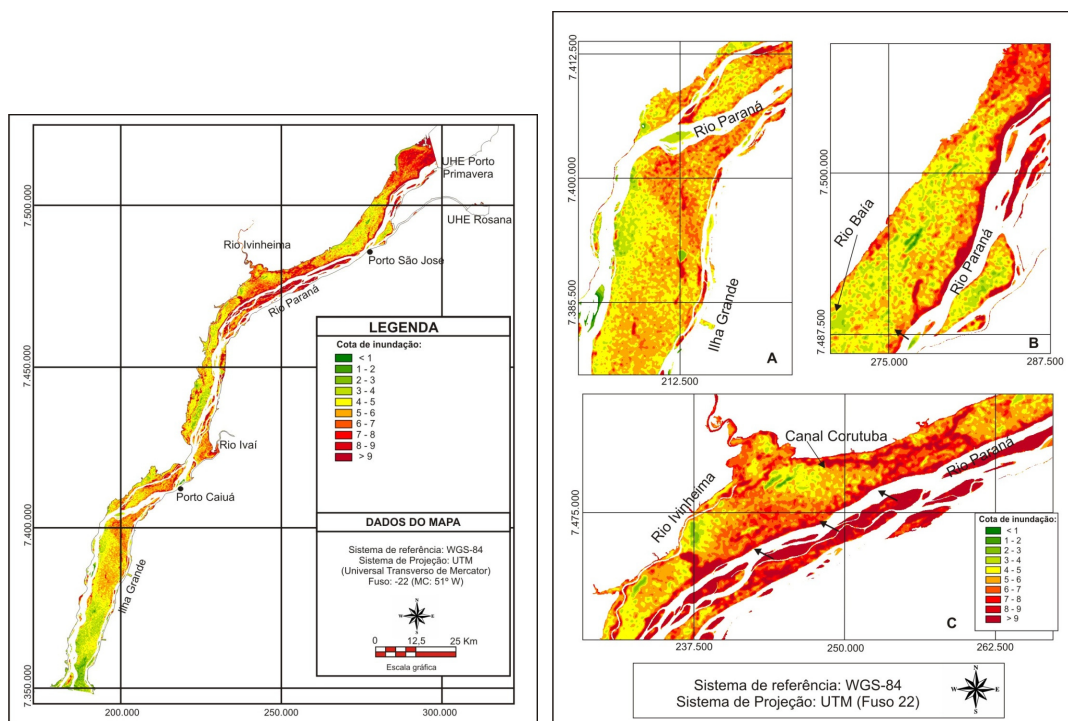


Figura 2 – Níveis de inundação geradas a partir dos dados do SRTM referenciadas às cotas de nível d’água do Rio Paraná na estação Porto São José.

Os diques marginais ocorrem ao longo da planície, com cota acima de 5 m. Entretanto, convém mencionar que a informação de altimetria nas áreas dos diques marginais é influenciada pelas copas das árvores, uma vez que a banda C do radar interferométrico não é capaz de atravessar o dossel. Esses diques compõem-se como barreira natural para a entrada das águas do rio para a planície.

A proporção da área da planície inundada, de acordo com os níveis de lâmina d’água representados a partir das classes fatiadas, pode ser verificada na Tabela 1.

Tabela 1 – Proporção dos pixels da planície para cada classe temática.

Classe	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	>9
Percentagem das classes (%)	0,036	0,001	0,009	0,037	0,116	0,233	0,24	0,134	0,069	0,041
Percentagem das classes acumulada (%)	0,036	0,037	0,046	0,084	0,2	0,432	0,672	0,805	0,874	0,915

Nota-se que até a cota de 5 m, as áreas possivelmente inundadas representam uma área significativa de 20% da área total da planície. A partir dessa cota, o aumento das áreas inundadas é bastante elevado. Atingindo a cota entre 5 a 6 metros, 43,2% da planície pode estar inundada.

A Figura 2 (A) representa a região situada nas proximidades da foz do rio Paranapanema. Verifica-se que boa parte da planície apresenta-se topograficamente mais baixa. Nota-se que os diques marginais estão presentes em toda área da planície. A área mais rebaixada (indicada pela seta) na margem do Rio Paraná representa um rompimento de dique, que serve como entrada das águas do Rio Paraná para o interior da planície. Nota-se que o Rio Baía pode extravasar suas águas para a planície em períodos de cheia, facilitado pela quase inexistência de diques marginais.

A área do compartimento Ilha Grande, Figura 2 (B), indica áreas com topografia relativamente alta, com pouca conectividade com o rio principal e cotas acima de 4 m na região norte e áreas mais rebaixadas na região sul da ilha.

Na Figura 2 (C), complexo Rio Paraná-Ivinheima-Baía, área núcleo onde foi realizado o aerolevantamento, nota-se que existem alguns locais de rompimento de dique que permitem a entrada das águas do Rio Paraná, representados pelas setas. Essas crevasses têm cota aproximada de 5 a 6 m. Nota-se que nesse trecho as áreas mais rebaixadas também podem sofrer influência dos pulsos do Rio Ivinheima, conforme já relatado por Comunello (2001).

A representação computacional que é resultada do fatiamento do MDE gerado a partir das imagens digitais aéreas é apresentada na Figura 3.

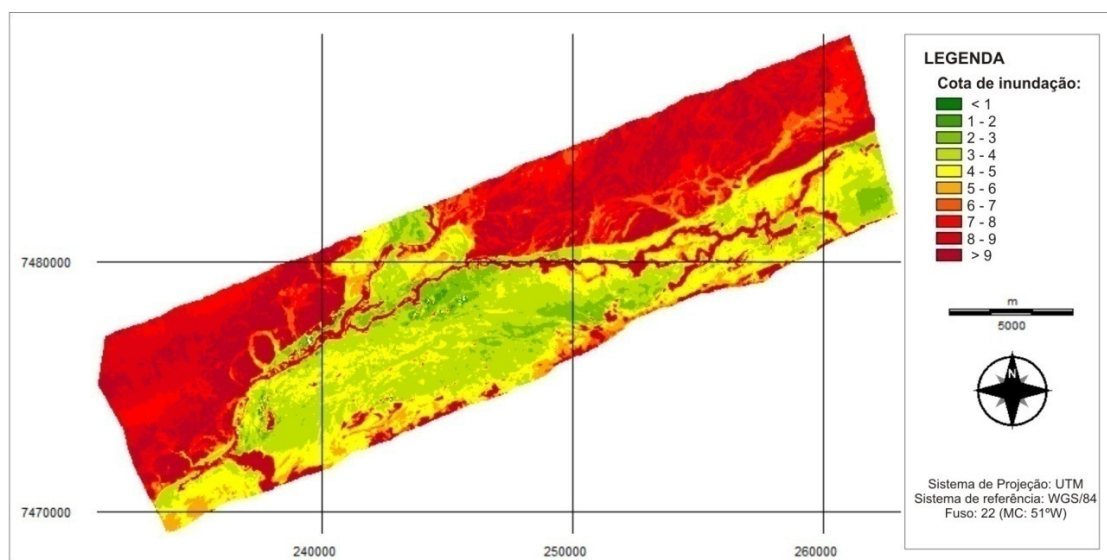


Figura 3 – Níveis de inundação das cotas do nível d'água do Rio Paraná de Porto São José a partir do MDE gerado pelas imagens aéreas.

Verifica-se que as áreas mais rebaixadas são regiões de lagoas e paleocanais, além dos canais distributivos dos rompimentos de dique marginal. O dique marginal apresenta-se bem

definido, com vegetação presente ao longo do mesmo, sob cota de inundação em torno de 6 metros. O limite da planície e do terraço é bem definido, sob cota aproximada de 7 a 8 metros. É possível observar os antigos canais do Rio Paraná e os meandros abandonados do sistema do Rio Ivinheima.

Considerando os níveis de inundação, a cota de 4 metros mostra que boa parte da planície de inundação apresenta-se alagada, o que indica que neste trecho as interações de conectividade são mais intensificadas, sendo, portanto, uma região altamente susceptível ao pulso.

Os níveis de inundação observados são semelhantes ao relatado por Rocha (2002), que delimitou níveis importantes de influência sobre o trecho que compreende o complexo Rio Paraná-Ivinheima-Baía, com base nas cotas fluviométricas da estação de Porto São José: 3,5 m, nível médio do rio que através dos processos de contato de lençol freático mantém perene as lagoas fechadas no interior das ilhas do Rio Paraná; 4,6 m, considerado como estágio de margens plenas, a partir do qual as barras do Rio Paraná são encobertas e inicia-se o processo de entrada da água na planície por alguns canais de ligação até as áreas mais baixas topograficamente; 6 m, cota que a maior parte da planície permanece alagada, com entrada pelos rompimentos de dique marginal; 7 m, estágio de margens plenas naturais, há transbordamento completo na planície e pode ocorrer fluxo sobre ela.

5.1. Avaliação dos cenários de inundação

A seguir foi realizada uma avaliação do modelo computacional gerado a partir do SRTM. Na Figura 4 apresentam-se as áreas inundadas estimadas a partir de imagens TM e pela superfície gerada, considerando diferentes cotas fluviométricas da estação de Porto São José.

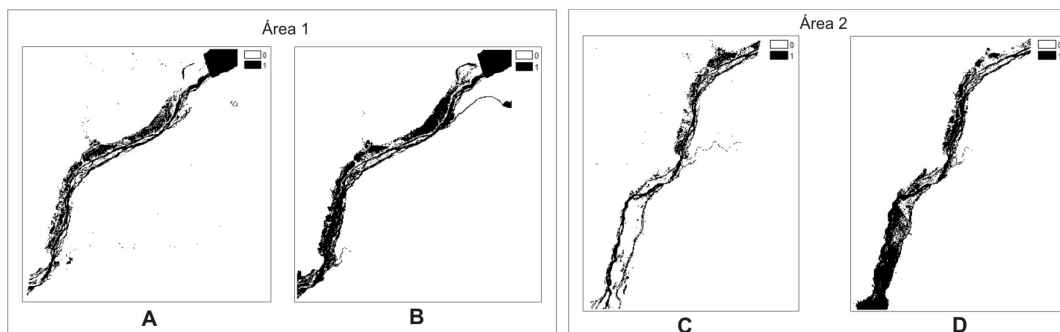


Figura 4 – Área 1: Comparação entre as áreas inundadas a partir (A) de imagens TM e (B) pela superfície gerada sob cota do nível d'água de 6,4 metros na estação fluviométrica de Porto São José. Área 2: Comparação entre as áreas inundadas a partir (C) de imagens TM e (D) pela superfície gerada sob cota do nível d'água de 5,67 metros na estação fluviométrica de Porto São José.

Na Figura 4 (A), apresenta-se o resultado da limiarização da banda 4 da imagem TM tomada em fevereiro de 2007, quando ocorreu uma elevação do nível da água, tendo sido registrado 6,4 m na estação fluviométrica de Porto São José, enquanto que na Figura 4 (B) é apresentado uma simulação das áreas alagadas, realizada com base nos dados SRTM, considerando a mesma cota de inundação. Também se apresenta o resultado da limiarização aplicado na banda 4 da imagem TM tomada em abril de 1991, sob cota do nível d'água de 5,67 m, e sua respectiva simulação com dados SRTM (Figura 4 – C e D, respectivamente).

De forma geral, visualmente, nota-se que a área 1 apresenta maior coerência em termos de distribuição espacial das áreas inundadas. Na área 2, verifica-se a existência clara de uma superestimação de áreas inundadas, principalmente na região de Ilha Grande. Também foi gerada uma tabulação cruzada entre os mapas temáticos para avaliação do grau de concordância global entre as representações computacionais. Para a área 1, foi calculado o valor de 76,36 de exatidão global e índice kappa de 0,4884, que segundo Landis e Koch (1977

apud MOREIRA, 2005), indica boa qualidade na simulação. Em relação à área 2, a exatidão global e kappa foram de 59,5% e 0,2327, respectivamente, mostrando uma perda de qualidade da simulação, embora Landis e Koch (1977 apud MOREIRA, 2005) consideram esse valor de kappa razoável.

Deve-se considerar ainda que a resolução espacial e acurácia vertical do SRTM não permitem uma análise com maior nível de detalhamento. Além disso, a reconstrução da superfície por geoestatística reduz os picos de mínimos e máximos, suavizando a representação. Outro fato que merece ser destacado é que a planície é vegetada, portanto, as imagens TM da banda 4, tomadas como referência, não são verdades absolutas. O alagamento pode ocorrer, mas nem sempre ela cobre a vegetação, e dessa forma, não é captada por sensoriamento remoto.

Também se devem considerar os alinhamentos estruturais geológicos presentes ao longo do alto curso do rio, que foram descritos por Souza Filho e Stevaux (1997). Esses diferentes alinhamentos estruturais provocam alterações nos gradientes de linha d'água, variando em cada região, o que ocorreu de forma mais intensa no compartimento de Ilha Grande. Em avaliações preliminares, o grau de correlação entre o nível d'água da estação fluviométrica de Porto São José e a estação Porto Caiuá são altas e torna-se menor entre as estações de Porto São José e Porto Guaíra. Esse fato mostra que a linha de declividade altera-se ao longo do rio. Dessa forma, uma das alternativas para melhorar a representação da simulação é tratar a região em blocos.

A Figura 5 apresenta a comparação entre o fatiamento na cota de 5,67 m da superfície gerada a partir das imagens aéreas.

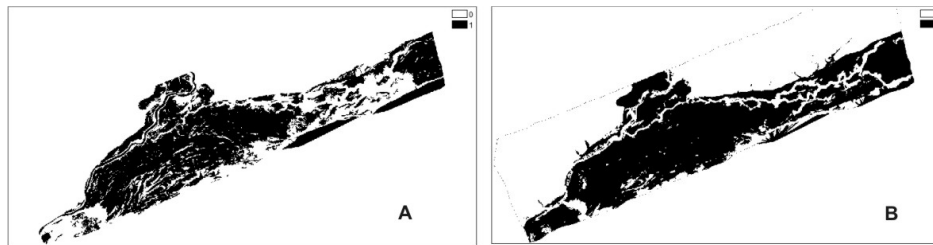


Figura 5 – Comparação entre as áreas inundadas a partir de imagens TM (A) e pela superfície gerada a partir das imagens aéreas (B) sob cota do nível d'água de 5,67 metros na estação fluviométrica de Porto São José.

Para essa superfície a exatidão global atingiu 73,64%, enquanto que o kappa foi de 0,3569. Nota-se que houve uma superestimação das áreas alagadas. A acurácia do fatiamento do MDE gerado a partir de imagens digitais aéreas não é tão elevada, mas não se pode comparar com os resultados obtidos com o SRTM, uma vez que o recorte espacial é diferente.

6. Considerações finais

A abordagem adotada permitiu obter um referencial para os processos de inundação e avaliar o total da área que é alagada na planície de acordo com a cota fluviométrica da estação Porto São José. Verificou-se que a taxa de acurácia global da simulação foi de, aproximadamente, 76% e 56% em dois cenários utilizando o SRTM e 74% com o MDE gerado a partir das imagens aéreas, que indica que a abordagem adotada é válida, possibilitando entender de forma mais detalhada os processos de inundação e os padrões de conectividade na planície fluvial.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq e a CAPES pelo auxílio financeiro, à FAPESP pela bolsa de mestrado e à UNESP que, através do Programa de Pós-Graduação em

Ciências Cartográficas e do Departamento de Cartografia, forneceram o suporte físico necessário ao desenvolvimento do trabalho.

Referências bibliográficas

- Comunello, E. **Dinâmica de inundação de áreas sazonalmente alagáveis na planície aluvial do alto rio Paraná**. 2001. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ambientes Aquáticos) – Universidade Estadual de Maringá – Maringá.
- Galo, M.; Camargo, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: **1 ° COBRAC – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, Florianópolis, 1994.
- Junk, W.J.; Bayley, P.B.; Sparks, R.E. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. In: **D.P. Dodge (Ed) Proceedings of the International Large River Symposium. Can. Spec. Public. Fish. Aquat. Sci.**, 106. p.110-127, 1989.
- Moreira, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320p.
- Neiff, J.J. Ideas para la interpretacion ecologica del Parana. **Interciencia**, v.15, n.6, p.424-441, 1990.
- Nogueira Jr, J. B. N. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- Rocha, P. C. **Dinâmica dos Canais no Sistema Rio-Planície Fluvial do Alto Rio Paraná, nas Proximidades de Porto Rico-PR**. 2002. Tese (Doutorado em Ecologia de ambientes aquáticos) – Universidade Estadual de Maringá – Maringá.
- Souza Filho, E. E. ; Stevaux, J. C. Geologia e geomorfologia do complexo rio Baía-Corutuba-Ivinheima. In: Vazzoler, A. E. A. M., Agostinho, A. A.; Hahn, N.S. (Org.). **A planície de inundação do alto rio Paraná**. 1 ed. Maringá: EDUEM, 1997, v. 1, p. 01- 45.
- Thomaz, S. M. ; Roberto, M.C. ; Bini, L. M. Fatores limnológicos e clorofila-a: caracterização dos habitats e influência do pulso de inundação In: VAZZOLER, A. E. A. M., AGOSTINHO, A. A.; HAHN, N.S. (Org.). **A planície de inundação do alto rio Paraná**. 1 ed. Maringá: EDUEM, 1997, p. 71-100.
- Valeriano, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. (Boletim).São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004, 72p.
- Valeriano, M. M. Dados topográficos. In: Teresa G. Florenzano (Org.) **Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008, p. 72-104.
- Ward, J.V. & Stanford, J.A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystem and its disruption by flow regulation. **Regulated Rivers: Research & Management**, vol. 11, p.105-119, 1995.