

Utilização de Imagens Interferométricas SAR na banda X para Estimativa da Cota da Superfície e Nivelamento de Massas D'água no Projeto Radiografia da Amazônia

Pierre Moura
Antonio Henrique Correia

Diretoria de Serviço Geográfico – DSG
Quartel General do Exército, Bloco F, 2º andar, SMU, 70.630-901 – Brasília - DF
{pierre, aidafc}@terra.com.br

Abstract. The purpose of this paper is to show a methodology for estimating the elevation of the surface of rivers and bodies of water based on images from synthetic aperture radar (SAR) airborne, which is being used in Terrestrial Cartography Subproject, also known as "Amazon Radiography", from Amazon Cartography Project, for topographic mapping of almost 1.8 million square kilometers called Cartographic Blank of the Amazon". The methodology described in this article includes the following steps: SAR raw data processing; interferometric SAR complex image data processing; geocoding of SAR images; obtaining the image mosaic of SAR images; registration of master and slave interferometric SAR complex image; obtaining surface elevation of water bodies; the flatness of water bodies. The height of the water bodies and rivers can be obtained by analyzing the information obtained in the processing of SAR images in X-band, and we considered the information in near range. The combination of information obtained from studying the behavior of the land and the use of linear interpolation techniques allow a precise estimate of the height of the water bodies in the regions where it was not possible to obtain this information by processing the images. Information obtained from the processing of SAR images are applied in X-band images of P-band SAR.

Palavras-chave: radar, *synthetic aperture radar*, *amazon*, *topographic mapping*, *remote sensing*, *image processing*, *radar*, radar de abertura sintética, amazônia, mapeamento topográfico, sensoriamento remoto, processamento de imagens.

1. Introdução

A área da Amazônia Legal é superior a 5 milhões de km². Ela possui 1/3 das florestas tropicais da Terra. Acolhe a maior diversidade biológica do planeta e abriga o maior rio e a maior bacia de água doce do mundo. Todas essas características evidenciam esta região como área estratégica de alto interesse para os brasileiros, o que impõe a execução de ações governamentais para continuar sua integração ao ambiente nacional. Entretanto, uma área de quase 1,8 milhão de km² ainda não possui informações cartográficas terrestres adequadas: o chamado "Vazio Cartográfico", conforme a situação apresentada na Figura 1. Além disso, os documentos cartográficos disponíveis, na maioria da década de 70 e 80, contêm a representação das feições do terreno, em áreas de floresta densa, apenas no nível da copa das árvores e não no nível do solo, como seria desejável.

A solução tecnológica para superar a dificuldade relacionada à constante presença de nuvens na região Amazônica, que sempre foi um fator limitante para a realização do mapeamento dessa região, é o emprego de sensores de Radar de Abertura Sintética (SAR). Neste contexto, dados interferométricos e polarimétricos de radar vêm sendo utilizados em projetos de mapeamento topográfico e da cobertura da terra, em escala global e regional, principalmente em regiões de florestas tropicais úmidas.

Os resultados alcançados nos últimos anos (DSG, 2000 e Dutra et al., 2002) com a tecnologia de radares interferométricos, na banda X, e especialmente na banda P, que possibilita a penetração no dossel da floresta e a interação da onda com a superfície do terreno, aliado ao grande interesse no mapeamento da Amazônia, foram decisivos para a aprovação do Subprojeto Cartografia Terrestre, também conhecido como Projeto Radiografia da Amazônia. O referido subprojeto, sob a responsabilidade de execução da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), com apoio da Força Aérea Brasileira (FAB), integra o Projeto

Cartografia da Amazônia, que é coordenado pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM, 2008).

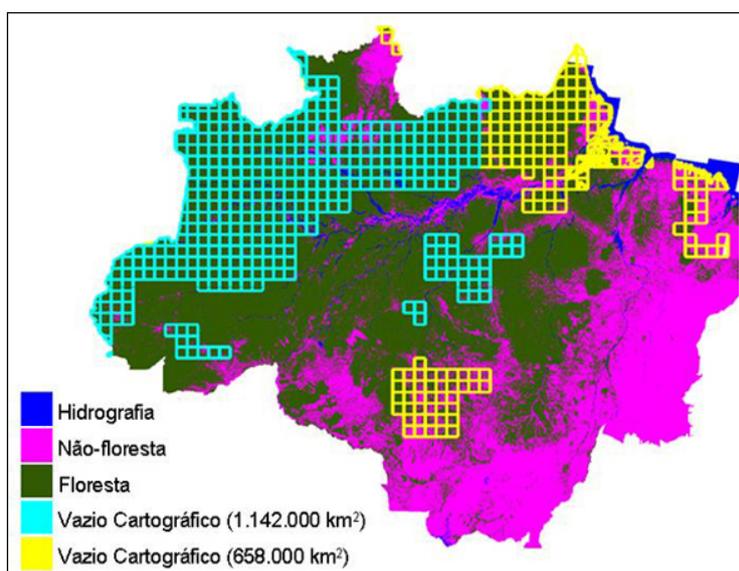


Figura 1. Vazio Cartográfico da Amazônia Legal.

O Projeto Radiografia da Amazônia tem por objetivo a obtenção de informações e a elaboração de diversos produtos cartográficos (cartas topográficas, ortoimagens SAR, Modelos Digitais do Terreno, etc.), nas escalas de 1:100.000 e de 1:50.000, da região do Vazio Cartográfico da Amazônia Legal, com a seguinte subdivisão: mapeamento planialtimétrico de 1.142.000 km² em áreas de floresta tropical densa (Figura 1), com base no aerolevanteamento SAR interferométrico (InSAR) e polarimétrico (PolSAR), nas bandas X e P, que está sendo executado pela presa Orbisat da Amazônia S/A; e mapeamento planialtimétrico de 658.000 km² em áreas de não-floresta (campos naturais e áreas antropizadas), com base no aerolevanteamento InSAR e PolSAR, nas bandas L e X, a ser executado pela FAB com as aeronaves R99-B do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM).

Considerando-se o atual estágio de execução do aerolevanteamento SAR do Projeto Radiografia da Amazônia, o processamento dos dados obtidos através dos sensores SAR nas bandas X e P está sendo desenvolvido no Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército (CIGEx), sediado em Brasília-DF. Com base nas ortoimagens e modelos digitais do terreno e de superfície que são gerados nessa fase de processamento, será descrito no decorrer deste trabalho o método empregado para extração das informações que permitem a inferência do valor da cota da superfície e nivelamento das massas d'água aparentes (rios, lagos, etc.) das bacias hidrográficas contidas na área de abrangência do projeto em questão.

3. Metodologia de Processamento das Imagens

O processamento das imagens SAR pode ser dividido nas seguintes fases: processamento SAR, processamento interferométrico, geocodificação SAR e mosaico.

Cada uma das etapas descritas a seguir, estão integradas em um conjunto de aplicativos, desenvolvidos pela empresa ORBISAT, no ambiente de programação IDL (ITT, 2008), com interfaces gráficas interativas com o usuário e várias funcionalidades (processamento em paralelo das faixas de vôo; gerenciador de trabalhos na torre de processamento; gerenciador de memória e armazenamento de dados; controle da qualidade geométrica e radiométrica das imagens e modelos, etc.), que possibilitam a geração dos insumos do Projeto Radiografia da Amazônia.

3.1 Processamento SAR

O processamento SAR tem por finalidade a conversão dos dados brutos de radar, obtidos na fase de aerolevanteamento, em imagens digitais. Esses dados representam os sinais provenientes do retorno, na direção do sensor, de cada pulso emitido pelo radar que interage com os alvos terrestres, cuja amplitude e fase (dado complexo) desses sinais são gravadas em discos rígidos, com uma determinada taxa de amostragem (quantização).

Até o presente momento, a fase de aerolevanteamento SAR do projeto em tela resultou no recobrimento da ordem de 950.000 km² de área de floresta densa, o que produziu um volume de dados brutos armazenados em cerca de 540 unidades de disco rígido de 1 TB (originais e cópias). Maiores detalhes técnicos e operacionais da metodologia de aerolevanteamento SAR, executada pela empresa Orbisat da Amazônia S/A, e de apoio de campo ao vôo radar, executado pela DSG, podem ser obtidos em Correia et al. (2010).

Ao final dessa etapa, são gerados pares de imagens do tipo *single-look complex* (SLC) monopolarizadas, na banda X (polarização HH), e multipolarizadas, na banda P (HH, HV e VV), que são indispensáveis ao processamento interferométrico.

3.2 Processamento Interferométrico

O processamento interferométrico SAR tem por finalidade a geração de produtos interferométricos (imagens de coerência e fase interferométrica absoluta) a partir das imagens complexas geradas no processamento SAR. A obtenção de tais produtos é possível graças à técnica de interferometria SAR (InSAR), que é baseada na aquisição de um par de imagens SAR SLC, resultantes da interação com o terreno de ecos transmitidos por uma ou duas antenas SAR, com posições geográficas conhecidas e separadas no espaço por uma distância adequada denominada por linha de base (B). Portanto, cada porção do terreno é imageada sob geometrias de aquisição diferentes, onde, no caso do projeto em questão, as linhas de base das bandas X e P são obtidas, respectivamente, com uma e duas passagens da aeronave, onde estão instaladas três antenas da banda X e uma da banda P.

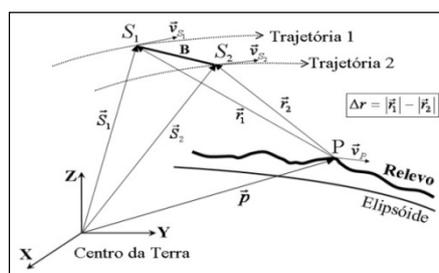


Figura 2. Geometria básica InSAR.

A Figura 2 ilustra a geometria básica da interferometria SAR, onde a diferença de fase interferométrica $\Delta\phi$ entre os sinais recebidos nas duas antenas S1 e S2, provenientes de um mesmo elemento de resolução do terreno, é diretamente proporcional a variação de distância Δr (Madsen e Zebker, 1998).

A principal aplicação da técnica InSAR é a geração de modelos digitais de elevação (MDE), que são obtidos por meio do relacionamento entre a fase interferométrica absoluta e a topografia do terreno. O processo de geração da fase absoluta é denominado de processamento InSAR, que é dividido em:

3.2.1 Registro do Par de Imagens Complexas

O registro do par de imagens complexas consiste do registro entre o par de imagens SAR complexas. É uma das fases mais importantes do processamento InSAR, pois a precisão

obtida, que deve ser da ordem do subpixel (menor que 0,1 pixel), determinará a qualidade da fase interferométrica.

3.2.2 Geração da Imagem Interferométrica

A geração da imagem interferométrica é feita após o registro do par de imagens complexas, pela multiplicação da imagem complexa pelo seu conjugado registrado. A imagem diferença de fase, chamada de interferograma, é uma função das imagens complexas, obtidas através da diferença de fase da observação de um alvo de dois pontos distintos. O interferograma apresenta padrões do tipo franjas, devido ao caráter cíclico da fase de 2π , e um ruído próprio, que é reduzido pela técnica de filtragem espacial da média.

3.2.3 Geração da Imagem Coerência

A imagem coerência é obtida pela estimação do módulo da correlação complexa entre as duas imagens que originam o interferograma. Pode ser considerada como uma medida de qualidade dos interferogramas gerados, em virtude de apresentar baixos valores de coerência associados às áreas de forte presença de ruído de fase (por exemplo, áreas de vegetação densa). A imagem coerência tem grande importância para o caso da interferometria de duas passagens, pois qualquer mudança na geometria ou umidade do alvo, entre as passagens, ocasiona o efeito de decorrelação temporal, não sendo possível realizar a medida de diferença de fase. Outra aplicabilidade das imagens de coerência no projeto é a utilização das mesmas em classificações de cobertura da terra (Gaboardi, 2002).

3.2.4 Remoção da Fase da Superfície Plana

O interferograma possui uma componente de fase que é devido à superfície plana. Mesmo que a altitude de um determinado ponto seja zero, como sua posição foi observada de dois pontos distintos, haverá uma diferença de fase associado ao mesmo. Esta diferença precisa ser removida, uma vez que não está associada a nenhuma informação topográfica. Após o desdobramento de fase esta informação é utilizada no cálculo da fase absoluta.

3.2.5 Desdobramento da Fase

O interferograma contém a informação de fase que é diretamente relacionado com a topografia. Essa fase é dada em módulos de 2π , existe um problema de ambiguidade no cálculo do correto número inteiro de ciclos de fase que precisam ser adicionados para cada medida de fase, visando à obtenção da correta distância na direção de visada do radar (*slant range*). Essa solução da ambiguidade é denominada de desdobramento da fase (*phase unwrapping*) e constitui a questão mais complexa no processamento InSAR.

3.2.6 Cálculo da Fase Interferométrica Absoluta

Os algoritmos de desdobramento de fase são baseados em métodos numéricos de integração, deve-se somar uma constante ao valor da fase relativa obtida. Essa constante é denominada de offset da fase interferométrica e permite a obtenção da fase interferométrica absoluta, que é necessária para geração do MDE. O método empregado para cálculo do *offset* da fase é baseado no processo de geocodificação inversa com pontos de controle, onde refletores de canto são instalados no terreno para sinalização do vôo radar, conforme descrito em Correia et al. (2010).

3.3 Geocodificação SAR

O processo de conversão da fase interferométrica absoluta em altitude do terreno é denominado de geocodificação SAR, que produz imagens georreferenciadas e ortorretificadas. A geocodificação de imagens SAR para fins cartográficos, passa pela geração

da ortomagem SAR sobre uma grade, representada na projeção UTM, sem as distorções geométricas inerentes de sistemas de radar de visada lateral, como o encurtamento de rampa, a inversão e a sombra, que são erros induzidos pela topografia do terreno.

O processo de geocodificação SAR é baseado nas equações de *range-Doppler* para as duas antenas SAR, onde as coordenadas de um ponto no espaço são calculadas a partir da medida da distância alvo-radar e da variação de frequência *Doppler* do ponto, no instante em que este ponto é visto no centro do feixe da antena. Além disso, é levado em consideração que a diferença de distância entre as antenas e o ponto P é governada pela fase interferométrica absoluta, constituindo o seguinte sistema não-linear de equações *range-Doppler* (Quarzeddine, 2002).

A qualidade do processo de geocodificação SAR está relacionada com o conhecimento preciso do vetor de estado da antena. No caso do radar aerotransportado da empresa ORBISAT, as amostras são adquiridas por uma plataforma inercial e dados *DGPS*, garantindo uma melhor acurácia do vetor de estado, conforme descrito em Correia et al. (2010).

No contexto do Projeto Radiografia da Amazônia, os MDE interferométricos obtidos são chamados de MDS (Modelo Digital de Superfície) e MDT (Modelo Digital do Terreno). O MDS é originado de interferogramas de passagem simples, gerados na banda X, e é uma representação matemática da distribuição espacial tridimensional das variações de altitude de uma determinada superfície que, neste caso, representa o nível da copa das árvores e de outros objetos existentes. O MDT é originado de interferogramas de dupla passagem, gerados na banda P, cuja superfície de representação é o nível do solo, mesmo em áreas de floresta densa.

3.4 Mosaico

Neste projeto, as informações são agrupadas em blocos de um grau por um grau, sendo cada bloco formado por cerca de 26 faixas de vô, com superposição de setenta por cento entre as faixas, conforme é ilustrado na Figura 3.

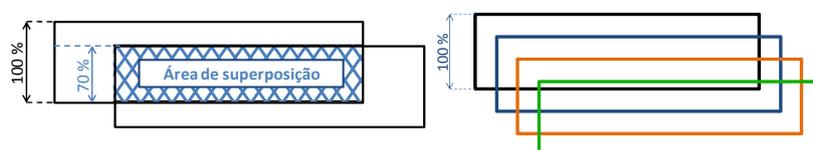


Figura 3. Ilustração da superposição entre as faixas.

Após a geocodificação, as faixas passam pelo processo de mosaico, onde é dada maior prioridade as informações de *near range*, sendo aproveitado cinquenta por cento de cada faixa para a banda X e quarenta por cento no caso da banda P como mostrado na Figura 4.

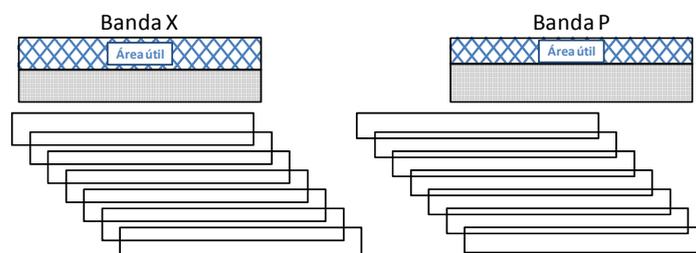


Figura 4. Superposição das áreas úteis para as Bandas X e P.

4. Obtenção da Cota da Superfície das Massas D'águas

As superfícies de águas relativamente calmas aparecem escuras em uma imagem de radar, principalmente quando aumentam o comprimento de onda do sinal transmitido pelo radar e o afastamento do alvo em relação à posição do *near range*, pois a maior parte do pulso

incidente é refletida em um ângulo fora do alcance de visada do receptor. Dizemos nesse caso que houve um espalhamento especular, processo inverso ao retroespalhamento, onde o pulso refletido retorna pelo mesmo caminho em que chegou à superfície. Com isso, no processamento interferométrico, as áreas com baixo ou nenhum valor de retroespalhamento conduzem a valores reduzidos da coerência interferométrica, o que ocasiona regiões sem informação altimétrica nos modelos digitais de elevação que são obtidos nesse processamento.

Nesse contexto, foi observado que, após o mosaico das faixas, algumas imagens da banda X possuíam informações altimétricas em áreas de massa d'água aparente (rios, lagos, dentre outros), conforme pode ser observado na Figura 5.

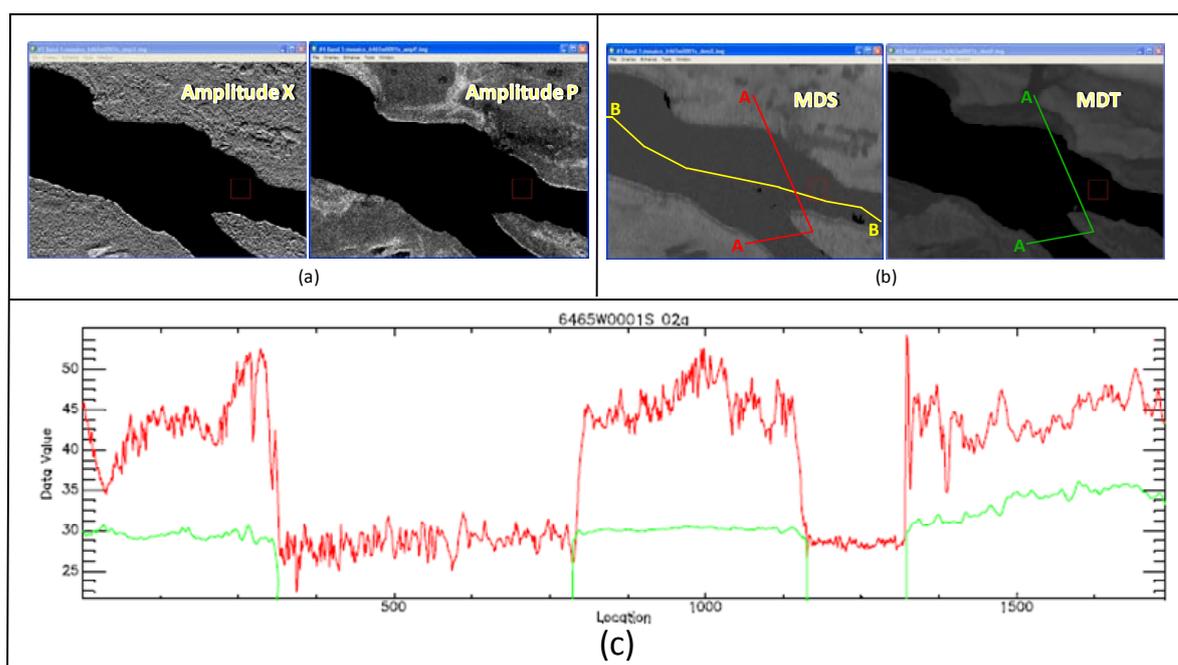


Figura 5. (a) Imagens em amplitude nas bandas X e P, (b) modelos digitais de superfície (MDS) e do Terreno (MDT) e (c) perfil altimétrico no trecho A-A.

O perfil mostrado na Figura 5 representa a variação da altimetria ao longo do trecho A-A para as imagens do bloco situado entre as latitudes 0° e 1° S e longitude longitudes 64° e 65° W (Bloco 6465W0001S). A linha vermelha representa o resultado da altimetria para o MDS ao longo da do trecho A-A, e a linha verde ao longo do MDT. A Figura 6 mostra a análise para a variação da altura do nível da água ao longo da massa d'água, seguindo o percurso B-B. Esta amostra é composta por 7164 elementos, com valor médio de 28,53 m e desvio padrão de 1,437280 m. No Projeto Radiografia da Amazônia, as escala de trabalho (1:100.000 e 1:50.0000) exigem uma precisão altimétrica de 5 m, os dados obtidos são compatíveis com as escalas em questão.

A análise dos dados do trecho B-B e dos outros trechos que apresentam informações para áreas de massas d'água aparente e rios ao longo do bloco 6465W0001S, também apresentou resultados compatíveis com as informações apresentadas na Figura 6.

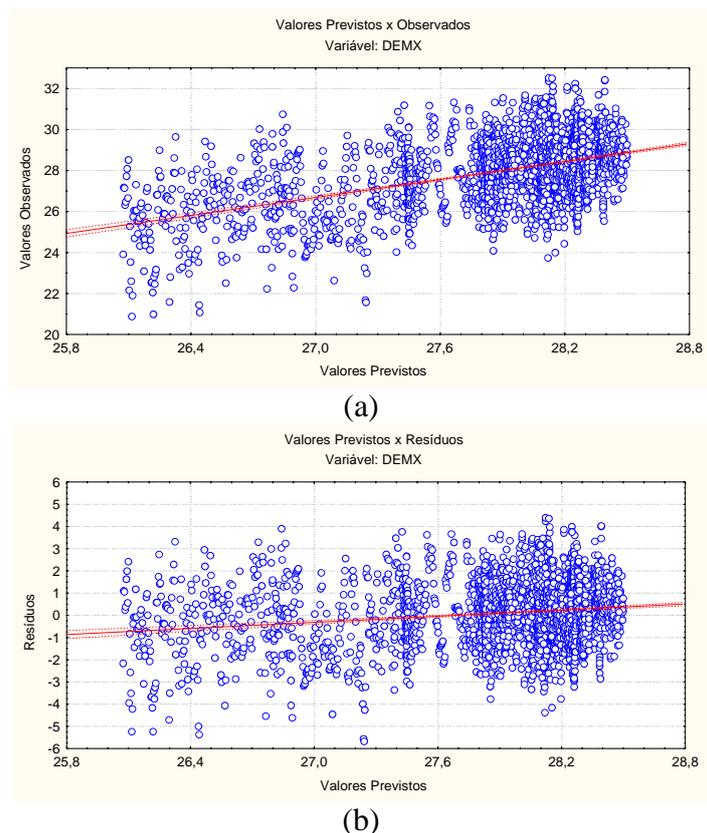


Figura 6. (a) Gráfico da dispersão dos valores previsto versus os valores observados para a altimetria no trecho B-B, (b) Gráfico da dispersão dos valores previsto versus os resíduos no trecho B-B.

5. Nivelamento das Massas D'águas

O procedimento de extração das informações altimétricas descrito na Seção 4 é possível de ser aplicado para todas as massas d'águas aparentes na área de abrangência do projeto, devido à respectiva localizada na região do *near range* das imagens SAR. Portanto, para evitar que os modelos digitais de superfície e do terreno contenham valores altimétricos do tipo *dummy*, igual a -9999, que representam os pixels onde o retroespalhamento radar é próximo de zero, foi desenvolvida uma metodologia para nivelamento das massas d'águas que apresentam esses valores, conforme descrito a seguir.

5.1. Confecção da Mascara Banda X

Utilizando as imagens obtidas do processamento da banda X (amplitude e modelo interferométrico) é gerada uma mascara para os rios e massas d'água aparente. Depois de gerada a mascara, esta é enviada ao Controle de qualidade (CQ) para ser executada a revisão e devidas correções.

5.2. Confecção da Mascara Banda P

Utilizando as imagens obtidas do processamento da banda P (amplitude e modelo interferométrico) é complementada a mascara para banda X. São contemplados todos os rios e massas d'água existentes no modelo e que tem representação na escala de 1:50.000. Depois de gerada a mascara, esta é enviada ao Controle de qualidade (CQ) para ser executada a revisão e devidas correções.

5.3. Nivelamento das Massas D'água

O primeiro passo é aplicar a máscara de rios para a banda P no MDT e a máscara de rios para a banda X no MDS. Após a aplicação das máscaras, deve ser aplicada a metodologia de nivelamento desenvolvida no CIGEx para o MDS.

Inicia-se o nivelamento dos rios secundários no MDT. Aplica-se o nivelamento através do programa *perfil* (parâmetros de entrada: a largura do *buffer* que se deseja aplicar (em pixels), a cota inicial e cota final). Depois de ter sido selecionado o traçado a ser percorrido, o programa aplica uma interpolação linear entre os pontos inicial e final, preenchendo as áreas que não possuem informação (-9999) até o limite do *buffer* selecionado. Antes da finalização do programa pode ser aplicado um *off-set* aos dados e alterada a largura do *buffer*.

Para os lagos ou áreas alagadas, deve ser utilizado o programa *fill_lakes* (parâmetro de entrada: cota a ser aplicada). Deve ser selecionada a área a ser preenchida com a cota de entrada, o programa preenche as áreas que não possuem informação (-9999).

Com este procedimento é gerada a imagem chamada de nivelamento-2. As áreas que não foram preenchidas com os programas *perfil* e *fill_lakes* são preenchidas com os dados do nivelamento-1, sendo gerado o nivelamento-final.

4. Conclusões

Com base nos resultados apresentados para a área de estudo mostrada na Figura 5 e também nas demais áreas do bloco 6465W0001S, foram obtidas informações altimétricas de diversos trechos de rios. A análise destas informações e do comportamento do terreno associado a técnicas de interpolação de dados permite a obtenção de informações altimétricas para as massas d'água e rios. Deve ser levado em consideração que os valores obtidos para áreas diferentes podem apresentar resultados diferentes em função da época em que foi realizado o levantamento aéreo em função do regime de chuvas.

Além disso, foi descrita uma metodologia de nivelamento das massas d'águas aparentes que eliminam os valores indesejados do tipo *dummy*, que representam áreas das imagens sem informação altimétrica.

Os procedimentos descritos permitem a obtenção de um modelo sem áreas de descontinuidade (-9999) o que permite uma melhor análise do comportamento do terreno e estudo das bacias hidrográficas.

5. Referências Bibliográficas

- DSG, 2000. **Relatório Técnico do Teste de Aerolevante Radar nas Bandas "P" e "X", em Santarém-PA**. Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/Plano/pcn10.htm>>.
- Dutra, L.V.; M.T. Elmiro; B.S.S. Filho; J.C. Mura; J.R. Santos; C.C. Freitas; L.S. Araújo; P.C.G. Albuquerque; P.R. Vieira e F.F. Gama, 2002. Assessment of Digital Elevation Models obtained in Brazilian Amazon based on P and X band Airborne Interferometric Data, **Anais do International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Vol I, Toronto, Canadá.
- CENSIPAM, 2008. Subprojeto Cartografia Terrestre, Documento de Referência do Acordo de Cooperação Técnica no 03/2008, de 26 de fevereiro de 2008, celebrado entre o CENSIPAM, o Comando do Exército, o Comando da Marinha, o Comando da Aeronáutica, e o Serviço Geológico do Brasil.
- ITT, 2008. IDL 7.0.2/ENVI 4.5. Disponível em <<http://www.itvis.com/ProductServices.aspx>>. Acesso em: 15.mar.2010.
- Correia, A. H. et al. Projeto Radiografia da Amazônia: metodologia de aerolevante SAR (bandas X e P) e apoio de campo. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 24, 2010. Aracaju. **Anais**.
- Madsen, S. N. e H. A Zebker, 1998. **Imaging Radar Interferometry, In Manual of Remote Sensing, Vol 2, principles & applications of imaging radar (3rd ed) John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 359-380.**
- Gaboardi, C. Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.
- Quarzeddine, M. S. Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry. (MSc Degree) – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2002. 64p.