

## Geocodificação Automática de Imagens SAR Interferométricas

José Claudio Mura

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
12.227-010 São José dos Campos, Brasil

Fone +55 12 345 6517 Fax: +55 12 345 6468 E-mail: mura@dpi.inpe.br

**Abstract** The generation of topographic map from Interferometric SAR data (InSAR), involves two processing parts, the InSAR processing and the InSAR Geocoding. The first part can be done in the automatic mode, because the algorithms involved are efficient and well known. In the second part, the phase calibration is the critical processing step. This work describes a procedure, using a new and efficient method of phase calibration, in order to make the automatic InSAR Geocoding feasible. Experimental results are provided, in order to confirm the feasibility of the automatic InSAR Geocoding procedure.

**Keywords:** geocodificação, SAR, interferometria

### 1 – Introdução

Interferometria SAR é uma técnica que utiliza um par de imagens SAR no formato complexo, de amplitude e fase, para gerar uma terceira imagem complexa, dita imagem interferométrica, cuja fase de cada pixel, dita fase interferométrica, é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais. A fase interferométrica está relacionada com a elevação do terreno (Zebker e Goldstein, 1996)

A imagem de fase interferométrica, também conhecida como interferograma, apresenta padrões do tipo franjas, devido ao caráter cíclico da fase (módulo de  $2\pi$ ). Para que fase interferométrica possa ser utilizado na geração de Modelo Numérico de Terreno (MNT), o seu caráter cíclico deve ser removido, ou seja, ela deve passar por um processo de desdobramento.

A utilização da técnica de Interferometria de imagens de Radar de Abertura Sintética (Synthetic Aperture Radar), SAR, é uma nova tecnologia para a geração de produtos cartográficos. Uma das vantagens do uso desta tecnologia, é a estimativa mais precisa do tempo de execução de um projeto de mapeamento, devido a previsibilidade da aquisição dos dados, mesmo com cobertura de nuvens ou na ausência da luz do dia, e a possibilidade da geração automática de produtos cartográficos, como a orto-imagem SAR e o Modelo Numérico de Terreno.

O processo de geração de produtos cartográficos, utilizando a técnica de Interferometria SAR (InSAR), pode ser dividido em duas partes. A primeira parte trata-se do *Processamento SAR Interferométrico*, onde são geradas as imagens SAR, o interferograma, gerado a partir de um par de imagens SAR corregradas, e o desdobramento de fase do interferograma. A segunda parte trata-se da *Geocodificação InSAR*, onde é gerado a orto-imagem SAR e o Modelo Numérico de Terreno. A primeira parte pode ser realizada no modo automático, pois os algoritmos envolvidos já são bem conhecidos e eficientes. A segunda parte possui uma etapa crítica conhecida como “calibração de fase”. A calibração de fase está relacionada à estimativa do “*offset*” de fase associado a cada interferograma.

## 2 – Geocodificação de imagens SAR interferométricas

A Geocodificação de Imagem SAR para fins cartográficos, passa pela geração da orto-imagem SAR sobre uma grade, representada em projeção (UTM, Lambert, etc.), 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.

Devido ao relevo, a forma da Terra não pode ser descrita precisamente através de equações de elipsóide ou geóide, necessitando-se de informações da topografia do terreno, para que as distorções geométricas possam ser corrigidas, no processo de geração das orto-imagens SAR.

A formulação de “*range-Doppler*” para formação de imagem SAR, tem sido também aplicada na geocodificação SAR, onde as coordenadas de um ponto no espaço, são calculadas a partir da medida de “*range*” e da variação de frequência Doppler do ponto, no instante em que este ponto é visto no centro do feixe da antena (Curlander, 1982). Meier et al. (1993) introduziu nesta formulação a informação de elevação do terreno, para que o efeito das distorções geométricas pudessem ser corrigidos.

A geocodificação de imagens SAR interferométricas, segue as equações da formulação “*range-Doppler*”. A diferença está no modo de obtenção da elevação do terreno, que neste caso é obtida a partir da fase interferométrica absoluta. Diversos métodos de conversão da fase interferométrica absoluta em medida de elevação do terreno têm sido propostos

O método utilizado neste trabalho, proposto por Goblirsch e Pasquali (1996), calcula a posição de P a partir da solução conjunta das equações de “*range-Doppler*” para as duas aquisições, levando em consideração que a diferença de distância entre os sensores e o ponto P, é governada pela fase interferométrica absoluta. O vetor de estado das duas aquisições

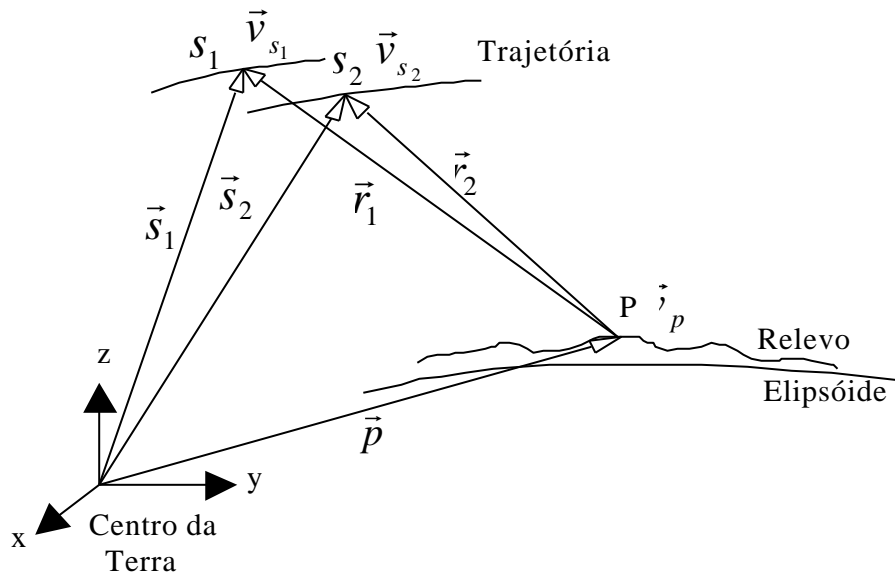


Figura 2.3 - Representação geométrica do posicionamento de um ponto P, para aquisição de dados no modo interferométrico.

O equacionamento de “*range-Doppler*” conjunto para as duas aquisições, está baseado nos vetores de estado dos sensores (antenas), representados na Figura 2.3. Este equacionamento é dado por:

equação de “range” da antena 1,

$$r_1 = |\vec{r}_1| = |\vec{p} - \vec{s}_1| \quad (2.1)$$

da equação Doppler da antena 1,

$$f_{D_1} = \frac{(\vec{p} - \vec{s}_1)(\vec{v}_p - \vec{v}_{s_1})}{r_1} \frac{2}{\lambda_T} \quad (2.2)$$

da equação de “range” da antena 2,

$$r_2 = r_1 + \Delta_r = r_1 + \frac{\lambda \Delta f_{abs}}{4p} \quad (2.3)$$

da equação Doppler da antena 2,

$$f_{D_2} = \frac{(\vec{p} - \vec{s}_2)(\vec{v}_p - \vec{v}_{s_2})}{r_2} \frac{2}{\lambda_T} \quad (2.4)$$

onde  $s_1$  representa o sensor 1 (antena 1) e  $s_2$  o sensor 2 (antena 2).

Os vetores de estado do sensor,  $\vec{s}$  e  $\vec{v}_s$ , são obtido a partir das amostras dos dados do sistema de navegação do satélite, no caso do uso de radares orbitais. No caso de radares aerotransportados, as amostras são adquiridas através do uso de plataforma inercial (INS) e de dados de DGPS (Barmetller et al., 1998).

A determinação do posicionamento do ponto P no sistema cartesiano, ou seja,  $p_x, p_y$  e  $p_z$ , passa pela solução das Equações 2.1 2.2, 2.3 e 2.4, que constituem um sistema de equações não lineares, podendo ser solucionado por métodos numéricos, como o método de Newton, o método de Broyden, etc. (Press et al., 1992). Este modo de determinação das coordenadas cartesianas de um ponto, a partir do vetor de estado da antena, é conhecido como geocodificação direta.

O ponto P no sistema cartesiano, pode ser reposicionado em um mapa de projeção e elipsóide desejado, através das transformações de sistemas de referência (Frei, 1993). Reposicionando todos os pontos, pode-se gerar a orto-imagem carta e o MNT geo-referenciados.

### 3 – Geocodificação automática InSAR

O processo de geração de produtos cartográficos por interferometria SAR, passa por várias etapas de processamento, que vão desde a geração da imagem SAR, geração do interferograma, geração da imagem de coerência, desdobramento de fase, calibração de fase, geração de MNT, geração de orto-imagem SAR, geração de mapa de resolução, mosaicagem das orto-imagens SAR e dos MNTs, até a geração das curvas de nível para a produção da orto-imagem carta. As 4 primeiras etapas de processamento são realizadas automaticamente através do processo chamado de *Processamento SAR Interferométrico*.

Neste trabalho, automatizou-se as outras 7 etapas finais do processamento. A Figura 3.1 ilustra o fluxo do processamento do processo automático de geocodificação InSAR, denominado de sistema Geo-InSAR.

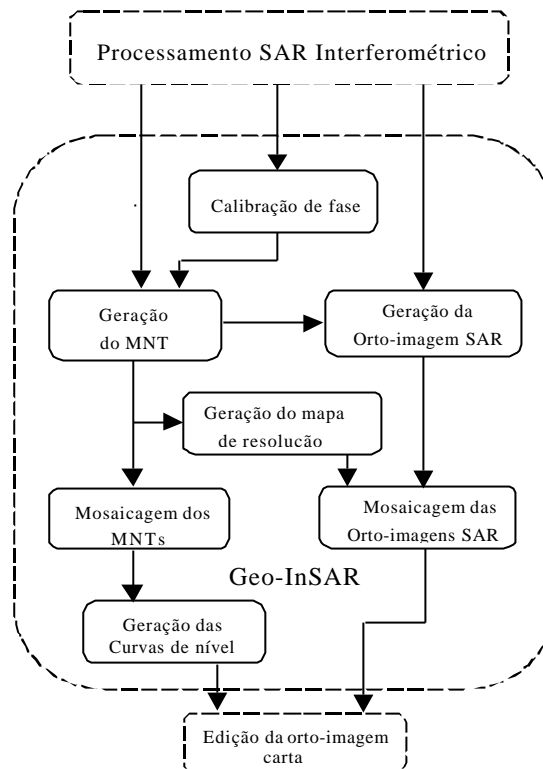


Fig. 3.1 - Fluxo de processamento para geração de orto-imagem carta.

### 3.1 – Calibração de fase

A etapa de calibração de fase, ou seja, a etapa onde se determina o “*offset*” de fase, para a geração da fase interferométrica absoluta, é uma das etapas mais críticas da geocodificação automática. Este “*offset*” pode ser determinado através do uso de pontos de controle, que é um meio caro e nem sempre disponível, ou através de métodos propostos por Pasquali e Holecz (1998) e Mura (2000). Computacionalmente o segundo método é bem mais eficiente que o primeiro, e é o método empregado neste trabalho.

A exatidão altimétrica do MNT de uma carta, depende da exata calibração das fases desdobradas, contidas no mosaico de uma carta. Geralmente uma orto-imagem carta é composta de várias imagens SAR. A quantidade de imagens envolvidas depende da largura da faixa de vôo do radar e também da escala em que se deseja gerar a carta. Para cada imagem SAR, tem-se a respectiva fase desdobrada com “*offset*” de fase desconhecido. A etapa de calibração de fase, consiste na determinação dos valores de “*offset*” de cada imagem presente na carta.

### 3.2 – Geração de modelo de elevação e de orto-imagem SAR

A geração de MNT a partir de dados SAR interferométricos, passa primeiramente pela determinação das coordenadas cartesianas de cada ponto da imagem SAR, onde se utiliza o valor da fase interferométrica absoluta, para o exato posicionamento de cada ponto, neste sistema de coordenadas. A geração de orto-imagem SAR caminha em paralelo com o do MNT, ou seja, no caso de um ponto genérico  $P(x,y,z)$ , no sistema de coordenadas cartesianas, é dado a ele um valor de reflectância, vindo da imagem SAR, da mesma posição de linha e coluna da fase interferométrica absoluta.

A elevação de um ponto genérico  $P(x,y,z)$ , no sistema de coordenadas cartesianas, está ligada a uma referência. Para que este ponto tenha um valor de elevação, ou seja, uma altura em relação a uma referência, ele sofre várias transformações de sistemas de coordenadas. A primeira transformação consiste da mudança de coordenadas, de cartesianas para geográficas, utilizando as equações de Helmert (Frei et al., 1993), onde é dado ao ponto um valor de elevação em relação a um elipsóide de referência, como ilustrado na Figura 3.2

Nesta primeira transformação utiliza-se um elipsóide de referência global, o WGS84 por exemplo, que é uma representação matemática da superfície da Terra. A representação de um ponto genérico, no novo sistema de coordenadas,  $P(l, j, h_e)$ , é dado pela longitude do ponto,  $\lambda$ , latitude do ponto,  $\phi$ , e altura do ponto,  $h_e$ , em relação ao elipsóide de referência WGS84.

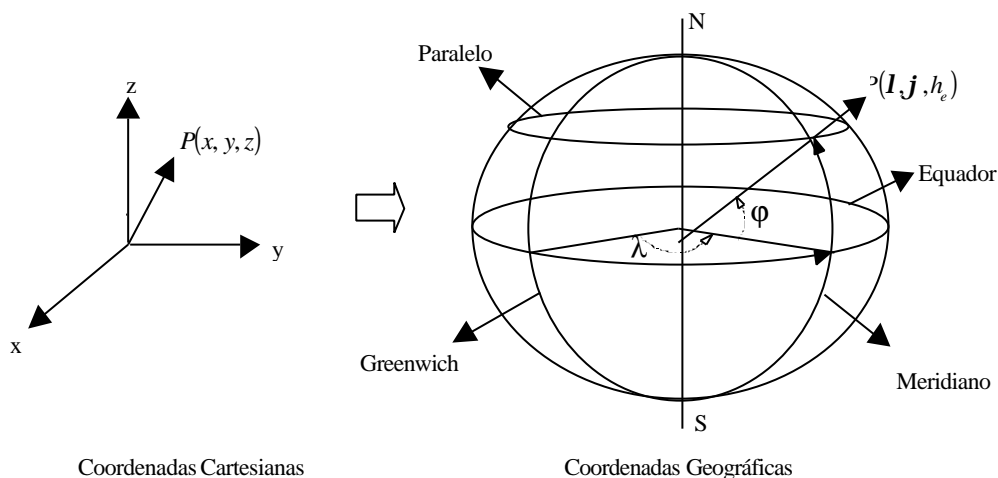


Fig. 3.2 - Transformações Cartográficas (Fonte: Schreier, 1993).

A representação da forma da Terra por um elipsóide global, é uma representação aproximada. A melhor representação da forma da Terra, é modelada pelo nível médio dos oceanos, chamado de geóide, que representa uma superfície equipotencial correspondente a uma elevação absoluta de zero metros (Schreier, 1993). O potencial gravitacional em qualquer ponto sobre o geóide deve ser o mesmo, e a direção da gravidade é sempre perpendicular ao geóide.

Como o elipsóide global não casa muito bem com o geóide, devido a variação da densidade da Terra, utiliza-se normalmente elipsóides locais, e pontos de origem chamados de datum, para que haja uma melhor representação matemática da superfície da Terra, no local onde se deseja fazer o mapeamento. Uma outra transformação é realizada nos valores de elevação, para que se tenha uma altura ortométrica, em relação ao geóide, ao invés da altura elipsoidal, pois o geóide garante fisicamente que superfícies de água sejam representadas por níveis horizontais.

A última transformação que o MNT sofre, para que seja gerada uma carta topográfica, é a transformação de projeção. Diversas projeções têm sido propostas, para que a superfície da Terra seja representada por uma superfície plana, tais como: UTM, Lambert, Esteroscópica, etc. (Oliveira, 1988). No Brasil, utiliza-se normalmente o sistema de projeção UTM, com datum planimétrico SAD 69 e elipsóide de referência 67, e datum altimétrico de Imbituba.

### 3.3 – Mosaicagem e geração das curvas de níveis

A radiometria do radar sofre bastante influência da topografia do terreno, principalmente devido à geometria de visada lateral utilizada. A variação de brilho na imagem SAR, depende do ângulo de incidência em que a frente de onda do radar atinge a superfície. O mapa de resolução espacial local fornece valores que estão relacionados com a energia de retorno para o radar, onde a resolução espacial é calculada a partir das derivadas locais do MNT, nas direções de “range” e azimute. Durante o processo de mosaicagem das orto-imagens SAR, os mapas de resolução podem ser utilizados, para que o efeito da topografia na radiometria seja minimizado.

O processo de mosaicagem das orto-imagens, consiste basicamente em dispor cada uma delas, segundo as suas coordenadas geográficas, na área delimitada pelas coordenadas da carta. Nas regiões onde existem sobreposições de orto-imagens, o processo da mosaicagem utiliza o mapa de resolução, para selecionar a orto-imagem de referência, ou seja, de qual orto-imagem se toma o valor de reflectância para o mosaico.

O processo de mosaicagem dos MNTs consiste basicamente em dispor cada um deles, segundo as suas coordenadas geográficas, na área delimitada pelas coordenadas da carta. Nas regiões onde existem as sobreposições de MNTs, normalmente calcula-se o valor médio dos MNTs, em cada ponto desta região.

Para que o MNT de uma carta possa ser melhor representado, ele é colocado na forma de curvas de nível, obtidas através de um processo de fatiamento do MNT, em intervalos definidos pela escala da carta.

### 4 – Testes e resultados

O experimento realizado para a avaliação do processo automático de Geocodificação de imagens SAR interferométricas, baseou-se na geração de um conjunto de orto-imagens carta, a partir de imagens SAR e interferogramas com resolução espacial de 1m x 1m metros, possibilitando a geração de cartas na escala igual e inferiores a 1:5000. Foram geradas várias orto-imagens cartas, cobrindo uma área retangular conforme ilustrado na Figura 4.1. As duas cartas nas extremidades do retângulo, ou seja, a carta 1\_1 e a carta 1\_5, possuem “corners reflectors”.

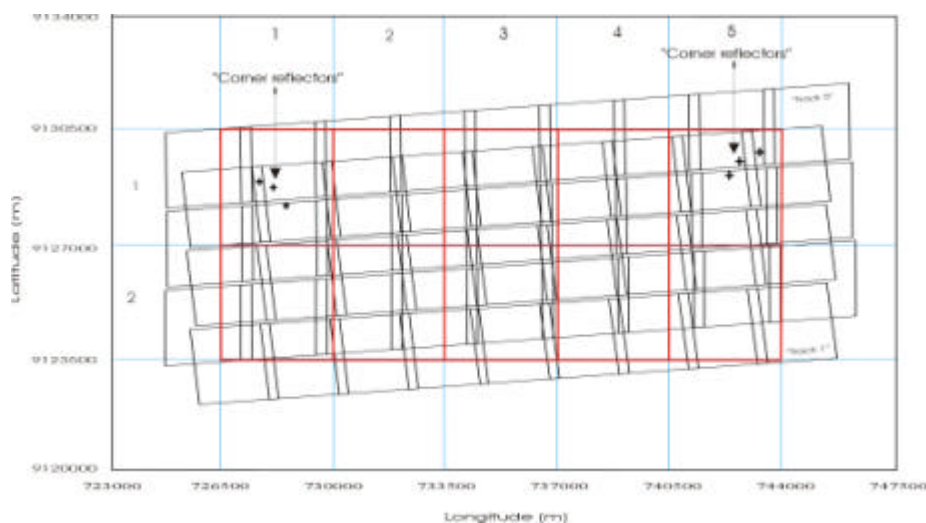


Fig. 4.1 - Área de teste

O propósito do experimento, foi a verificação do desempenho do processo automático de geocodificação InSAR, utilizando o novo método de calibração proposto por Mura (2000). Também determinou-se as diferenças entre os MNTs das cartas geradas, com o intuito de verificar possíveis propagações de erros entre eles. Para que as diferenças entre as cartas fossem computadas, cada carta possui uma área de sobreposição com as cartas vizinhas. A Figura 4.2 apresenta o mosaico de orto-imagens SAR da área de teste, e a Figura 4.3 apresenta o mosaico de MNTs, com as áreas de sobreposição entre eles representadas em cores, indicando a diferença altimétrica entre eles.

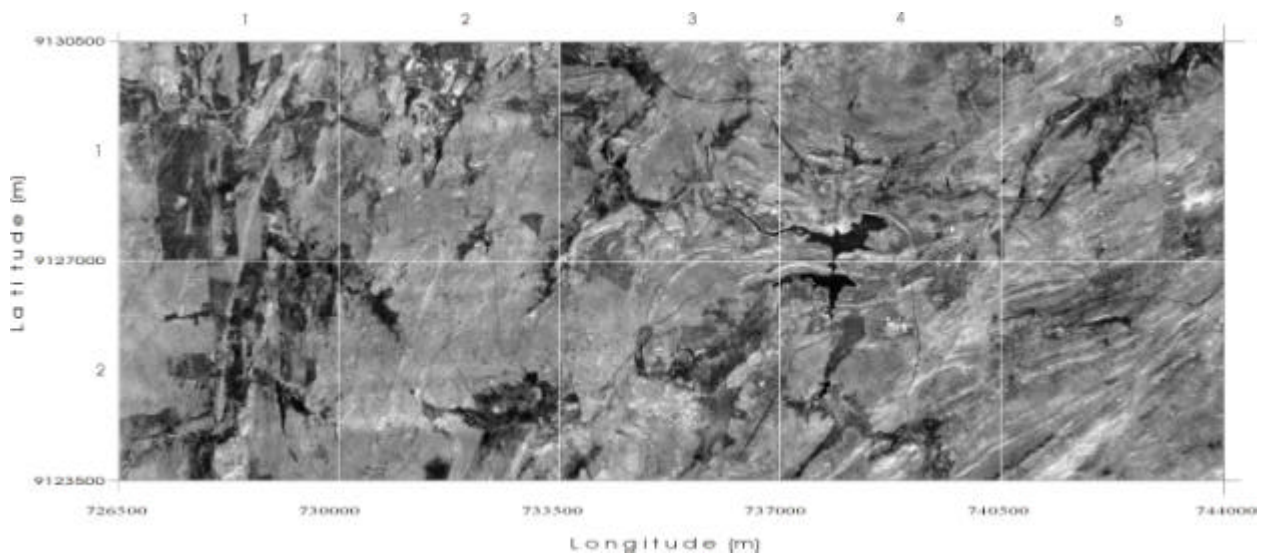


Fig. 4.2 – Mosaico de orto-imagens SAR.

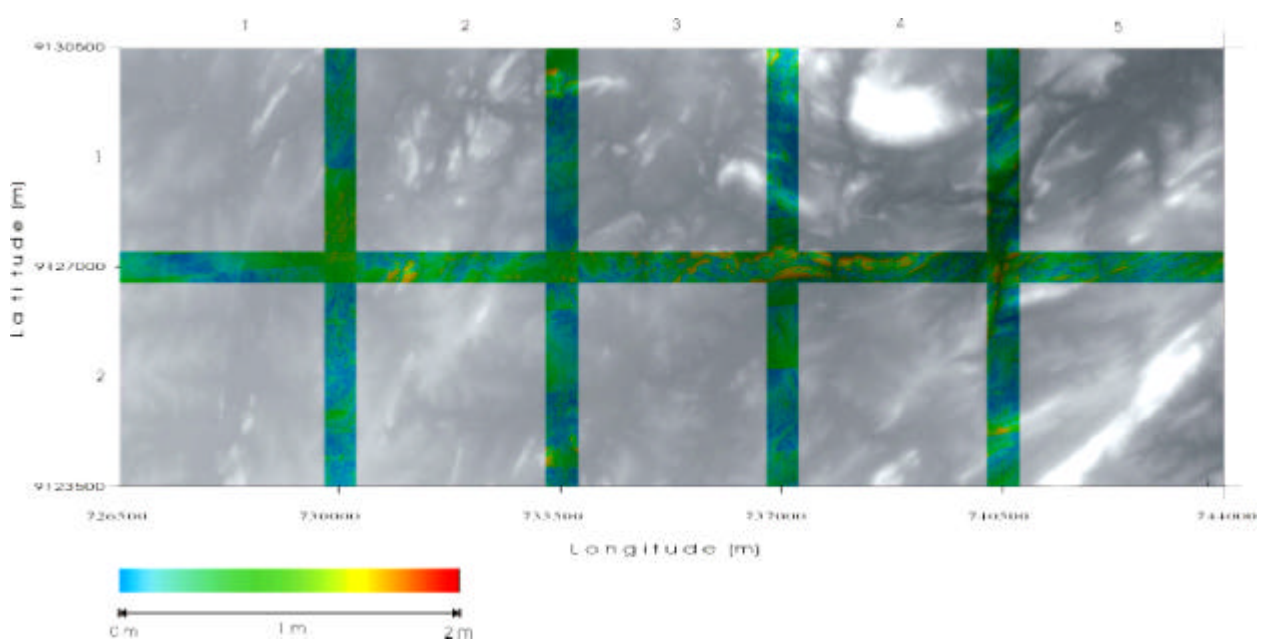


Fig. 4.3 – Mosaico de MNTs com área de sobreposição entre eles.

## 5 - Conclusões

Os resultados gerados pelo processo automático de geocodificação InSAR, mostram que não houve erro sistemático nos modelos de elevação gerados, na área testada, também não houve tendência de erro, caracterizando a não propagação de erros.

Em termos da geração automática de orto-imagens carta, pode-se concluir que este processo é adequado para a geração de carta nas escalas inferiores a 1:5000, sem nenhuma intervenção manual. Nas escalas iguais e superiores a 1:5000 necessitam de pequenos ajustes manuais nos MNT de cada carta, para que os erros estejam dentro dos limite especificados para estas escalas.

O método de calibração de fase utilizado, mostrou-se apropriado para ser utilizado em um processo automático de geocodificação de imagens SAR interferométricas, bem como a possibilidade da redução do número de pontos de controle. A redução do número de pontos de controle, a redução do tempo de processamento, e a automatização do processo como um todo, reduz o custo de um projeto de produção cartográfica baseado em radargrametria.

## 6 – Bibliografia

- Barmetler, A.; Meier, E.; Nüesch, D. SAR preprocessing: flight tracks reconstruction using GPS and INS [online], Zurich, Switzerland, University of Zurich: Remote Sensing Laboratory: <<http://www.geo.unizh.ch/rsl/projects/gpsimu>>, Dec. 1998.
- Curlander, J. C. Location of spaceborne SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-20(3), p. 359-364, 1982.
- Frei, Urs; Graf K. C.; Meier E. Cartographic Reference System. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 10, p. 213-234.
- Goblirsch, W.; Pasquali, P. Algorithms for calculation of digital surface models from the unwrapped interferometric phase. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, 1996. **Proceeding**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. v. 1, p. 656-658.
- Meier, E.; Frei, U.; Nüesch, D. Precise Terrain Correct Geocoded Images. In: **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe: Wichmann Verlag, 1993, cap. 7, p. 173-186.
- Mura, J. C. Geocodificação Automática de Imagens de Radar de Abertura Sintética Interferométrico: Sistema Geo-InSAR, Tese de Doutorado, INPE, agosto, 2000.
- Oliveira, C. **Curso de Cartografia Moderna. Rio de Janeiro**: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1988.
- Pasquali, P.; Holecz, F. InSAR phase calibration [online], Ticino, Switzerland: SARMAP S.A., <<http://www.sarmap.ch>>, Jan. 1998.
- Press, W. H; Flannery B. P. Numerical Recipes in C: **The Art of Scientific Computing**. Cambridge: Cambridge University Press, 2nd ed. ,1992.
- Schreier, G. **SAR geocoding: data and systems**. Kalsruhe:Wichmann Verlag, 1993.
- Zebker, H.; Goldstein, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. B5, p. 4993-4999, April 1986.