

Atualização e correção do delineamento de áreas alagáveis da bacia Amazônica

Rafael Damiati Ferreira
Joaquim Antônio Dionísio Leão
Thiago Sanna Freire Silva
Camilo Daleles Rennó
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo
Cláudio Clemente Faria Barbosa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{rafael, joaquim, camilo, claudio}@dpi.inpe.br; {thiago, evlyn}@dsr.inpe.br

Abstract. Delineation and characterization of areas subject to periodical inundation remains a challenge in the study of Amazonian wetlands, considering the geographical complexity of these environments. Hess et al. (2003) performed the only existing wetland habitat map for the mainstem Amazon floodplain, using synthetic aperture radar images from the Japanese Earth Resources Satellite – 1 (JERS-1). These authors have produced a wetlands mask product for the entire basin, which has been used extensively by researchers. Recent studies have shown, however, evidence of geometric distortion and mapping inconsistencies in this product, resulting from the process of automatic delimitation. The present paper analyzes a procedure for revision and correction of the original mask product, identifying the main types of distortion and comparing area differences between original and edited products. The revision procedure was based on visual interpretation and manual digitization of the original mask product, based on three main image sources: the original JERS-1 high water mosaic, the Shuttle Radar Topography Mission global elevation dataset, and a mosaic of orthorectified LandsatTM + images from the GeoCover dataset. The use of two additional sources was invaluable to resolve ambiguities and inconsistencies in areas where JERS-1 images did not allow clear distinction of wetlands. Considering the first 40 1° x 1° grid cells edited to date, the results show that the difference in area between the original and corrected masks was of approximately 3500 km² (3% of the total corrected area). Grid cells with the largest variation had a decreasing trend in area, reaching up to 16%. Most grid cells, however, had up to 10% reduction over the originally mapped area, suggesting a slight overestimation of the wetlands by Hess et al. 2003 research.

Palavras-chave: Amazon River, wetlands mapping, synthetic aperture radar, rio Amazonas, mapeamento de áreas alagáveis, radar de abertura sintética.

1. Introdução

A bacia Amazônica é considerada a maior bacia hidrográfica do mundo, com aproximadamente 6.900.000 km² de extensão (Neill et al., 2006). Seu principal curso d'água, o rio Amazonas, possui mais de 3.000 km de extensão, se considerados também seus três principais tributários: Negro, Solimões e Madeira. Ao longo de toda essa extensão são observados ambientes com características geográficas e biológicas distintas, dos quais se destacam as áreas alagáveis, ou *wetlands*.

Os ecossistemas alagáveis amazônicos possuem um alto valor ecológico, devido a suas múltiplas funções, dentre elas: i) alta biodiversidade (Goulding et al., 1996; Junk et al., 2000); ii) elevada produtividade primária de suas florestas e macrófitas aquáticas (Parolin et al., 2004; Piedade et al., 1994); iii) diversidade de habitats (Junk et al., 2012); e iv) relevância no balanço de carbono (Melack et al., 2004; Richey et al., 2002). As áreas alagáveis também possuem grande importância socioeconômica, visto que são fonte de recursos para as populações que ali habitam, e têm sofrido constante pressão e degradação (Renó et al., 2011).

Um dos maiores desafios no estudo das áreas alagáveis na Amazônia é a sua delimitação e caracterização, tendo em vista a complexidade geológica e biológica destes ambientes e sua extensão continental e sazonalidade. A duração e extensão do pulso de inundação na planícies do rio Amazonas e seus tributários afetam diretamente as características da vegetação (cobertura, estrutura e diversidade), bem como a dinâmica de circulação e qualidade da água

(Affonso et al., 2011; Bonnet et al., 2008; Ferreira, 2000). Por outro lado, diversas áreas interfluviais são sujeitas a eventos de precipitação locais e não seguem o pulso de inundação da bacia, aumentando ainda mais a dificuldade da caracterização da extensão de áreas alagáveis.

Técnicas de processamento de dados de sensoriamento remoto tem sido empregadas com sucesso para a caracterização dos ambientes alagáveis na Amazônia, tanto para a delimitação da extensão e duração das inundações (Arnesen et al., 2012; Hess et al. 1995, 2003; Sippel, et al., 1998), quanto para estudos da cobertura e mudanças de uso do solo nestas áreas (Hess et al., 2003; Renó et al., 2011; Silva et al., 2010).

Hess et al. (2003) realizaram o único mapeamento existente dos tipos de habitats de áreas alagáveis para a região central da planície de inundação amazônica, através de imagens SAR do satélite *Japanese Earth Resources Satellite – 1 (JERS-1)*, nos períodos de cheia e seca entre 1995 e 1996. A mesma metodologia foi empregada para produzir uma máscara de áreas alagáveis para toda a bacia amazônica, disponibilizada como produto para toda a comunidade científica (Richey et al., 2002). Os resultados desta pesquisa mostraram que cerca de 17% da bacia Amazônica é ocupada por diferentes tipos de áreas alagáveis.

Deste então, diversos trabalhos tem utilizado esta máscara para estudos em escalas locais e regionais na bacia Amazônica (Affonso et al., 2007; Alsdorf et al., 2007; Melack et al., 2004; Renó et al., 2011; Richey et al., 2002). Entretanto, a utilização da máscara para estudos locais apresenta algumas limitações. Uma análise minuciosa revela a existência de distorções geométricas locais, resultantes do processo automático de geração da máscara, bem como a presença de inconsistências no mapeamento. Além disso, tendo em vista que o pulso de inundação se propaga pela calha ao longo do tempo, é possível que a extensão mapeada originalmente possa não corresponder à área máxima inundável.

Dessa forma, torna-se necessária a atualização e correção do delineamento das áreas alagáveis apresentadas pela máscara original. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para revisão e correção da máscara de áreas alagáveis proposta por Hess et al. (2003), e avalia o resultado da aplicação desta metodologia para um subconjunto da máscara original, apresentando as principais distorções encontradas e comparando a variação em forma e área entre a máscara original e o produto editado.

2. Metodologia de Trabalho

A fim de minimizar as distorções geométricas observadas, Rennó et al. (2013) desenvolveram uma metodologia para o ajuste da máscara de áreas alagáveis de Hess et al. (2003) aos dados do DEM-SRTM (Modelo Digital de Elevação obtido pela *Shuttle Radar Topography Mission*). O DEM-SRTM é um produto de dados de elevação obtido por interferometria, realizado no ano de 2000, e está disponível com resolução espacial de 90 metros para o Brasil (Farr et al., 2007). Durante o processo de correção geométrica, uma série de inconsistências foi identificada, dentre as quais: i) alta densidade de polígonos; ii) polígonos pequenos e isolados; iii) bordas grosseiras; iv) descontinuidade de rios; vi) confusão entre áreas alagáveis e áreas de desmatamento; e vii) áreas alagáveis em regiões de alta elevação. Maiores detalhes sobre a correção geométrica da máscara podem ser encontrados em Rennó et al. (2013).

Após a etapa de correção geométrica, foi iniciado o trabalho de edição manual da máscara por meio da interpretação visual dos mosaicos de imagens de radar de abertura sintética JERS-1 (1996 a 2000), do DEM-SRTM e do produto GeoCover (2000), visando corrigir manualmente as inconsistências acima descritas. O produto GeoCover é um mosaico de imagens TM/Landsat ortorretificadas e processadas com um alto padrão de qualidade (GLCF, 2012). Nos casos em que o DEM-SRTM não permitia a distinção clara das áreas alagáveis, foram consultados os mosaicos JERS-1 e GeoCover, para resolver ambiguidades. Em

situações extremas, nas quais nenhum dos produtos citados era capaz de identificar as áreas alagáveis com confiabilidade, as imagens de alta resolução disponibilizadas na plataforma Google Earth™ foram também utilizadas.

Por meio da interpretação visual das imagens foram identificados os trechos com erros de omissão e comissão, sendo estes posteriormente corrigidos através de edição matricial. Esta etapa foi realizada utilizando o software Spring 5.1.8 (Câmara et al., 1996). Considerando-se a resolução espacial de 90 metros do DEM-SRTM, a escala de 1:100.000 foi adotada para a realização de todo o procedimento. Além disso, foram desconsiderados da máscara os corpos d'água com largura inferior a 200 metros.

Devido à grande dimensão da bacia Amazônica, optou-se por dividir a área em quadrículas de 1° x 1° para facilitar a manipulação dos dados. A edição matricial foi iniciada pela calha principal dos rios Solimões e Amazonas, sendo consideradas para as análises desse estudo 40 quadrículas editadas até o momento: F24 a F28, G24 a G28, H24 a H28, I16, I20 a I28, J16 a J28 e K17 a K19.

3. Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta a comparação de áreas alagáveis em um recorte próximo à Manaus-AM. Observam-se mudanças significativas da máscara editada em relação à máscara original. Na original, observa-se que foram mapeadas áreas alagáveis dentro da mancha urbana de Manaus (manchas amarelas) ocorrendo clara descontinuidade no mapeamento, correspondentes à junção de diferentes imagens JERS-1 na composição do mosaico. Também são observadas falhas na área alagável da máscara original na região próxima à confluência dos rios Negro e Solimões. Neste caso, o procedimento automático realizado por Hess et al. (2003) sobre as imagens JERS não permitiu discriminar corretamente os alvos terra firme e área alagável. Na área de terra firme entre os rios Negro e Solimões, pode ser observado o desaparecimento de pequenos corpos d'água na máscara editada, tendo em vista os critérios adotados na metodologia. Por fim, a versão editada apresenta melhor detalhamento dos limites entre as áreas alagáveis e áreas de terra firme. Destaca-se, por exemplo, a região dos igarapés Educandos e São Raimundo na área urbana de Manaus, que não estavam presentes na máscara original, mas foram incluídos na editada.

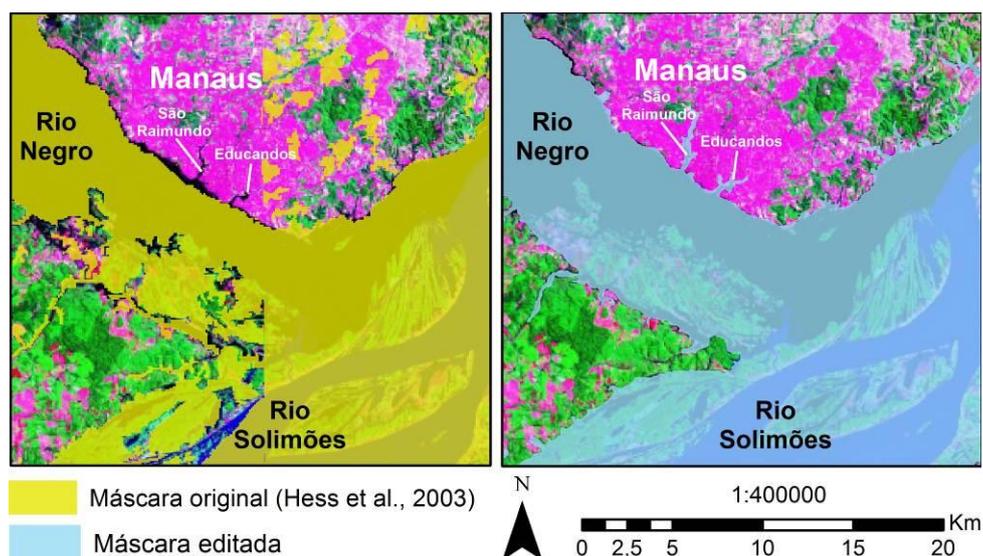


Figura 1. Comparação do delineamento de área alagável para a calha do Rio Amazonas e tributários, em uma área próxima à Manaus-AM, sobre um mosaico TM/Landsat 7R4G3B GeoCover (2000). As cores, amarela e azul, indicam a área alagável original e editada, respectivamente.

Para avaliar a variação absoluta e relativa de áreas entre a máscara original e a editada, foram calculadas as diferenças por regiões, seguindo as quadrículas previamente estabelecidas. A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dessas diferenças para as 40 quadrículas avaliadas até o momento. Observa-se que os valores de diferença absoluta total são negativos, o que sugere que o mapeamento realizado por Hess et al. (2003) superestima ligeiramente a extensão das áreas alagáveis. Ainda assim, a variação relativa total entre as áreas original e editada são da ordem de 3%, indicando que as diferenças de estimativa são pequenas em relação ao total de áreas alagáveis da bacia.

Tabela 1. Estatística descritiva das áreas da máscara original e editada.

	Área original - Hess et al., 2003 (km ²)	Área editada (km ²)	Diferença absoluta (km ²)	Diferença relativa (%)
Total	113.050,02	109.582,04	-3.467,98	-3,07
Mínimo	7,76	7,50	-533,62	-51,30
Máximo	7.183,16	7.032,29	113,00	1,96
Média	2.757,32	2.672,73	-84,58	-7,26
Desvio Padrão	2.324,70	2.295,96	100,52	10,81

A Figura 2 apresenta a distribuição das quadrículas ao longo da calha dos rios Solimões e Amazonas. De maneira geral, as quadrículas da calha localizadas no estado do Amazonas (entre Tefé e Parintins), apresentaram o menor percentual de variação (quadrículas verdes). Por outro lado, nota-se a existência de quadrículas com maior variação na porção leste da calha (quadrículas vermelhas), já no estado do Pará.

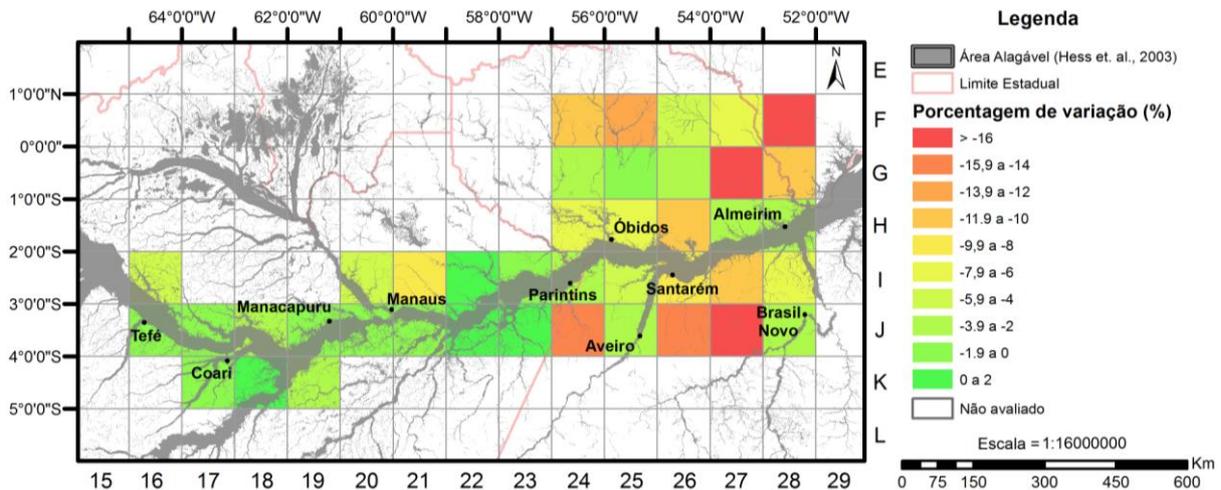


Figura 2. Distribuição das quadrículas de edição da máscara de áreas alagáveis na bacia Amazônica, com destaque para as áreas já editadas na calha dos rios Solimões e Amazonas. As quadrículas em branco correspondem às regiões não avaliadas, enquanto as coloridas representam a porcentagem de variação entre as áreas originais e editadas.

As quadrículas F28, G27 e J27 apresentaram as maiores taxas de variação dentre as 40 analisadas, sendo regiões com as menores extensões de áreas alagáveis dentro da quadrícula. Nestas regiões, pequenas edições podem produzir alterações significativas em termos de porcentagem da área alagável. Outro fato a ser destacado é que as quadrículas com maiores

percentuais de variação estão localizadas mais distantes da calha principal do rio Amazonas, caracterizando-se por menor extensão e menor suscetibilidade ao pulso de inundação anual.

Também é possível inferir que a ocupação humana nas áreas alagáveis dificulta sua detecção, tendo em vista que altera a cobertura do solo. O estado do Amazonas, menos antropizado, caracteriza-se pela presença de ambientes mais preservados em relação ao estado do Pará, onde a floresta já foi mais alterada. Assim, as quadrículas com as maiores alterações próximas da calha correspondem às áreas urbanizadas, nas regiões dos municípios de Manaus, Óbidos e Santerém.

A maior parte das quadrículas analisadas apresentou variação absoluta em área de até 120 km², ou 10% em relação à área original (Figura 3). Estes resultados sugerem que a edição da máscara realizada no presente trabalho não afeta significativamente os estudos regionais, que considerem a bacia Amazônica em sua totalidade. Esta afirmação está baseada no fato de que a maior parte das quadrículas editadas até o momento não apresentou grandes variações de área em relação à máscara original.

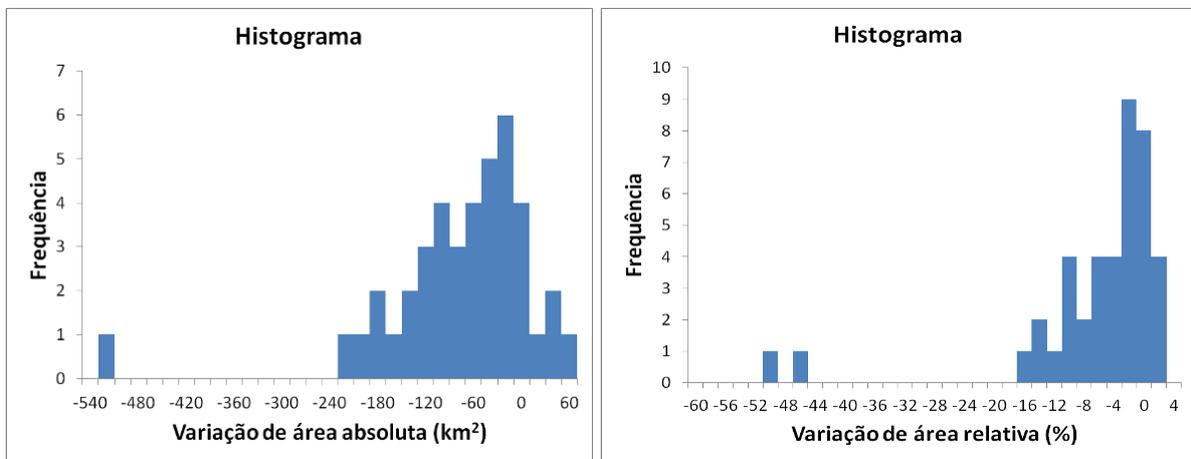


Figura 3. Histogramas apresentando a distribuição de frequência das variações absoluta e relativa nas áreas editadas em relação às áreas da máscara original de áreas alagáveis proposta por Hess et al. (2003) para a bacia Amazônica.

Uma comparação entre as áreas originais e editadas de uma quadrícula com alta porcentagem de variação pode ser observada na Figura 4. Nesse caso, destaca-se o desaparecimento de diversos trechos pequenos de áreas alagáveis ao longo da rede de drenagem, novamente em função dos critérios metodológicos adotados. Esta região está contida na quadrícula J27, que apresentou 17% de variação de área alagável. Conforme exposto anteriormente, essa grande variação pode ser explicada pela pequena extensão de áreas alagáveis no local, onde pequenas alterações podem gerar um alto percentual de variação na máscara.

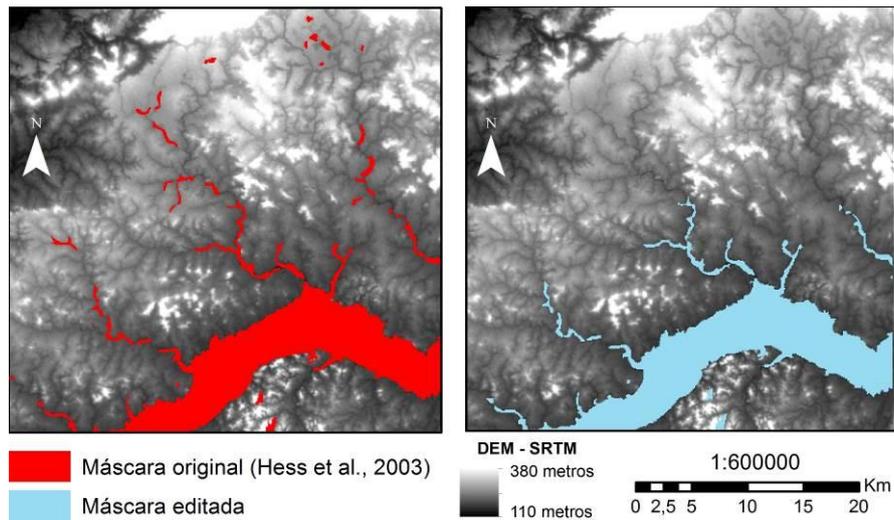


Figura 4. Comparação de área alagável na quadrícula J27, próxima ao município de Novo Brasil-PA, sobre um mosaico DEM-SRTM. As cores vermelho e azul indicam a área alagável original e editada, respectivamente.

O detalhamento de uma área contida na quadrícula H26 (Figura 5) destaca a importância de se considerar o produto DEM-SRTM na correção da máscara original. Não é possível determinar exatamente os limites da área alagável através das imagens JERS, utilizadas no mapeamento original. Por outro lado, as imagens DEM-SRTM auxiliam nessa distinção, uma vez que as áreas alagáveis se concentram em regiões de baixo relevo, apresentando tons de cinza mais escuros em relação aos demais e favorecendo a diferenciação das áreas de interesse (alagável e não alagável).

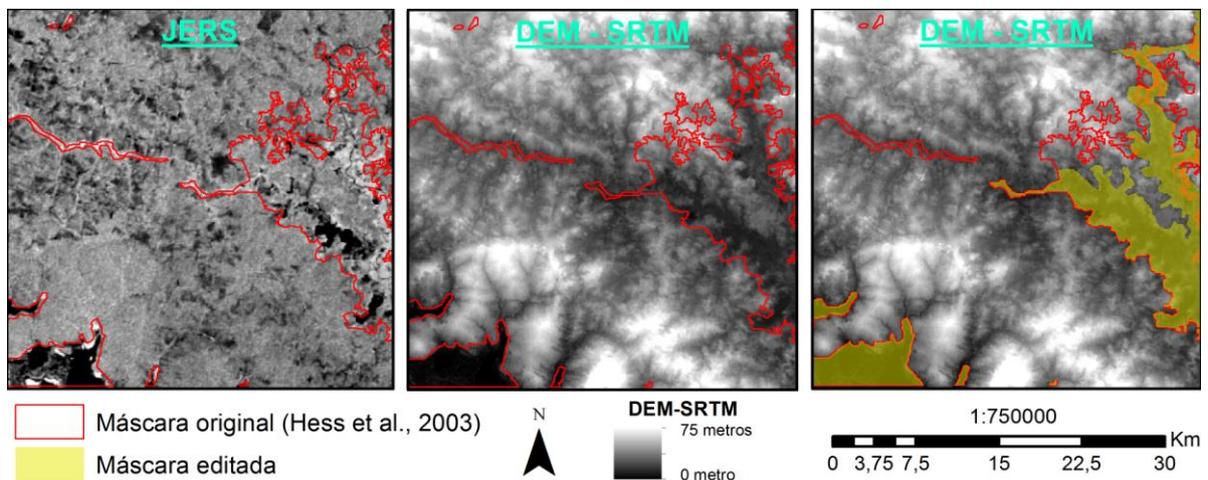


Figura 5. Comparação de área alagável em um recorte da quadrícula H26, próxima à Óbidos-PA, sobre os mosaicos JERS e DEM-SRTM. As linhas em vermelho indicam as áreas alagáveis da máscara original, enquanto as áreas em amarelo representam a máscara após a edição. Notar a exclusão de um polígono longilíneo na porção oeste, de acordo com o limite mínimo de tamanho estabelecido para o presente estudo.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a diferença de área da máscara editada em relação à original (Hess et al., 2003), nas 40 quadrículas analisadas, foi de aproximadamente 3500 km², ou 3% da área total. As quadrículas que apresentaram a maior

variação foram F28, G27 e J27, todas com redução de área de ordem maior do que 16%. O grande percentual de variação da área da máscara nestas quadrículas é consequência dos baixos valores absolutos na região. Assim, pequenas alterações de tamanho das áreas alagáveis podem gerar um alto percentual de variação na máscara.

A maior parte das quadrículas apresentou diferença absoluta negativa de área em até 120 km², ou seja, uma redução de até 10% em relação à área original. Por outro lado, as quadrículas com aumento de área não ultrapassaram a diferença de 60 km². Este fato sugere uma leve superestimação das áreas alagáveis mapeadas por Hess et al. (2003).

Apesar da variação de área não ser significativa, tendo em vista as grandes dimensões da bacia Amazônica, a alteração de forma e localização das bordas da máscara são bastante visíveis. Neste sentido, a correção através da interpretação visual das imagens possui grande importância para estudos locais, nos quais é necessária a delimitação exata das áreas alagáveis. Por fim, é preciso destacar que uma análise mais detalhada poderá ser realizada quando o procedimento de edição da máscara estiver concluído para toda a bacia Amazônica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Processos 382199/2012-0 e 383019/2010-9) e a FAPESP (Processo 2010/11269-2) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

Affonso, A. G.; Novo, E. M. L. M.; Melack, J. M.; Hess, L. L. Identificação e quantificação do desflorestamento nas áreas alagáveis nos municípios à margem do Rio Solimões / Amazonas nos estados do Pará e Amazonas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3235-3242. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-14678-PRE/9652). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.24.18.53>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

Affonso, A. G.; Barbosa, C.; Novo, E. M. L. M. Water quality changes in floodplain lakes due to the Amazon River flood pulse: Lago Grande de Curuaí (Pará). **Brazilian Journal of Biology**, v. 71, n. 3, p.601-610, 2011.

Alsdorf, D.; Bates, P.; Melack, J.; Wilson, M.; Dunne, T. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L08402, 5 pp., 2007.

Arnesen, A. S.; Silva, T. S. F.; Hess, L. L.; Novo, E. M. L. M. Flood extent monitoring of the Amazon River floodplain using ScanSAR/ALOS data. In: International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis, 4. (GEOBIA), 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2012. p. 309-314. On-line. ISBN 978-85-17-00059-1. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3BSRHFB>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

Bonnet, M. P.; Barroux, G.; Martinez, J. M.; Seyler, F.; Moreira-Turcq, P.; Cochonneau, G.; Melack, J. M.; Boaventura, G.; Maurice-Bourgoin, L.; León, J. G.; Roux, E.; Calmant, S.; Kosuth, P.; Guyot, J. L.; Seyler, P. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1-2, p. 18-30, 2008.

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas U. M.; Garrido, J. C. P. Spring: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v. 15, n.6, p.13-22, 1996.

Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D.; Alsdorf, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, n. 45, RG2004, 2007.

Ferreira, L.V. Effects of flooding duration on species richness, floristic composition and forest structure in river margin habitat in Amazonian blackwater floodplain forests: implications for future design of protected areas. **Biodiversity and Conservation**, n. 9, p. 1-14, 2000.

Global Land Cover Facility (GLCF). **GeoCover Technical Guide**. University of Maryland. Institute for Advanced Computer Studies. 2012. Disponível em: <http://glcf.umiacs.umd.edu/library/guide/techguide_geocover.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2012.

Goulding, M.; Smith, N.J.H. **Floods Fortune - Ecology & Economy Along the Amazon**. Colombia University Press, New York, 1996, 193p.

Hess, L. L.; Melack, J. M.; Filoso, S.; Wang, Y. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, July, 1995.

Hess, L. L.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C. F.; Gastil, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428, 2003.

Junk, W. J. **Central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system**. New York: Springer, 1997. 548 p.

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Schongart, J.; Wittmann, F. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). **Wetlands Ecology and Management**, v. 20, p. 461-475, 2012.

Junk, W.J., Ohly, J.J., Piedade, M.T.F.; Soares, M.G.M. **The Central Amazon Floodplain: Actual use and options for a sustainable management**. Backhuys Publishers b.V., Leiden, 2000, p. 584.

Melack, J. M.; Hess, L. L.; Gastil, M.; Forsberf, B. R.; Hamilton, S. K.; Lima, I. B. T.; Novo, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, p. 530-544, 2004.

Neil, C.; Elsenbeer, H.; Krusche, A. V.; Lehmann, J.; Markewitz, D.; Figueiredo, R. O. Hydrological and Biogeochemical Processes in a Changing Amazon: Results from small watershed studies and the Large-Scale Biosphere- Atmosphere Experiment. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 12, p. 2467-2477, 2006.

Parolin, P.; Simone, O de; Haase, K; Waldhoff, D; Hottenberger, S; Kuhn, U; Kesselmeier, J; Kleiss, B; Schmidt, W; Piedade, M. T. F.; Junk, W J. **Central Amazonian floodplain forests: Botanical Review**, The New York Botanical Garden, v. 70, n. 3, p. 357-380, 2004.

Piedade, M.T.F.; Long, S.P.; Junk, W.J. Leaf and canopy photosynthetic CO₂ uptake of a stand of *Echinochloa polystachya* on the central Amazon floodplain. **Oecologia**, v. 97, p.193-201, 1994.

Richey, J.E.; Melack, J.M.; Aufdenkampe, A.K.; Ballester, M.V.R.; Hess, L.L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, v. 416, p. 617-620, 2002.

Renó, V. F.; Novo, E. M. L. M.; Suemitsu, C.; Rennó, C. D.; Silva, T. S. F. Assessment of deforestation in the Lower Amazon floodplain using historical Landsat MSS/TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 3446-3456, 2011.

Rennó, C. D.; Novo, E. M. L. M.; Banon, L. C. Correção geométrica da máscara de áreas alagáveis da bacia amazônica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16. 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. (submetido).

Silva, T. S. F.; Costa, M.; Melack, J. M. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the Eastern Amazon floodplain: a remote sensing approach. **Remote Sensing of Environment**, n. 114, p. 1998-2010, 2010.

Sippel, S. J.; Hamilton, S. K.; Melack, J. M. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 16, p. 3055-3074, 1998.