

Correção geométrica da máscara de áreas alagáveis da bacia amazônica

Camilo Daleles Rennó
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo
Lise Christine Banon

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

Abstract. Wetlands are important sources of carbon emissions. Accurate mapping of these environments is essential to produce precise estimates of this greenhouse gas. Since mid-2000 a map of wetlands for the entire Amazon basin is available. This map, called wetlands mask, has been used in some regional studies. However, geometric distortions have prevented its use for local-scale studies, where precise positioning is required. In this paper, we present the methodology to reduce these geometric distortions using SRTM-DEM as reference. To achieve this goal, a computer program was developed. In order to rectify local distortions, the wetlands mask was vectorized and overlaid on SRTM-DEM. From a control point set collected in both mask and SRTM-DEM, the whole area was decomposed into small triangles. A mathematical transformation was determined using the vertices of each pair of triangles (correct and warped) and was applied over all polygons enclosed by the triangles. The geometric correction of the distortions caused no significant changes in the estimate of the total flooded area. Furthermore, the displacements needed for correction rarely exceeded 1 km. The geometric correction substantially improved the consistency between the wetlands mask and the SRTM-DEM data.

Palavras-chave: wetlands map, geometric correction, triangulation, máscara de áreas alagáveis, correção geométrica, triangulação

1. Introdução

Estudos regionais na Amazônia, em geral eram realizados com enfoque sobre pesquisas em áreas de terra firme, levando a um desconhecimento da importância dos ambientes alagáveis na compreensão da dinâmica biogeoquímica deste bioma no contexto das mudanças globais. A falta de informação sobre estes ambientes têm sido citada como uma limitação para o conhecimento de sua função em pesquisas relacionadas ao balanço de carbono (Junk, 1985; Piedade et al., 1991; Novo et al., 1997; Novo et al., 2005; Affonso et al., 2007).

Para uma estimativa mais precisa de emissões de carbono, seria imprescindível obter a extensão ocupada pelas áreas alagáveis desta região. No início da década de 1990, Junk (1993) estimou que a extensão destas áreas na Bacia Amazônica estava entorno de 1 milhão de quilômetros quadrados. No entanto, havia uma alta incerteza desta estimativa devido às limitações nas técnicas de sensoriamento remoto disponíveis na época (Junk, 1997) e ao número reduzido de medições (Hess et al., 2003).

O Projeto GRFM (*Global Rain Forest Mapping*, 1995-1997) gerou um mosaico de imagens SAR (Synthetic Aperture Radar) a partir do sensor JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite-1*) para uma cobertura completa da Bacia Amazônica em uma resolução espacial de 100m (Chapman et al., 2002). O georreferenciamento das cenas e a geração do mosaico foram realizados automaticamente e garantiram uma precisão média absoluta de 400m (Siqueira et al., 2000).

No final da década de 90, a partir do mosaico GRFM, teve início o mapeamento detalhado das áreas alagáveis da Bacia Amazônica em toda sua extensão. Hess et al. (2003) descreve a metodologia utilizada neste mapeamento, também denominado como máscara de áreas alagáveis (*Wetlands Mask*). A realização deste trabalho pioneiro ocorreu no âmbito do Projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) e permitiu a estimação mais precisa da superfície alagada na Amazônia Central Brasileira durante a alta e baixa vazão.

Uma aplicação direta do uso desta máscara é a distinção das áreas de terra firme das alagáveis, permitindo assim a análise destes ambientes separadamente. Vários autores têm utilizado esta máscara em diferentes estudos. Richey et al. (2002) foi o primeiro a aplicá-la para estimar a emissão de CO₂, enquanto Melack et al. (2004) a utilizaram para quantificar as emissões de metano. Esta máscara também foi utilizada em conjunto com imagens MODIS para detectar mudanças sazonais na distribuição de clorofila em lagos de várzea (Novo et al., 2006) e Rennó et al. (2008) a utilizaram para o mapeamento de ambientes de florestas de terra firme, através de um descritor de terreno calculado a partir de modelos digitais de elevação (MDE).

Análises exploratórias mais detalhadas desta máscara indicaram inconsistências com os dados do DEM-SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (van Zyl, 2001). As inconsistências observadas provêm de distorções geométricas possivelmente resultantes do processo de geração do mosaico JERS-1. Estas distorções provocam deslocamentos locais não sistemáticos dos polígonos da máscara, como apresentado na Figura 1.

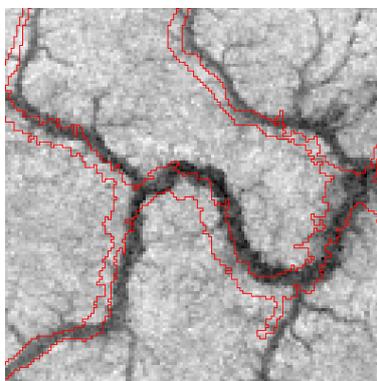


Figura 1. Exemplo de deslocamento encontrado na máscara de áreas alagáveis (linha vermelha) sobre o DEM SRTM

É importante ressaltar que as distorções geométricas observadas são desprezíveis em estudos regionais ou globais. No entanto, para os estudos locais onde os limites das áreas alagáveis forem associados a outras propriedades do terreno, a precisão do posicionamento torna-se um requisito essencial e as análises em estudo podem incorrer em falsas conclusões. A correção destas distorções poderia ampliar consideravelmente o uso da máscara de áreas alagáveis para estudos locais, resultando em um grande avanço para a comunidade científica, o que se tornou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Desta forma, o presente trabalho apresentou uma metodologia para aprimorar o ajuste local da máscara utilizando como referência o DEM-SRTM, a fim de ampliar o seu uso em aplicações que exijam maior precisão espacial. Um aplicativo, *registraAMZ*, foi especialmente desenvolvido para este propósito utilizando a linguagem IDL/ENVI.

2. Preparação dos dados

A máscara de áreas alagáveis (Figura 2) encontra-se disponível em Hess et al (2012), no formato padrão geotiff, projeção latlong, datum WGS-84, resolução espacial 3 arco-segundos, compreendendo uma área entre as coordenadas 4°N, 78°W e 16°S, 50°W. Devido à grande dimensão desta imagem (38400 x 32400 pixels), o processo de manipulação tornou-se bastante custoso, dificultando o processo de correção desta máscara. Assim, optou-se por dividi-la em quadrículas de 1 por 1 grau. Cada quadrícula foi então vetorizada e armazenada no formato *shapefile* mantendo a sua característica original de projeção.

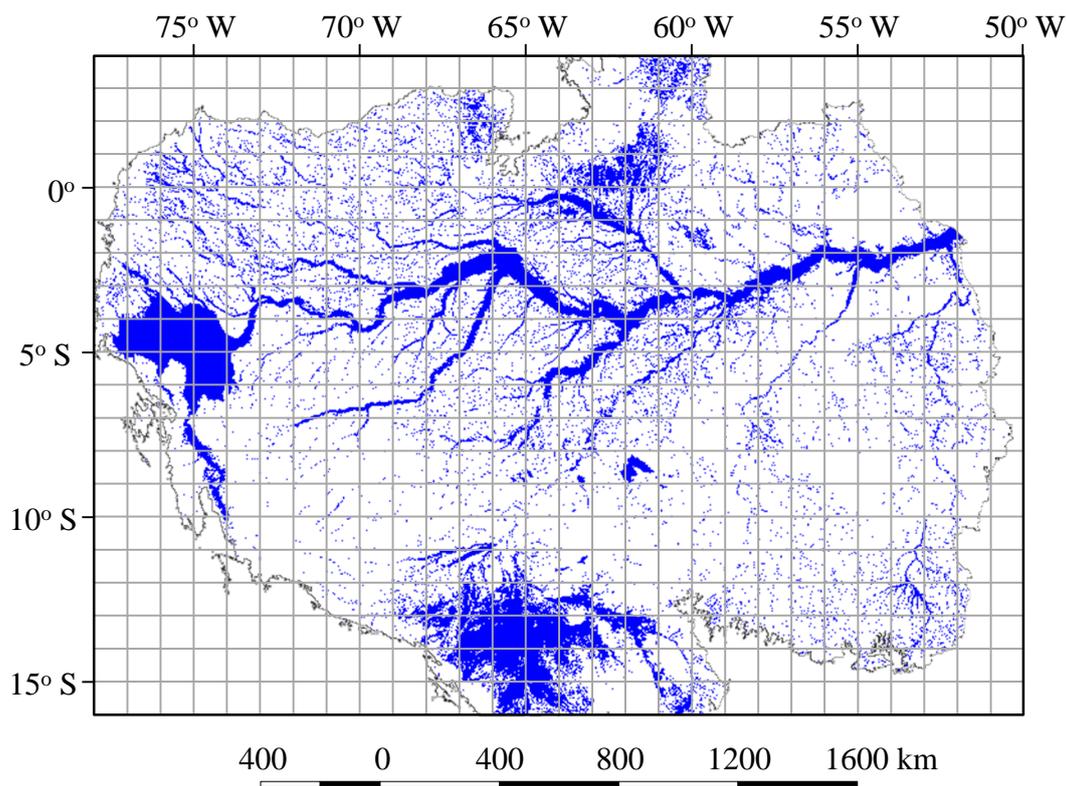


Figura 2. Máscara de áreas alagáveis (em azul) da bacia amazônica.

A correção das distorções geométricas da máscara teve como referência o DEM-SRTM. Com resolução espacial de 3 arco-segundos e resolução vertical de um metro, o DEM-SRTM revela-se como o melhor e mais preciso dado topográfico disponível para muitas regiões, incluindo a região amazônica. As precisões geográfica e altimétrica do DEM-SRTM têm sido constantemente avaliadas em muitos estudos (Smith e Sandwell, 2003; Carabajal e Harding, 2005; Rodriguez et al., 2006). O DEM-SRTM encontra-se disponível em sua versão 2 no endereço http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/.

A fim de contribuir no processo de correção, outros produtos auxiliares foram utilizados com a mesma resolução e projeção do DEM-SRTM: a) mosaicos JERS, representando as épocas de alta e baixa vazão, gerados a partir do GRFM e disponíveis em Hess et al. (2012); b) mosaico gerado a partir do Geocover 2000 disponível em <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>; e c) mosaico de corpos d'água gerado a partir dos dados do SWBD (SRTM Water Body Data) disponível em http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/.

3. Correção das distorções geométricas

O processo de correção geométrica da máscara de áreas alagáveis inicia-se com a coleta dos pontos de controle. Esse processo é feito interativamente a partir do sistema registraAMZ, desenvolvido para este trabalho usando a linguagem IDL/ENVI (Figura 3). Este sistema permite a visualização de múltiplos *shapefiles*, sobre qualquer uma das imagens utilizadas como referência. O sistema permite a mudança da cor das linhas dos polígonos da máscara, a definição do nível de detalhamento (*zoom*) da região selecionada e a aplicação de um contraste automático, melhorando assim, a capacidade de identificação das distorções da máscara na imagem de referência. Além disso, o sistema possibilita a visualização dos polígonos antes e após a aplicação da correção geométrica, permitindo uma avaliação comparativa do resultado.

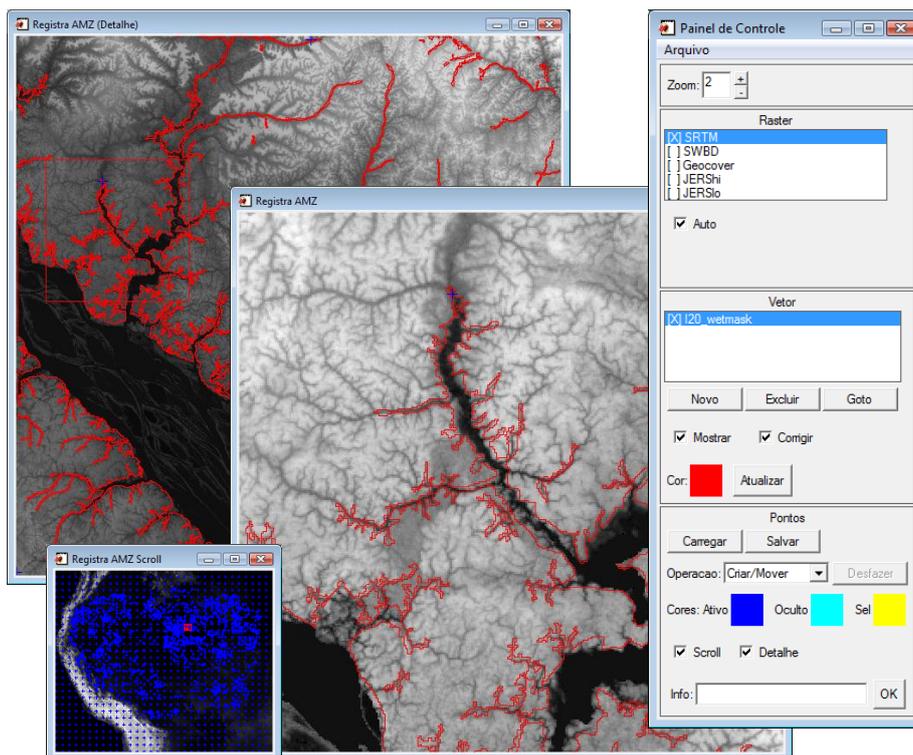


Figura 3. Interface do sistema RegistraAMZ.

Ao inicializar o sistema, um conjunto de pontos de controle formado pelos cantos das quadrículas é criado automaticamente. Este recurso evita que ao introduzir um ponto de controle, seu efeito de correção local crie distorções que se propaguem além da quadrícula em edição.

A definição de um ponto de controle é feita de acordo com as feições reconhecidas no DEM-SRTM ou em um dos produtos auxiliares. Na janela de visualização, seleciona-se uma região deslocada do vetor da máscara, movendo-a para a posição correta. O reposicionamento do ponto de controle pode ser feito posteriormente a fim de melhorar o ajuste do vetor à feição correspondente na imagem de referência. O processo de selecionar e mover o vetor para a posição correta cria, de fato, um par de pontos: um sobre o vetor da máscara (posição deslocada) e outro sobre a imagem de referência (posição correta). A cada ponto de controle selecionado, a correção geométrica é realizada automaticamente de modo que o resultado é visualizado em tempo real, facilitando o processo de localização de outras regiões deslocadas.

Vários algoritmos de correção geométrica podem ser encontrados na literatura. O registro, como é conhecido todo este processo de correção, pode ser computado globalmente, ou seja, a mesma transformação é aplicada sobre toda a área de interesse, ou pode ser adaptativo, realizando transformações que consideram apenas as distorções locais, não afetando significativamente regiões do entorno. Uma revisão mais completa sobre as diferentes abordagens de registro pode ser encontrada em Zitová e Flusser (2003).

O algoritmo de correção geométrica implementado neste sistema adotou uma abordagem semelhante à descrita por Goshtasby (1986) e Vu e Li (1996). A cada ponto de controle coletado, uma triangulação de Delaunay é gerada sobre a máscara e sobre a referência. Transformações geométricas afins independentes são determinadas usando os vértices de cada par de triângulos (máscara e referência). Em seguida, cada transformação é aplicada a todos os pontos das linhas dos polígonos da máscara que estão dentro desses triângulos. A Figura 4 ilustra o efeito do deslocamento de um ponto de controle. Note que a distorção geométrica tem efeito apenas nos 3 triângulos que compartilham o ponto de controle movido.

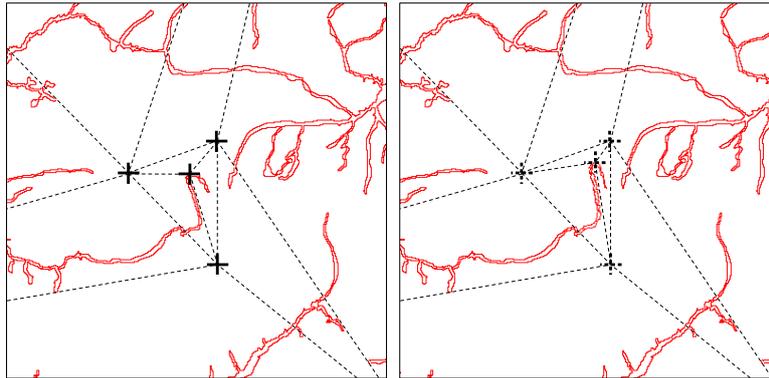


Figura 4. Deformação geométrica resultante do deslocamento de um ponto de controle. a) linha (em vermelho) da máscara original e b) mesma linha após a aplicação da correção. As linhas tracejadas em preto indicam a triangulação gerada a partir dos pontos de controle (+).

4. Resultados

Para a correção geométrica da máscara de áreas alagáveis foram coletados 1331 pontos de controle além dos 924 criados automaticamente pelo sistema. A distribuição destes pontos não foi homogênea sobre toda a bacia, variando de acordo com a complexidade da correção geométrica exigida. Das 472 quadrículas analisadas que continham algum polígono da máscara, 184 (39%) não necessitaram de pontos de controle extras (além dos 4 dos cantos da quadrícula), 205 (43,4%) tiveram de 1 a 5 pontos de controle inseridos e apenas 19 (1,1%) necessitaram mais do que 20 pontos de controle para a correção geométrica.

A Figura 5 apresenta alguns exemplos das distorções geométricas corrigidas. Nesta figura, as mesmas imagens são mostradas antes e depois da aplicação da correção. Nota-se uma melhora significativa do ajuste entre os polígonos da máscara e as feições mostradas no DEM-SRTM.

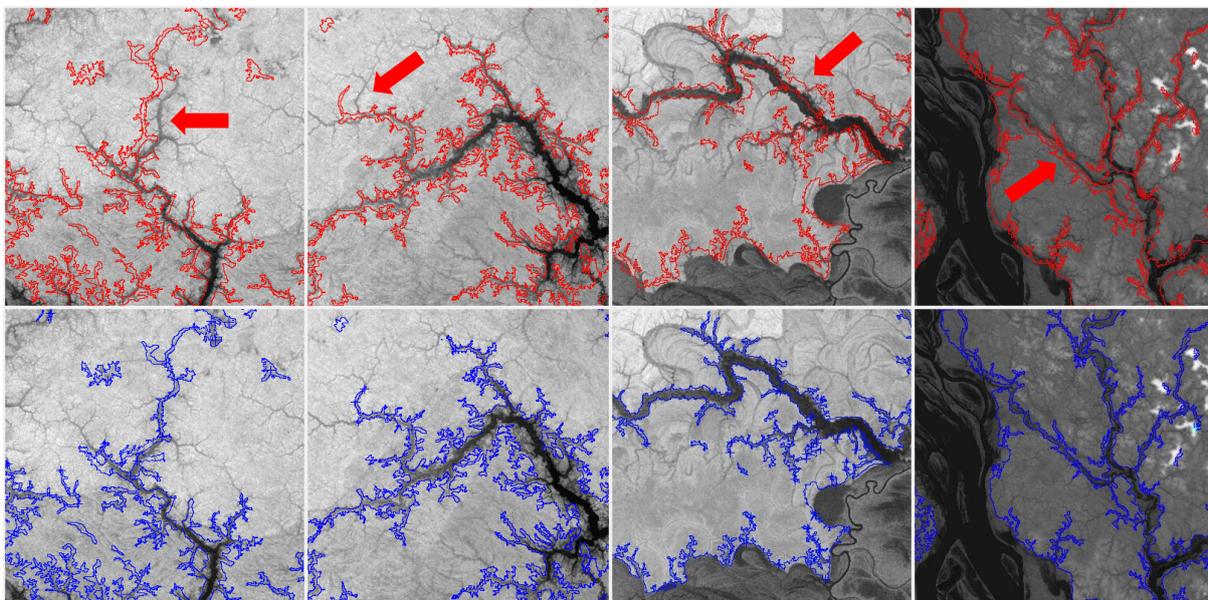


Figura 5. Exemplos de imagens mostrando polígonos da máscara de áreas alagáveis antes da correção geométrica (em vermelho, na parte superior) e os mesmos exemplos após a correção (em azul, na parte inferior). As imagens apresentam ao fundo o DEM-SRTM, utilizado como referência para a correção. As setas das imagens na parte superior destacam as regiões deslocadas.

A fim de avaliar o impacto causado pela correção geométrica na máscara original, foram analisados dois aspectos: a discrepância da área alagável total e o deslocamento espacial dos pontos de controle para cada quadrícula.

As discrepâncias encontradas em cada quadrícula apresentaram uma variação em área em torno de 25 km² (Figura 6a), sendo que cerca de 90% das quadrículas apresentaram discrepâncias inferiores a 5 km². De modo geral, as discrepâncias observadas raramente representaram mais do que 1% da área total alagável na quadrícula.

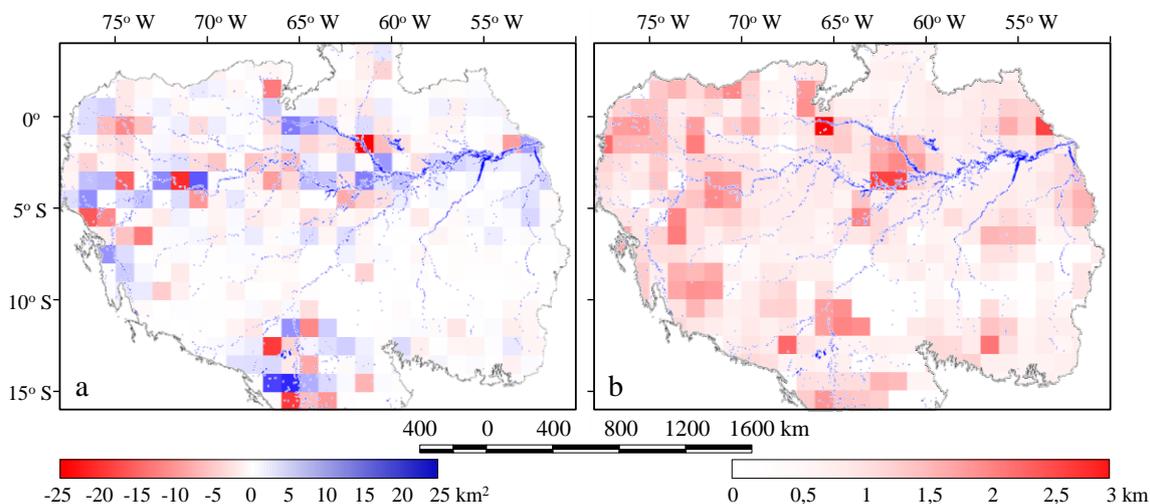


Figura 6. Distribuição espacial da diferença na área alagável total (a) e dos deslocamentos máximos (b) para as quadrículas analisadas. Em (a), os valores negativos e positivos representam respectivamente a diminuição e o aumento da área após a correção.

A Figura 6b apresenta, para cada quadrícula analisada, os deslocamentos máximos dos pontos de controle utilizados na correção. O maior deslocamento observado foi de cerca de 3 km, mas refere-se a um caso particular de uma região ao norte do estado do Amazonas, próxima ao Rio Ajuana, um afluente do Rio Negro (Figura 7). A maioria dos deslocamentos (87%) foram inferiores a 1 km, sendo 50% deles menores que 260 m. Os erros de deslocamentos encontrados são compatíveis aos encontrados por Siqueira et al (2000) que encontraram deslocamentos em média de 400 m em sua avaliação.

Estes resultados mostraram a variabilidade regional do grau de correção geométrica das distorções encontradas na máscara de áreas alagáveis, assim como seu grau de preservação da área dos polígonos. De um modo geral, a correção assegurou o registro adequado da máscara preservando tanto sua morfologia como sua área.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para a correção da máscara de áreas alagáveis disponibilizada em Hess et al. (2012) para toda a bacia amazônica. Esta máscara, comumente aplicada em estudos regionais, apresenta limitações quando empregada em escalas mais detalhadas, devido a deslocamentos locais não sistemáticos em relação ao DEM-SRTM.

A partir de um processo de seleção de pontos de controle e posterior correção geométrica por triangulação, foi possível melhorar substancialmente a coerência entre as feições da máscara e aquelas encontradas no DEM-SRTM. As distorções geométricas observadas estavam principalmente associadas aos deslocamentos dos polígonos da máscara em relação à referência adotada, em geral, não ultrapassando 1 km. Não foram detectadas grandes alterações na área total da máscara nas quadrículas após o processo de correção. Cerca de 90% das quadrículas apresentaram discrepâncias em área inferiores a 5 km².

O desenvolvimento do sistema registraAMZ, dedicado à correção da máscara de áreas alagáveis, agilizou o processo de coleta de pontos de controle ao permitir a visualização da correção em tempo real. A partir deste processo interativo, a cada ponto de controle selecionado, a correção geométrica automática é visualizada, permitindo a localização de outras regiões deslocadas.

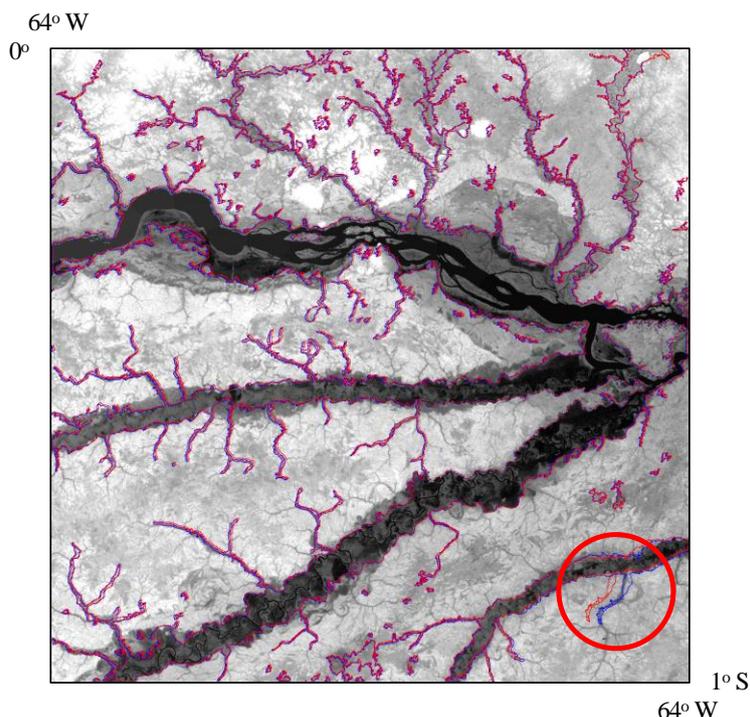


Figura 7. Região próxima ao rio Ajuana (AM) mostrando uma distorção geométrica local atípica (círculo vermelho). As linhas sobre o DEM-SRTM ao fundo indicam os polígonos da máscara antes (em vermelho) e depois (em azul) da correção.

Espera-se que este trabalho possa contribuir com o uso da máscara de áreas alagáveis em aplicações que necessitem de maior precisão na diferenciação entre os ambientes alagáveis e os de terra-firme. Os trabalhos que visam modelar as especificidades destes ambientes poderão melhorar a sua capacidade preditiva.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática GEOMA e ao CNPq pelos recursos que possibilitaram a realização do projeto (Processo: 550373/2010-1).

7. Referências

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 (SBSR), 13, 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.

Carabajal, C. C.; Harding, D. J. ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, n. 22, p. L22 S01.1–L22 S01.5, 2005.

Chapman, B.; Siqueira, P.; Freeman, A. The JERS Amazon Multi-season Mapping Study (JAMMS): Observation strategies and data characteristics. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 2, p. 1427–1446, 2002.

Goshtasby, A. Piecewise linear mapping functions for image registration. **Pattern Recognition**, v. 19, n. 6, p. 459-466, 1986.

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. (INPE-10110-PRE/5645).

- Hess, L. L.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C. F.; Gastil, M. **LBA-ECO LC-07 JERS-1 SAR Wetlands Masks and Land Cover, Amazon Basin: 1995-1996**. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, 2012. Conjunto de dados. Disponível em: <http://daac.ornl.gov/LBA/guides/LC07_SAR_Wetlands_Mask.html>. Acesso em: 2 nov. 2012. doi<10.3334/ORNLDAAC/1079>.
- Junk, W. J. Aquatic plants of the Amazon system. In: B. R. Davies and K.F. Walker (eds.) **The ecology of the River Systems**. Netherlands, Dr. W. Junk Publ., 1985. p.319-337.
- Junk, W. J. **The central Amazon floodplain: Ecology of a pulsing system**. Berlin: Springer, 1997. 548p.
- Junk, W. J. Wetlands of Tropical South America. In: Whigham, D. F.; Dykyjová, D.; Hejny S. (eds) **Wetlands of the world: I. Inventory, ecology and management**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993. p.679–739.
- Melack, J. M.; Hess, L. L.; Gastil, M.; Forsberg, 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. (INPE-11774-PRE/7133).
- 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**, v. 7, p. 153-161, 2006. doi: <10.1007/s10201-006-0179-8>.
- Novo, E. M. L. M.; Leite, F. A.; Ballester, V.; Melack, J. M. Assessment of Amazon floodplain habitats using TM/Landsat data. **Ciência e Cultura**, v. 49, n. 4, p. 280-284, July/Aug. 1997. (INPE-6981-PRE/2935).
- Novo, E. M. L. M.; Miura, T.; Ferreira, L. G.; Barbosa, C. C.; Carvalho, C.; Sano, E. E.; Shimabukuro, Y.; Huete, A.; Potter, C.; Roberts, D. A.; Hess, L. L.; Melack, J. J.; Yoshioka, H.; Klooster, S.; Kumar, V.; Myneni, R.; Ratana, P.; Didan, K. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 259-272, 2005. (INPE-13382-PRE/8597).
- Piedade, M. T.; Junk, W. J.; Long, S. P. The Productivity of the C4 Grass *Echinochloa polystachya* on the Amazon Floodplain. **Ecology**, v. 72, n. 4, p. 1456-1463, 1991.
- Rennó, C. D. ; Nobre, A. D. ; Cuartas, L. A. ; Soares, J. V. ; Hodnett, M. G. ; Tomasella, J. ; Waterloo, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008.
- Richey, J. E.; Melack, J. M.; Aufdenkampe, A. K.; Ballester, V. M.; Hess, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, v. 416, n. 6881, p. 617-620, 2002.
- Rodriguez, E.; Morris, C.S.; Belz, J.E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.
- Siqueira, P.; Hensley, S.; Shaffer, S.; Hess, L.; McGarragh, G.; Chapman, B.; Holt, J.; Freeman, A. A continental scale mosaic of the Amazon basin using JERS-1 SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 6, p. 2638– 2644, 2000.
- Smith, B.; Sandwell, D. Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. **Geophys. Res. Lett.**, v. 30, n. 9, p. 1467, 2003.
- van Zyl, J.J. The shuttle radar topography mission breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.
- Vu, Q.; Li, Y. A fast warping algorithm for correcting local distortions in binary images. In: International Conference on Image Processing, 3, 1996, Lausanne. **Anais...** Lausanne, 1996. v. 2, p. 209-212.
- Zitová, B.; Flusser, J.. Image registration methods: a survey. **Image and Vision Computing**, v. 21, n. 11, p. 977-100, 2003.