

PRODUÇÃO DE CARTA TOPOGRÁFICA POR ESTEREOSCOPIA DE ALTA RESOLUÇÃO DO RADARSAT-1 INTEGRADA COM DADOS TM-LANDSAT 5: UMA AVALIAÇÃO PARA TERRENOS PLANOS NA FLORESTA NACIONAL DE TAPAJÓS (PA)

WALDIR RENATO PARADELLA¹, IZABEL CRISTINA FRANCHITTO CECARELLI², SILVIA LUIZ², CLEBER GONZALES DE OLIVEIRA², CARLA PEREIRA COTTINI² & ROSANA OKIDA²

Abstract *PRODUCTION OF TOPOGRAPHIC MAP BY RADARSAT-1 HIGH RESOLUTION STEREOSCOPY INTEGRATED WITH TM-LANDSAT 5 DATA: AN EVALUATION FOR FLAT TERRAINS IN THE TAPAJOS NATIONAL FOREST (PA)* The feasibility of production of topographic maps based on orbital remote sensing data was investigated for the Brazilian Amazon Region. The selected test-site was an area with a low topographic relief within the National Tapajós Forest, Pará State. Two kinds of radargrammetric DEMs (Digital Elevation Models), relative and absolute, were generated based on a Fine RADARSAT-1 stereo-pair (Fine 2, Fine 5) and evaluated regarding the altimetric information content. The geometric modeling for the DEM extractions was based on the "RADARSAT-1 Specific" model from the OESE (OrthoEngine Satellite Edition, PCI Geomatics) software, an automated matching solution which takes into account slant range distances from sensor/terrain. The planimetric features were extracted from integrated Fine/TM-Landsat products. Precise planialtimetric field information from DGPS (Differential Global Positioning System) was used as GCPs (Ground Control Points) for the modeling of the absolute DEM and for the orthorectification of the radar and optical data, and as ICP (Independent Control Points), for the calculation of planialtimetric accuracies of the topographic map. The investigation has shown that the planialtimetric accuracy of the topographic map met the requirements for 1:100,000-map (class A) as requested by the Brazilian Cartographic Accuracy Pattern (PEC). The spaceborne imaging radar technology represents an alternative to aerial optical and radar data for topographic mapping at semi-detailed scale (1:100,000) in similar environments of the Brazilian Amazon. The investigation was carried out through an INPE-Geoambiente's project with funds from the PIPE Program of FAPESP.

Keywords: DEM, RADARSAT-1 Fine stereoscopy, topographic mapping, Landsat-5 TM, Amazon Region

Resumo A viabilidade de produção de cartas topográficas para a Amazônia brasileira foi investigada com sensores remotos orbitais. Como área teste foi selecionado um ambiente de terreno plano na Floresta Nacional de Tapajós (estado do Pará). Dois tipos de DEMs (Modelos Digitais de Elevação) radargramétricos (relativo e absoluto) foram gerados a partir de um estereó-par Fine RADARSAT-1 (Fine 2, Fine 5) e avaliados em termos do conteúdo de informação altimétrica. O modelamento geométrico na extração dos DEMs foi baseado no "RADARSAT-1 Specific Model", do software OESE (OrthoEngine Satellite Edition, PCI Geomatics), num cálculo que maximiza o coeficiente de correlação e leva em consideração distâncias "slant-range" entre o sensor/terreno. As feições planimétricas foram extraídas de produtos integrados Fine/TM-Landsat 5. Informações planialtimétricas de precisão de campo com DGPS (Differential Global Positioning System) foram usadas como GCPs (Ground Control Points) para o modelamento do DEM absoluto, na ortoretificação dos dados de radar e ópticos, e como ICPs (Independent Control Points), para o cálculo de acurácias planialtimétricas da carta topográfica. A investigação mostrou que a acurácia planialtimétrica da carta topográfica atendeu aos requisitos de mapeamento 1:100.000, classe A, do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nacional. A tecnologia espacial com radar imageador representa uma alternativa ao uso de sensores aeroportados (ópticos e radar) no mapeamento topográfico de semi-detelhe (1:100.000), de ambientes similares na Amazônia brasileira. A investigação foi conduzida através de um projeto de pesquisa entre o INPE e a empresa Geoambiente, com recursos do Programa PIPE da FAPESP.

Palavras-chaves: DEM, estereoscopia Fine RADARSAT-1, mapeamento topográfico, TM-Landsat 5, Região Amazônica

INTRODUÇÃO A informação com atributo espacial é cada vez mais valiosa na exploração de recursos naturais de um território. O substrato fundamental para a informação geográfica é a carta topográfica. Um DEM é um componente básico na produção de cartas topográficas e é uma importante fonte de dados em análise geoespacial e geração de orto-imagens. No Brasil, apenas 20% do

território possui mapeamento topográfico na escala de 1:50.000, 60% está mapeado na escala de 1:100.000 e em torno de 25% dispõe de cartografia na escala de 1:250.000 ou menor (IBGE 2001). Além disso, deve ser considerado que grande parte deste acervo está desatualizada ou vinculada a bases geodésicas antigas, não compatíveis com o Sistema Geodésico Brasileiro (SAD69) para

1 - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 12227-010, São José dos Campos, SP, waldir@ltid.inpe.br

2 - Geoambiente Sensoriamento Remoto S/C Ltda, 12242-280, São José dos Campos, SP, (izabel, cleber, silvia, carla, rosana)@geoambiente.com.br

trabalhos cartográficos. O problema de desatualização também existe para grande parte das bases existentes em SAD 69. A disponibilidade de recursos para atualização cartográfica e levantamentos sistemáticos com sensores aeroportados (ópticos ou radar) é muito limitada devido aos custos elevados, particularmente na Amazônia. Cartas topográficas atualizadas são prioritárias na retomada da exploração mineral na região (ADIMB 2000).

O advento de sistemas orbitais com radares (SIRs, ERS-1, JERS-1, ERS-2, RADARSAT-1, SRTM) tem fornecido o ímpeto para o desenvolvimento de aplicações cartográficas com dados SAR (Synthetic Aperture Radar). Um SAR é um imageador ativo de rádio-frequência (opera no espectro das microondas de rádio), que permite derivar do componente do sinal retroespalhado, propriedades geométricas e elétricas do terreno. Um SAR apresenta certas vantagens competitivas em relação ao sensor óptico: (a) o imageamento é viável sob condições atmosféricas adversas (nuvens, brumas, chuvas, fumaça); (b) a geometria de iluminação é controlada e independe da fonte solar (aquisição diurna e noturna, maior resolução temporal); (c) a macro-topografia (variações decamétricas de declividade) e a micro-topografia (rugosidade superficial na escala do comprimento de onda do SAR) do terreno são realçadas; (d) o sinal retroespalhado é sensível às propriedades dielétricas dos alvos, controladas pela água ou umidade, (e) a penetrabilidade no alvo é possível (é o único sensor remoto que permite derivar informações dos alvos em condições distintas da superfície). Este tipo de sensor é fundamental para aplicações no trópico úmido. Uma revisão das principais missões com SAR no país e o impacto nas aplicações com o advento dos radares polarimétricos podem ser vistos em Paradella (2001).

Quatro métodos, que apresentam vantagens e desvantagens, têm sido usados na geração de DEMs com SAR: clinometria, estereoscopia ou radargrametria, interferometria e polarimetria (Toutin & Gray 2000). Pela grande versatilidade do satélite RADARSAT-1, permitindo variações em azimute de visada, incidência, área imageada e resolução espacial, a estereoscopia surge como uma opção de grande potencial para cartografia. Na estereoscopia SAR, duas imagens da mesma área são adquiridas sob diferentes perspectivas através de variações de azimutes de visadas e/ou incidências, de modo a permitir a percepção tridimensional (3D). Através da correlação entre as cenas são obtidas paralaxes que permitem derivar a altimetria. Neste contexto, este artigo revê aspectos da fundamentação da estereoscopia SAR e avalia o desempenho de um estéreo-par RADARSAT-1 de elevada resolução espacial (Fine Mode) na produção de DEMs e de carta topográfica inédita em terreno plano na Amazônia (Floresta Nacional de Tapajós). Para derivar a altimetria foi usado o software OESE, da empresa PCI Geomatics (PCI 2001). A planimetria da carta topográfica foi extraída de produtos digitais integrados Fine/TM-Landsat 5. Informações planialtimétricas de precisão, obtidas em campo com DGPS, foram usadas na geração dos DEMs e no cálculo das acurácias planialtimétricas dos produtos cartográficos.

FUNDAMENTAÇÃO A percepção em estéreo de duas imagens SAR é fundamental na localização de pontos para medidas radargramétricas e na reconstrução de modelos em 3D do relevo. A percepção de profundidade é um processo mental sofisticado, que combina indicadores fisiológicos e psicológicos (Vester & Toutin 1997). Há aspectos na geometria de iluminação do radar que produzem efeitos de deslocamento do relevo, diferentes daqueles observados nos sistemas ópticos e de importância fundamental para o entendimento da estereoscopia SAR.

Nas imagens de um SAR, as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor, enquanto que nas imagens ópticas, o deslocamento sob visadas verticais, ocorre radialmente, do nadir para as bordas da cena. Em adição, as linhas de projeção que conectam pontos no terreno com pontos na imagem SAR, seguem círculos concêntricos em relação à localização da antena (Leberl 1998). Outras características únicas de efeitos geométricos em um SAR são o encurtamento de rampas (foreshortening), a inversão de relevo (layover) e a sombra de radar. Deve-se observar que, quanto menor for o ângulo de incidência, maiores serão os efeitos de *foreshortening* e *layover*. Ângulos de incidência maiores minimizam esses efeitos, porém aumentam o sombreado de radar, que representam áreas oclusas (sem informação). Deve ainda ser considerado que a influência da micro-topografia no retroespalhamento do sinal é maior quanto menor for a incidência. Os efeitos de relevo descritos são de grande importância em uma imagem SAR e, conseqüentemente, na composição de pares estereoscópicos. Detalhes sobre estes assuntos, enfocando aplicações na Amazônia, são discutidos em Santos *et al.* (1999) e Paradella *et al.* (2000).

A estereoscopia orbital depende de dois indicadores fotogramétricos: (a) a paralaxe estereoscópica, que se relaciona com a aparente mudança da posição de objetos, quando vistos de diferentes posições, e (b) o ângulo de interseção estereoscópica, medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas do par. Considerando-se a experiência com a fotogrametria, uma boa geometria em estéreo é obtida quando o ângulo de interseção das imagens no par é o maior possível. Nesta situação, ocorre a maximização da paralaxe observada, a qual é usada para derivar a elevação do terreno. Por outro lado, uma ótima configuração em estereoscopia SAR requer que as duas cenas sejam as mais similares possíveis radiométricamente. Isto implica em pequenos ângulos de interseção para que as respostas de retroespalhamento sejam as mais próximas possíveis. Toutin (1997) propõe a Razão de Paralaxe Vertical (VPR-Vertical Parallax Ratio), como um critério adequado para a estimativa de melhor configuração em estéreo-par SAR. A VPR é definida como:

$$VPR = p/h = [\cot_R - \cot_L]$$

onde, p é a paralaxe de elevação, h é elevação do alvo, \cot_R e \cot_L as cotangentes dos ângulos de visada (look angle) das imagens no par (direita/esquerda). Desconsiderando a curvatura da Terra, o ângulo de visada é igual ao de incidência. Assim, quanto maior o VPR, melhor a percepção em 3D e maior o potencial em derivar a altimetria.

Dois tipos de estereoscopia SAR são possíveis devido à geometria de observação lateral e ao azimute de visada: mesmo sentido e em sentidos opostos (Fig. 1). No primeiro caso, o terreno é iluminado sob mesmo azimute de visada nas duas cenas, ocorrendo apenas variações em incidência. Na estereoscopia de sentidos opostos, a mesma área é iluminada obliquamente em sentidos opostos (diferentes azimutes de iluminação). Neste caso, a variação dos ângulos de incidência nas cenas é extremamente ampla.

É importante enfatizar que a estereoscopia de mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as imagens do estéreo-par, enquanto que a estereoscopia de sentidos opostos, leva a extremos de disparidades geométrica e radiométrica entre as imagens. Assim, em um par ideal, as imagens devem ser muito similares entre si, de modo que haja uma boa correlação radiométrica entre elas, resultando em uma boa visibilidade estereoscópica. Esse par, por outro lado, deve ser constituído por imagens com geometrias, as mais díspares possíveis, para que apresentem gran-

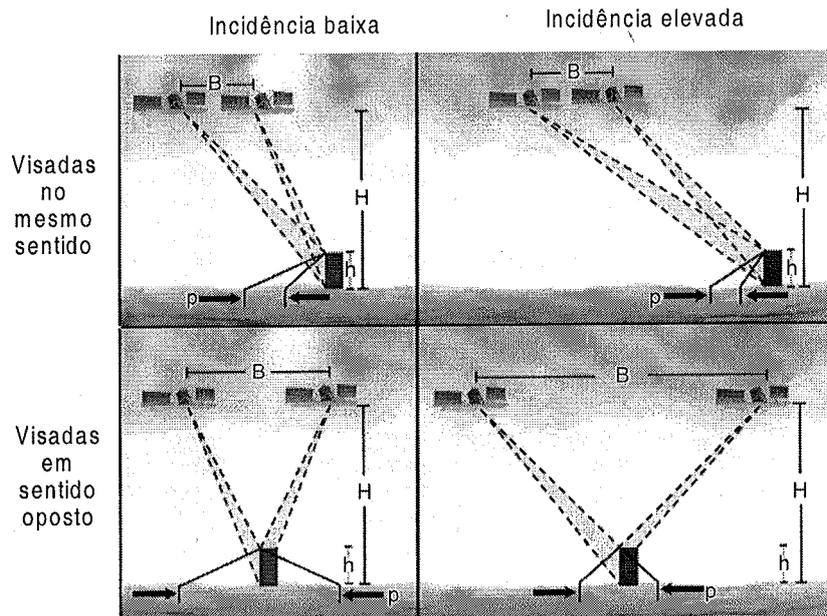


Figura 1 - Exemplos de configuração de estéreo-pares do RADARSAT-1 (mesmo lado e lados opostos, ângulos de incidência pequenos e elevados, fonte: Toutin 1998).

des paralaxes (Fullerton *et al.* 1986, Toutin 1996). A abordagem com dados ópticos modela erros na extração do DEM por meio de parâmetros geométricos e negligencia o aspecto radiométrico das cenas, que é a base para o processo de correlação automática na derivação da elevação na radargrametria. Isto explica porque grandes ângulos de interseção e elevada resolução espacial de imagens SAR nem sempre fornecem DEMs com elevada acurácia. Em vários experimentos, a acurácia altimétrica tende inclusive a comportar-se de modo oposto, especialmente para terrenos com topografia acidentada. Somente em casos extremos de relevos planos é que a acurácia obtida aproxima-se da expectativa teórica (Toutin 1996, Raggam & Almer 1996). Em síntese, para qualquer tipo de relevo é sempre necessário um compromisso entre aspectos de disparidades geométricas e radiométricas na escolha do melhor estéreo-par na geração do DEM radargramétrico. Neste contexto, um conhecimento *a priori* de fundamentos do imageamento SAR e de sua estereoscopia são pré-requisitos para a geração bem sucedida do DEM.

Modelagem na Extração de Elevação com o RADARSAT-1 Em um DEM por estereoscopia SAR, a solução paramétrica que possibilita medidas de paralaxe pode ser obtida de: (1) equações Doppler e distâncias "slant range" (Sylvander *et al.* 1997, Twu & Dowman 1996), (2) equações de radargrametria (Leberl 1990) ou (3) equações de colinearidade (Toutin 1995). O modelo "RADARSAT-1 Specific", implementado no software OESE, foi concebido para aproveitar ao máximo as informações do posicionamento do satélite e do sensor na plataforma. O modelo tem como vantagem uma menor dependência de informações de campo (GCPs), tanto em termos de quantidade como em distribuição em área, ao mesmo tempo em que procura preservar a acurácia altimétrica e o detalhamento na extração do DEM. O modelo usa informações do RADARSAT-1 contidas na estrutura de dados do formato CEOS (Committee for Earth Observation Satellites) para o

cálculo da posição do sensor/plataforma e extrai distâncias em alcance (slant range) da antena/terreno. Na geração do DEM, a altimetria é estimada através de soluções que satisfaçam a geometria definida pelas duas posições em estéreo do sensor, através de planos de equifreqüência Doppler e distâncias slant range, permitindo o cálculo da interseção em 3-D das duas imagens e a determinação das posições planialtimétricas (x, y, z). A adição de informações de GCPs, embora não necessária, refina o modelo e melhora a acurácia altimétrica final. Se nenhuma informação de GCPs é utilizada, o modelo em estéreo será baseado nas informações de efemérides do SAR exclusivamente, e o DEM gerado será relativo, i. é., não permitirá estimativa válida de erro em elevação. No caso de uso de GCPs será obtido um DEM absoluto, com a estimativa real de acurácia em elevação.

A correlação de imagens é o processo central nesta modelagem radargramétrica. A correlação substitui a capacidade humana de identificar pontos homólogos no estéreo-par. Como resultado deste processo são obtidas as coordenadas de pixels de pontos correspondentes (homólogos) no estéreo-par. As diferenças de localização entre as imagens são conhecidas como paralaxes, expressas em linhas e colunas. O processo de correlação é conduzido em imagens pré-registradas (epipolares), de modo a reduzir o cálculo computacional. A informação de referência, i. é., uma matriz de pixels de uma imagem é movida sobre uma janela de pesquisa definida na outra imagem do par, e os parâmetros estatísticos de correlação são calculados (Raggam & Gutjahr 1998). Na modelagem é usada a correlação de área normalizada, num cálculo que maximiza o coeficiente de correlação cruzado normalizado (Simard *et al.* 1996). A partir desta etapa, a interseção em 3D é realizada, usando-se o modelo geométrico previamente computado para converter as coordenadas dos pixels das duas imagens, determinadas pela correlação do estéreo-par, para dados em três dimensões. As coordenadas cartográficas (x, y, z) na projeção definida pelo usuário, são determinadas para o ponto medido através de

um processo de interseção de mínimos quadráticos. O resultado é uma grade irregular no sistema de projeção de mapas, a qual é transformada em um DEM regular. Detalhes na extração de DEMS com o modelo "RADARSAT-1 Specific" podem ser vistos em PCI (2001).

Acurácia Planialtimétrica Internacionalmente, a comunidade cartográfica usa critérios de erro linear e erro circular com intervalos probabilísticos de confiança para estimativas de acurácias altimétrica e planimétrica (Toutin 1998). O uso de intervalo de confiança com 90 % de probabilidade assegura que é 90 % a probabilidade do intervalo conter o valor médio "verdadeiro" da altimetria ou da planimetria calculados. A designação LE90 é usada para quantificar o erro em elevação do DEM versus medidas reais em elevação (elevação verdadeira). Um valor de LE90 de 50 metros indicará que 90% dos pixels do DEM apresentam variação em elevação em relação à "elevação verdadeira" de 50 metros ou menos. A designação CE90 é uma medida dos erros combinados em latitude e longitude da planimetria do produto considerado, sem relação com a acurácia vertical. CE90 é um raio circular (metros), englobando 90% dos erros de planimetria no produto analisado em relação às posições reais no terreno.

No cálculo do LE90, as seguintes relações são usadas:

$$LE90 = 1,6449 \times RMS$$

onde:

$$RMS = \sqrt{\frac{(Z_F - Z_{DGPS})^2}{N - 1}}$$

Z_F = elevação dos ICPs na imagem; Z_{DGPS} = elevação dos ICPs correspondentes medidos em campo por DGPS;

N = número de ICPs considerados; Da mesma forma, no cálculo do CE90 as seguintes relações são usadas:

CE90 = 2,15 × RMS, onde:

$$RMS = \sqrt{\frac{(X_F - X_{DGPS})^2 + (Y_F - Y_{DGPS})^2}{N - 1}}$$

X_F e Y_F = coordenadas dos ICPs (pontos notáveis) identificados no produto integrado; X_{DGPS} e Y_{DGPS} = coordenadas dos ICPs correspondentes medidos em campo por DGPS; N = número de ICPs considerados. Os valores das constantes em LE90 e CE90 (1,6449 e 2,15) são valores tabulados para 90% de probabilidade de distribuição normal.

As cartas topográficas no Brasil devem obedecer quanto a acurácia planialtimétrica, ao padrão de exatidão cartográfica-PEC, que é um indicador estatístico de dispersão, relativo à 90% de probabilidade e que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90 % corresponde a 1,6449 vezes o erro padrão ou desvio padrão (PEC = 1,6449 × EP), conforme o decreto lei número 89817 de 20/06/1984, que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da Comissão de Cartografia do Brasil (COCAR). Neste decreto, as cartas topográficas são classificadas nas classes A, B e C, segundo os critérios de PEC planimétricos e altimétricos, sendo também consideradas equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio Quadrático (RMS). Assim, nos cálculos das acurácias de altimetria e planimetria da investigação foram usados os critérios do erro linear e erro circular com 90% de intervalo probabilísticos, que são utilizados internacionalmente. Para a classificação da classe da carta foram usados os requisitos de PEC altimétrico e planimétrico da COCAR. Detalhes

sobre estas relações estatísticas podem ser encontrados em http://ourworld.compuserve.com/homepages/loganscott/Circular_Error_Probable.htm e em <http://www.cocar.ibge.gov.br/CCA32.htm>.

ÁREA TESTE A Floresta Nacional de Tapajós está localizada à margem direita do baixo Tapajós, distando menos de 100 km ao sul de Santarém, estado do Pará (Fig. 2). A área de investigação corresponde a 1940 km², no município de Belterra, e abrange parte de quatro folhas topográficas 1:100.000, produzidas no período de 1973-1983 pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), do Ministério da Defesa: SA-21-Z-B-IV/MI 527 (Amorim), SA-21-Z-B-V/MI 528 (Mojú dos Campos), SA-21-Z-D-I/MI 588 (Boim) e SA-21-Z-D-II/MI 589 (São Jorge). Geologicamente, a área está inserida na Bacia Sedimentar do Amazonas, com sedimentação lacustre e fluvial da Formação Alter do Chão, parte do Grupo Javari, com idades do Terceário (Torres 1998). A região é caracterizada por um relevo aplainado, com interflúvios de colinas suaves e altitudes variando entre 30 a 170 metros. Do ponto de vista geomorfológico, pode ser dividida em dois grandes compartimentos: o Platô Xingu-Tapajós, nos seus setores central e oriental, com cotas mais elevadas, e que cobre a maior parte da área, e o Platô do Baixo Amazonas, em uma faixa estreita norte-sul ocidental, margeando o rio Tapajós. A cobertura vegetal é típica de Floresta Ombrófila Densa. O setor central, em relevo de platô elevado, é marcado pela presença de espécimes emergentes em um estrato uniforme denso, e no platô dissecado do Baixo Amazonas, pela presença de uma floresta mais aberta (Shimabukuru et al. 1998). A área é também sítio de dois grandes projetos científicos: o LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), da NASA e agências nacionais (INPE, IBAMA, USP, etc.), com campus avançado no km 84 da estrada Cuiabá-Santarém; e o ITTO PD 68/69 (Manejo da Floresta Nacional do Tapajós para a Produção Sustentada de Madeira Industrial), do IBAMA, no km 82. Além disso, no km 92 está localizado o 8º BEC (Batalhão de Engenharia de Construção), 1ª Companhia, do Exército brasileiro.

CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS Sob latitudes equatoriais, os azimutes de visada para órbitas descendentes e ascendentes do RADARSAT-1 são 282 e 78 graus, respectivamente. A seleção do melhor estereó-par é função de parâmetros do sensor (ângulo de interseção do par, área de superposição das imagens, resolução espacial) e do terreno (dimensão da área investigada, elevação e declividade do terreno, acurácia altimétrica esperada do DEM, orientação de feições topográficas em relação aos azimutes de visadas). De acordo com a trajetória das órbitas do RADARSAT-1 na área, apenas duas configurações em estereó eram possíveis com os cinco modos de elevada resolução (Fine): F1/F4 e F2/F5. Apesar de apresentarem os mesmos ângulos de interseção (6 graus) e critérios VPR muito próximos ($VPR_{F1/F4} = 0,239$ e $VPR_{F2/F5} = 0,221$), a porcentagem maior de área de superposição das imagens favoreceu a escolha do par F2/F5 (99%) em relação ao F1/F4 (90%).

A Tabela 1 mostra as principais características dos dados RADARSAT-1 da pesquisa. O estereó-par F2/F5, órbita descendente, foi adquirido pela DSG em setembro de 2000, com intervalo de uma semana entre as aquisições, minimizando variações nas respostas de retroespalhamento do terreno induzidas por precipitações. Informações do 8º BEC asseguraram a ausência de chuvas no período das aquisições. Estes cuidados são necessários para minimizar variações radiométricamente externas no processo de

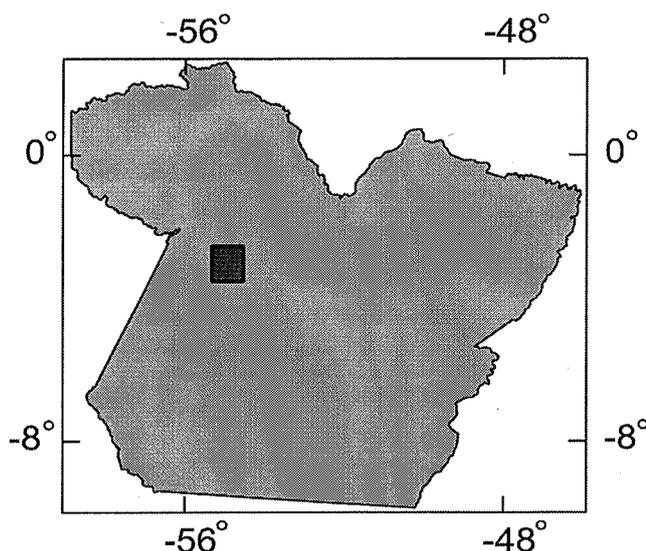


Figura 2 - Localização da área de pesquisa (Floresta Nacional de Tapajós).

modelagem com o OESE, que influenciam a correlação de respostas entre as cenas. Além do SAR, foi usada uma cena TM-Landsat 5 (seis bandas refletidas), de agosto de 1999, a mais recente passagem disponível no INPE sem problemas de nuvens. Os dados TM foram usados na geração dos produtos integrados SAR/Ópticos na elaboração da carta topográfica.

Tabela 1 - Características dos dados sensores utilizados.

Sensor	RADARSAT-1 Fine 2	RADARSAT-1 Fine 5	TM-Landsat 5* (1,2,3,4,5,7)
Órbita Data	Desc. 20/09/00	Desc. 27/09/00	227-062 02/08/1999
Incidência	39-42 graus	45-48 graus	Az. Sol: 56,41 Elev. Sol.: 50,87
Resolução	8,7 x 8,4 m	7,8 x 8,4 m	25 x 25 m
Área	43 x 43 Km	43 x 43 Km	198 x 171 km
Pixel	6,25 x 6,25 m	6,25 x 6,25 m	25 x 25 m
Pixels x linhas	6791 x 9159	6095 x 9144	7925 x 6874
Look (r x Az)	1 x 1	1 x 1	-----
Bits/pixel	16 bits	16 bits	8 bits * formato INPE

FASE DE CAMPO Medidas planialtimétricas de precisão de campo (DGPS) foram usadas como GCPs no processo de geração do DEMs absoluto, nas correções geométricas (RADARSAT-1, TM-Landsat 5), ou como ICPs, no cálculo das acurácias altimétrica dos DEMs absoluto e relativo e planimétrica da carta topográfica. Adicionalmente, foram coletadas informações de campo para a fase de reambulação da carta topográfica. Dois receptores geodésicos de frequência dual, modelo Legacy GGD da Javad, foram utilizados na campanha de medidas DGPS estáticas, realizada em setembro de 2001, com a participação de equipe do INPE, Geoambiente, DSG e empresa SurveyGPS. Além disso, foram tam-

bém levantados pela DSG perfis cinemáticos em trechos de estradas com uso de receptor Trimble Pathfinder Pro-XR-8. A sistemática de campo das medidas estáticas de DGPS constou da instalação de um receptor Javad no 8°BEC, servindo de base de referência no decorrer das determinações, e utilização do outro receptor Javad nas medições estáticas, incluindo uma Referência de Nível (RN 1328-M). Os dados de campo foram posteriormente processados no Depto. de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Unesp, Campus de Presidente Prudente (SP).

O processamento dos dados GPS na Unesp foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na determinação das coordenadas do ponto de referência (8°BEC) e a outra na determinação das coordenadas de 44 pontos e da RN 1328-M. Para determinar e ajustar as coordenadas do ponto base, utilizando os dados GPS coletados durante as seis sessões de rastreamento, foram usadas as estações de Manaus e Cuiabá da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) como referência. Os dados foram corrigidos para efeitos da troposfera e determinadas suas altitudes ortométricas utilizando nivelamento com GPS associado com modelo geoidal (MAPGEO). O erro máximo das medições planialtimétricas, calculado com critério probabilístico de 68,3 % (1σ), foi de 6,52 cm (latitude), 19,66 cm (longitude) e 17,74 cm (altitude), em coordenadas geográficas referenciadas ao datum SAD69 (Camargo 2003).

A escolha de pontos notáveis (pontos localizados nas imagens e no campo) não é tarefa fácil. Pontos bem localizados no terreno, nem sempre são claramente identificáveis nas imagens de radar, função da resolução espacial do sensor, das distorções geométricas da visada lateral do imageamento SAR e do retroespalhamento do sinal, controlado por características geométricas e elétricas. Assim, na escolha dos pontos notáveis, além de premissas básicas (número razoável, distribuição em área, localização fora das bordas das imagens evitando-se extrapolações em planimetria, abrangência de variação altimétrica, etc.), devem ainda ser considerados aspectos de variação temporal, com pontos mais estáveis sendo os preferenciais (interseções de estradas, obras de engenharia, limites bem definidos de propriedades, campos agrícolas, etc.). Para um ambiente de floresta tropical na Amazônia, isto nem sempre é viável. A rede viária na área é restrita, inexistem obras de engenharia, e em alguns setores da área apenas clareiras puderam ser utilizadas, normalmente de pequenas dimensões e de mais difícil detecção. Além disso, o setor oriental da região é marcado por atividades antrópicas (uso da terra), não favorecendo a uma estabilidade radiométrica entre as duas aquisições. Para facilitar a navegação e o acesso aos pontos selecionados em campo foram utilizadas composições coloridas de imagens realçadas (cópias em papel). Além disso, foram também usados recursos de visualizações de detalhe (zoom) das imagens em campo, com uso de um "notebook" e software de processamento digital de imagens Xpace (PCI 2001).

ABORDAGEM METODOLÓGICA Geração do DEM Relativo

A figura 3 mostra o fluxograma com as etapas na produção do DEM relativo. O processo de extração automática do DEM com o OESE permite ao usuário especificar valores mínimos e máximos de elevação para facilitar os cálculos de correlação e selecionar parâmetros que controlam a qualidade e a resolução final do DEM (espaçamento de pixel, nível de detalhe, tipo de filtragem de ruído speckle). Para pontos do DEM indicativos de ausência de valores de elevação ("holes, blunders"), um esquema de filtragem e interpolação, que leva em conta os valores digitais próximos, é

aplicado na fase de pós-processamento. Após a obtenção do DEM foi calculada a estimativa de acurácia altimétrica com uso de informações de campo (ICPs).

Geração do DEM Absoluto A figura 4 mostra o fluxograma das etapas na produção do DEM absoluto. A escolha e a plotagem cuidadosa dos GCPs são cruciais na geração de um DEM absoluto com o OESE. Devido a ausência de funções no OESE, que permitam a visualização em 3-D na plotagem dos GCPs (estéreo-GCPs), a plotagem foi monoscópica. Isto não representa a condição ótima que o ponto, medido no terreno, esteja posicionado verticalmente nas duas imagens. Como consequência, paralaxes artificiais, derivadas do posicionamento não tão preciso de coordenadas, podem ser introduzidas e se propagarão no processo de extração do DEM, contribuindo para uma diminuição da acurácia final do DEM. Resultados de literatura com imagens RADARSAT-1 Fine indicam que a acurácia em altimetria do DEM pode ser melhorada por um fator de 20 a 40% com o uso de estéreo-GCPs (Toutin 1998). A acurácia altimétrica final do DEM foi calculada com uso de informações de precisão de campo (ICPs).

Produção da Carta Topográfica As principais etapas na produção da carta topográfica são mostradas na Figura 5. A partir do DEM absoluto e com informações dos GCPs foi conduzida a ortoretificação das imagens Fine e TM-Landsat 5 através das funções de correções geométricas dos pacotes OESE e Xpace (PCI 2001). Vários trabalhos tem mostrado que produtos integrados SAR/Ópticos são fundamentais na extração de informações temáticas (geológicas, geomorfológicas, geobotânicas) no ambiente amazônico (Paradella et al. 1997, 1998, Souza Filho & Paradella 2002). Neste tipo de fusão digital, a informação de matiz é fornecida pelo TM-Landsat, função das respostas espectrais controladas pela composição físico-química dos alvos, enquanto o SAR contribui com informação morfológica do terreno (textura). A fusão SAR/Óptico envolve duas etapas. Primeiro, as imagens devem estar geometricamente registradas, assegurando medidas de atributos de mesma localização no terreno. Em segundo lugar, as informações espectrais e espaciais combinadas, geram um produto final, que contém o melhor dos dados originais. O desempenho em aplicações nas Geociências tem mostrado que a transformação RGB (Red-Blue-Green)/IHS (Intensity-Hue-Saturation) fornece resultados melhores nas fusões SAR/Ópticas (Harris et al. 1999).

As cores são descritas no modelo IHS em termos de intensidade, matiz e saturação. A transformação de um sistema RGB para um IHS segue modelos representados geometricamente por cones (ou hexacones) e cilindros. Como a percepção de cores cresce com a intensidade (a influência do matiz e da saturação são minimizadas sob valores baixos de intensidade), a transformação RGB/IHS baseada em modelos de cones, têm-se mostrado mais adequada e foi usada na pesquisa. Neste tipo de integração dois conjuntos de dados são combinados: acromáticos e cromáticos. O primeiro relaciona-se com a intensidade e sua manipulação visa melhorar a expressão da geometria do terreno pelo sombreado no produto final. Idealmente para se evitar distorções de matiz, a imagem usada para substituir a intensidade calculada deve ser correlacionada com a intensidade original, o que nem sempre ocorre. Imagens SAR tem sido consideradas ideais como "inputs" de intensidade na integração IHS, pois representam informação de elevada frequência espacial (morfologia do terreno). Em relação aos dados cromáticos, uma grande variação de cores é sempre desejada no produto final. Numa composição colorida com três

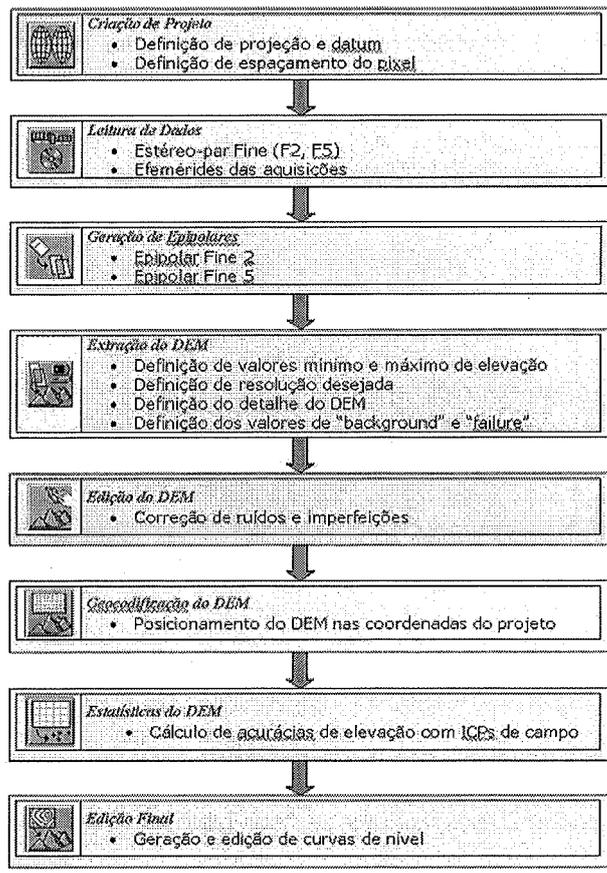


Figura 3 - Etapas na geração do DEM relativo

canais TM-Landsat, áreas de alta correlação espectral nas imagens serão representadas por variação de cinza, e projetadas no eixo de acromaticidade do cubo (RGB), e irão se alinhar no eixo de intensidade do cone (IHS). Se a imagem calculada de intensidade dos três canais ópticos é substituída por outra imagem (tipo SAR), as áreas de alta correlação na matiz não serão realçadas no produto integrado. Assim, o uso do realce por decorrelação nos canais originais, antes da transformação RGB/IHS, propiciará maior gradação de cores. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser vistos em Harris et al. (1994) e Harris et al. (1999)

O critério estatístico OIF (*Optimum Index Factor*) tem sido usado na seleção de canais TM-Landsat na integração com dados SAR (Paradella et al. 1998). Assim, os três melhores canais TM indicados por este critério foram usados na integração, com os canais sendo previamente realçados por ampliação linear de contraste e decorrelação. As composições coloridas obtidas serviram de entrada na transformação direta RGB/IHS. No domínio IHS, a imagem Fine 5 foi usada com intensidade, os canais de matiz e saturação foram mantidos constantes, e aplicada a transformação inversa (IHS/RGB). Finalmente foi também gerado um produto experimental SAR/DEM, obtido da transformação RGB/IHS usando-se a imagem Fine 5 como canal de intensidade e o DEM absoluto como canais de matiz (via pseudo-cor) e saturação. Este tipo de produto integrado é uma alternativa à extração de informações planimétricas em situações em que não há disponibilidade de dados ópticos para a fusão.

A análise estatística da acurácia planimétrica dos produtos inte-

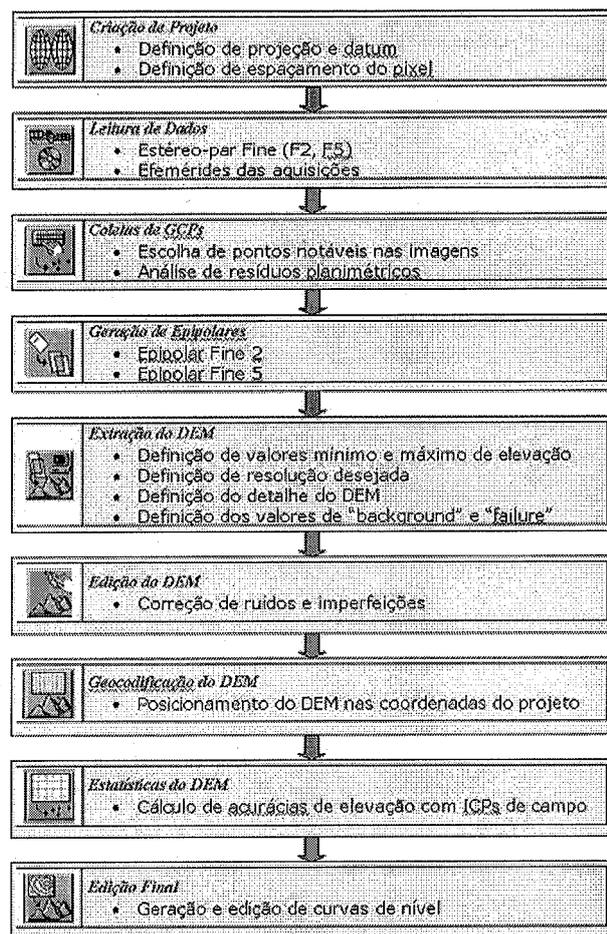


Figura 4 - Etapas na geração do DEM absoluto

grados foi conduzida a partir das informações dos ICPs. Para cálculo de RMS e CE90, 20 ICPs foram selecionados como pontos notáveis (cruzamentos de vias, pontes, bordas de polígonos de uso da terra, drenagens, etc.) e tiveram sua planimetria levantada em campo na campanha com DGPS. As várias imagens (Fine 5, composição colorida TM-Landsat (4R5G3B) e os produtos integrados) foram interpretadas visualmente. Na análise visual, os seguintes temas foram individualizados como diferentes vetores ("layers"): cursos d'água principais e secundários, corpos d'água naturais (lagos), rede viária (estradas de rodagem principal e secundárias), traçado de linhas de transmissão de eletricidade, povoados, vegetação natural e uso da terra. Sobre os mapas temáticos foram superpostas as linhas de contorno altimétrico, obtidas do DEM absoluto e também inseridos os pontos cotados de campo. Na etapa final foi conduzida a edição da carta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES DEMs Relativo e Absoluto

As imagens F2 e F5 são apresentadas na Figura 6 (a, b). A análise visual indica que a imagem Fine 2 propicia uma melhor percepção do relevo topográfico, com respostas controladas pelas variações de declividade, devido ao menor intervalo de incidência (39 a 42 graus). Por outro lado, feições indicativas de atividades antropogênicas (desflorestamento, uso da terra, clareiras, etc.) são melhor detectadas na imagem Fine 5, devido ao comportamento mais especular da radiação, controlado pelo maior intervalo de

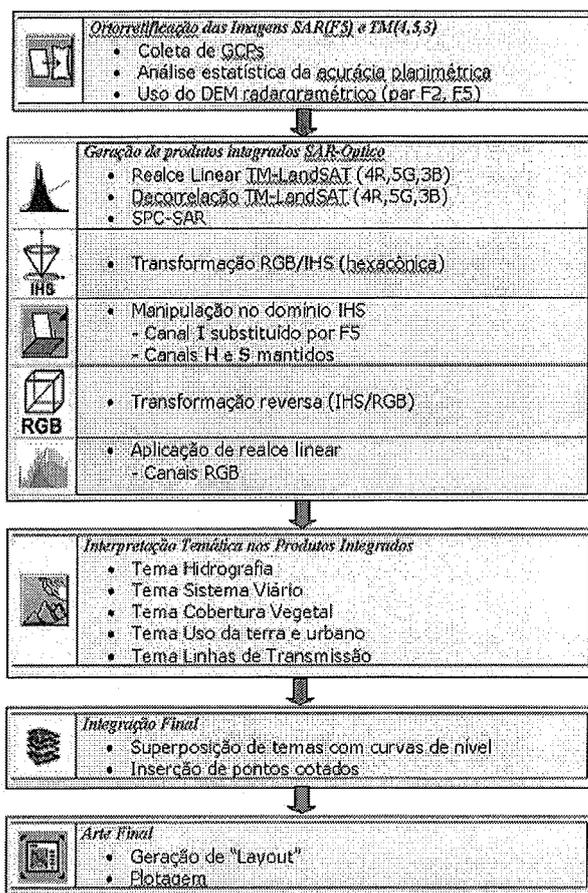


Figura 5 - Etapas na produção da Carta Topográfica

incidência (45 e 48 graus). Além disso, a detecção de estradas e linha de transmissão é melhor na Fine 5, com contraste de respostas exposto pelos sombreamentos na interface floresta/estrada.

Os DEMs relativo e absoluto, suas respectivas curvas de nível, e dois exemplos de produtos integrados, são mostrados na Figura 7 (a, b, c, d). Para o cálculo da acurácia altimétrica do DEM relativo, os valores digitais de elevação do DEM foram convertidos da superfície elipsoidal (produto original do DEM relativo) para a superfície geoidal, através da subtração de uma constante de valor correspondente a -3,68 metros, obtido da média dos valores de ondulação geoidal para os pontos medidos de DGPS. Na Tabela 2 são mostradas as estatísticas finais de erro em elevação para os DEMs absoluto e relativo.

Os resultados de acurácia altimétrica (RMS = 35,911 m) do DEM relativo estão próximos da classe A do PEC na escala de 1:250.000 (EP = 33,33 m). Estes resultados abrem perspectivas promissoras no uso da tecnologia espacial para mapeamento topográfico em escala regional na Amazônia, ou em situações onde não se disponha ou não seja possível a obtenção de informações de precisão (DGPS), como as aplicações de defesa (inteligência/segurança). Estas aplicações requerem DEMs de áreas em que o acesso nem sempre é possível. Além disso, este tipo de produto é valioso em operações de ortorretificações (correções geométricas de imagens de sensores remotos ópticos e SAR com uso de DEM). Outro aspecto vantajoso deste produto é o custo baixo da obtenção do DEM, pela não necessidade de GCPs e rapidez de

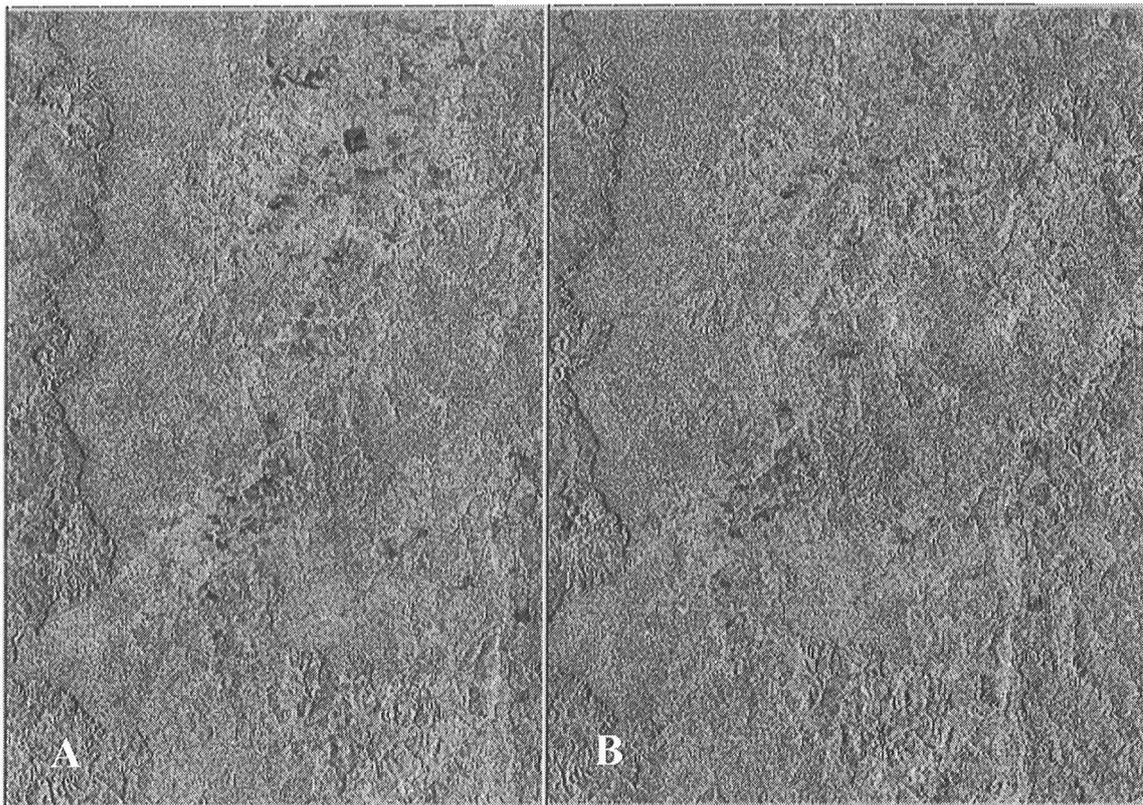


Figura 6 - Estéreo-par Descendente Fine 2 (A) e Fine 5 (B) utilizado na extração dos DEMs.

Tabela 2 - Estimativa de erros para os DEMs relativo e absoluto

DEM	RMS	LE90	Erro Sistemático	Valor Mínimo	Valor Máximo
relativo	35,911 m	59,069 m	- 31,283	-64,460	-0,429
absoluto	14,628 m	24,123 m	-4,423	-32,245	23,193

processamento. O erro sistemático medido pelos ICPs e que indica o deslocamento entre o DEM e a topografia real (quando negativo indica um deslocamento do DEM para cima em relação a superfície), é próximo de 31 metros. Este valor é explicado por ser o modelamento do SAR uma aproximação topográfica a partir da interação do sinal das microondas com espalhadores centimétricos do topo e interior do dossel dos espécimes da floresta equatorial ombrófila (folhas, ramos, caules), que cobre a maior parte da superfície da área. Este valor próximo a 31 metros indicaria a altura média de influência do estrato vegetal.

Os resultados de acurácia altimétrica do DEM absoluto (RMS = 14,628 m) obtidos são condizentes com a classe A do PEC para a escala de 1:100.000 (EP= 16,66m). A análise dos resultados da Tabela 2 também indica uma melhoria considerável no processo de geração do DEM radargramétrico com o uso dos GCPs, com grande decréscimo de erro sistemático (fator de 7 vezes). O refinamento do modelo "RADARSAT-1 Specific" com as informações de precisão do terreno contribuiu pelo decréscimo de erro altimétrico de 59% do DEM relativo para o absoluto. Finalmente foi conduzida uma análise comparativa de perfis topográficos dos

DEMs radargramétricos gerados na pesquisa, com as medidas de precisão cinemática (DGPS) realizadas pela DSG. A comparação foi realizada para um trecho pavimentado de 18 km da estrada Cuiabá-Santarém. O exame da Figura 8 confirma que o DEM radargramétrico absoluto (perfil contínuo suave) é o que apresenta a maior aderência com traçado ortométrico de referência (perfil contínuo forte), acompanhando as variações da topografia assumida como verdadeira. Além disso, é observada uma tendência geral de pequeno deslocamento deste modelado radargramétrico para cima em relação ao levantamento ortométrico. No caso do DEM relativo (perfil pontilhado), seu traçado acompanha razoavelmente bem o de referência (ortométrico), porém com um maior deslocamento vertical superior. Esta tendência também responde por sua maior magnitude de erro sistemático negativo e seria causada pela maior influência dos efeitos da cobertura vegetal no resultado topográfico do DEM relativo, que não é calibrado pelos GCPs.

Carta Topográfica A partir das informações planialtimétrica de 18 GCPs e do DEM absoluto foi conduzida a ortorretificação das imagens RADARSAT-1 Fine 5 e TM-Landsat 5. A imagem Fine 5 foi escolhida na integração SAR/Óptico pelo melhor contraste de feições indicativas de processos antropogênicos. É importante mencionar que a acurácia em erro das ortorretificações, expressa por valores de RMS (X, Y), depende da precisão da plotagem do GCPs e da contribuição do DEM no processo de correção geométrica. Plotando-se monoscopicamente os GCPs nas imagens SAR, são introduzidos erros de paralaxe artificial, que se propagam na geração do DEM absoluto, e que são adicionados aos erros das

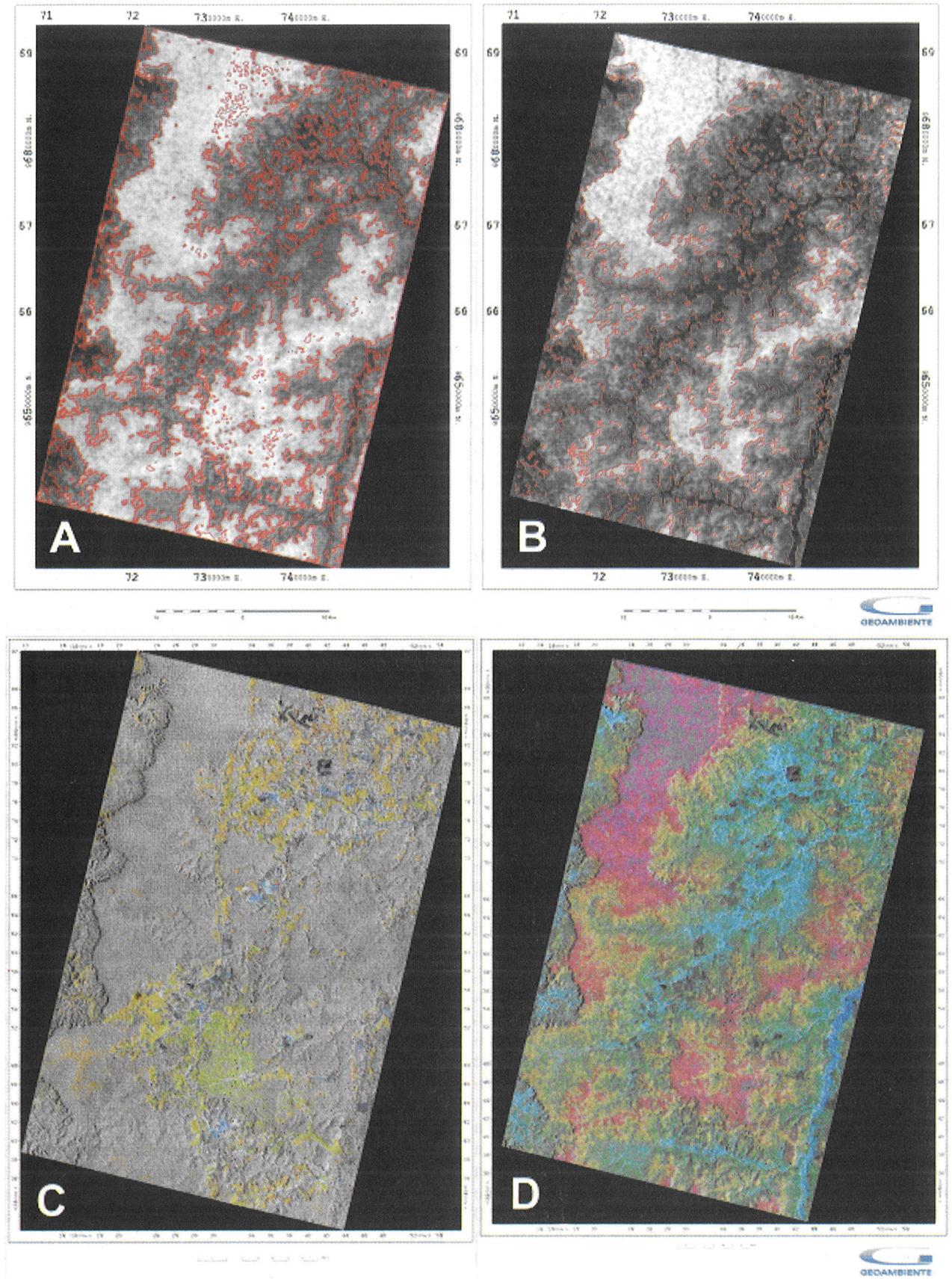


Figura 7 - Legenda: DEMs relativo e absoluto (curvas de nível com equidistâncias de 50 metros) = a ,b; Fusão IHS Fine 5/TM 4R5G3B (Decorrelacionado) = c;Fusão IHS Fine 5/DEM absoluto = d.

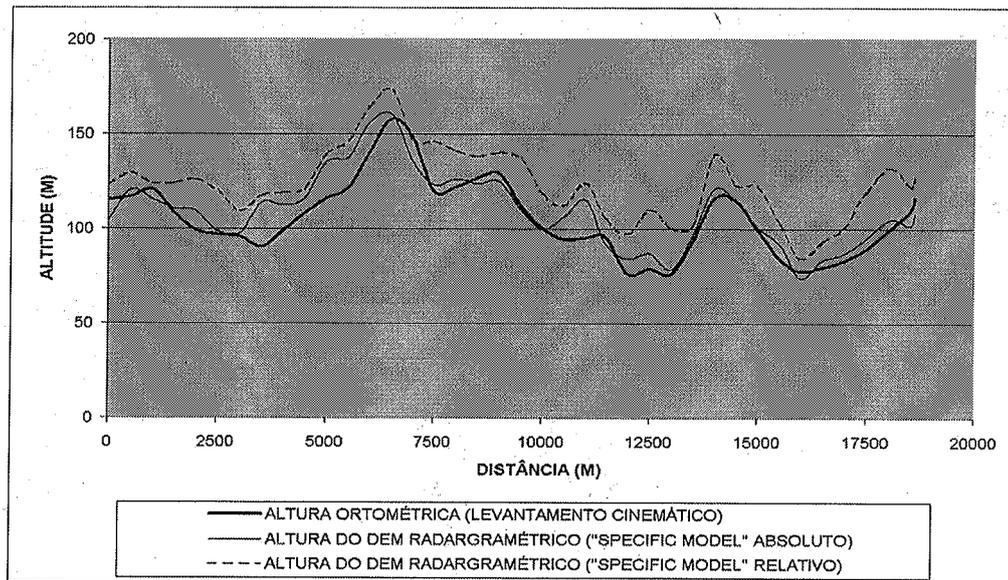


Figura 8 - Perfis topográficos para um trecho da estrada Cuiabá-Santarem

plotagens independentes dos GCPs durante o processo de ortorretificação. Estas combinações de imprecisões tem reflexos diretos na acurácia planimétrica final, estimada pelos erros circulares com intervalos de confiança (CE90) ou no cálculo do PEC-Planimétrico na classificação da classe da carta topográfica. Os erros médio quadráticos para as ortorretificações das imagens Fine 5 (X=24,4 m; Y=12,30m) e TM-Landsat (X=8,04 m; Y=10,48 m) confirmam que os dados SAR são muito mais susceptíveis às distorções geométricas devido ao imageamento lateral, e que são minimizadas, no caso do TM-Landsat 5, pelo imageamento no nadir.

A partir das imagens SAR e TM-Landsat ortorretificadas foram gerados os vários produtos integrados, que serviram para a interpretação visual na produção da carta topográfica. A integração de informações planimétricas e temáticas extraídas dos produtos integrados SAR/Óptico é o ideal para aplicações cartográficas na Amazônia, quer na geração de novos mapas ou nas atualizações da cartografia existente. A maior contribuição do TM-Landsat foi na caracterização da cobertura vegetal (Florestas Ombrófila Densa Submontana e de Terras Baixas e vegetação secundária), atividades antrópicas (detecção de estradas, áreas de pastagem, culturas, solo exposto, etc.), hidrografia (rios, lagoas), mata ciliar, etc. Por outro lado, por ser um dado com melhor resolução espacial, a imagem Fine 5 contribuiu na detecção de traçados menores de drenagens e de feições antropogênicas (estradas, linha de transmissão e áreas de cultivo, particularmente solos expostos). Em situações em que a orientação das feições superficiais se paraleliza com o azimute de iluminação do SAR canadense (282 graus), a detecção das feições planimétricas é prejudicada. A acurácia planimétrica da carta topográfica, calculada a partir de medidas de ICPs de alvos notáveis na imagem Fine 5 (RMS = 17,014 m; CE90 = 36,581 m), indica que a planimetria atende aos requisitos de exatidão da Classe A do PEC-planimétrico na escala de 1:100.000 (EP = 30 m). A carta topográfica radarométrica final, e seu detalhe, são mostrados na Figura 8.

CONCLUSÕES A investigação possibilitou as seguintes con-

clusões:

(a) a análise bibliográfica indicou que até a produção deste artigo, inexistiam resultados publicados na literatura do desempenho altimétrico do RADARSAT-1 na produção DEMs para cartas topográficas na Amazônia brasileira. Desta forma, os resultados da investigação em Tapajós devem ser considerados como balizadores reais do potencial da tecnologia, neste tipo de ambiente do país;

(b) os resultados de acurácia altimétrica (RMS = 35,911 m) do DEM radarométrico relativo estão próximos da classe A de Padrão de Exatidão Cartográfica na escala de 1:250.000 (EP = 33,33 m);

(c) Os resultados de acurácia altimétrica (RMS = 14,628 m) do DEM radarométrico absoluto atendem aos requisitos da classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica na escala de 1:100.000 (EP = 16,66 m);

(d) O exame das tendências dos perfis topográficos radarométricos, quando comparados com o perfil ortométrico de referência (DGPS cinemático), confirma que o DEM absoluto teve um desempenho superior no modelamento da variação topográfica na área-teste. Além disso, a tendência dos deslocamentos dos perfis absoluto e relativos, em relação ao de referência, está de acordo com os resultados de erros sistemáticos medidos independentemente (DGPS estáticos);

(e) Os resultados de estimativa de acurácia planimétrica (RMS = 17,014 m) da carta topográfica radarométrica orbital atendem aos requisitos de exatidão da Classe A do PEC-altimétrico na escala de 1:100.000 (EP = 30 m).

Cabe por último salientar que, com o advento do RADARSAT-2 em 2005, provendo imagens no modo ultra-fine (resolução espacial de 3 x 3m), será possível a geração de DEMs absolutos com acurácia em elevação entre 5 a 10 m (Van der Sanden & Ross 2001). Isto ampliará ainda mais o potencial da tecnologia para mapeamento topográfico de maior detalhe, de áreas desprovidas de informação, como a Amazônia brasileira.

Agradecimentos Ao Dr. Carlos Nobre (CPTEC/INPE) pela viabilização da infra-estrutura da LBA em Tapajós; ao Gal. Armando

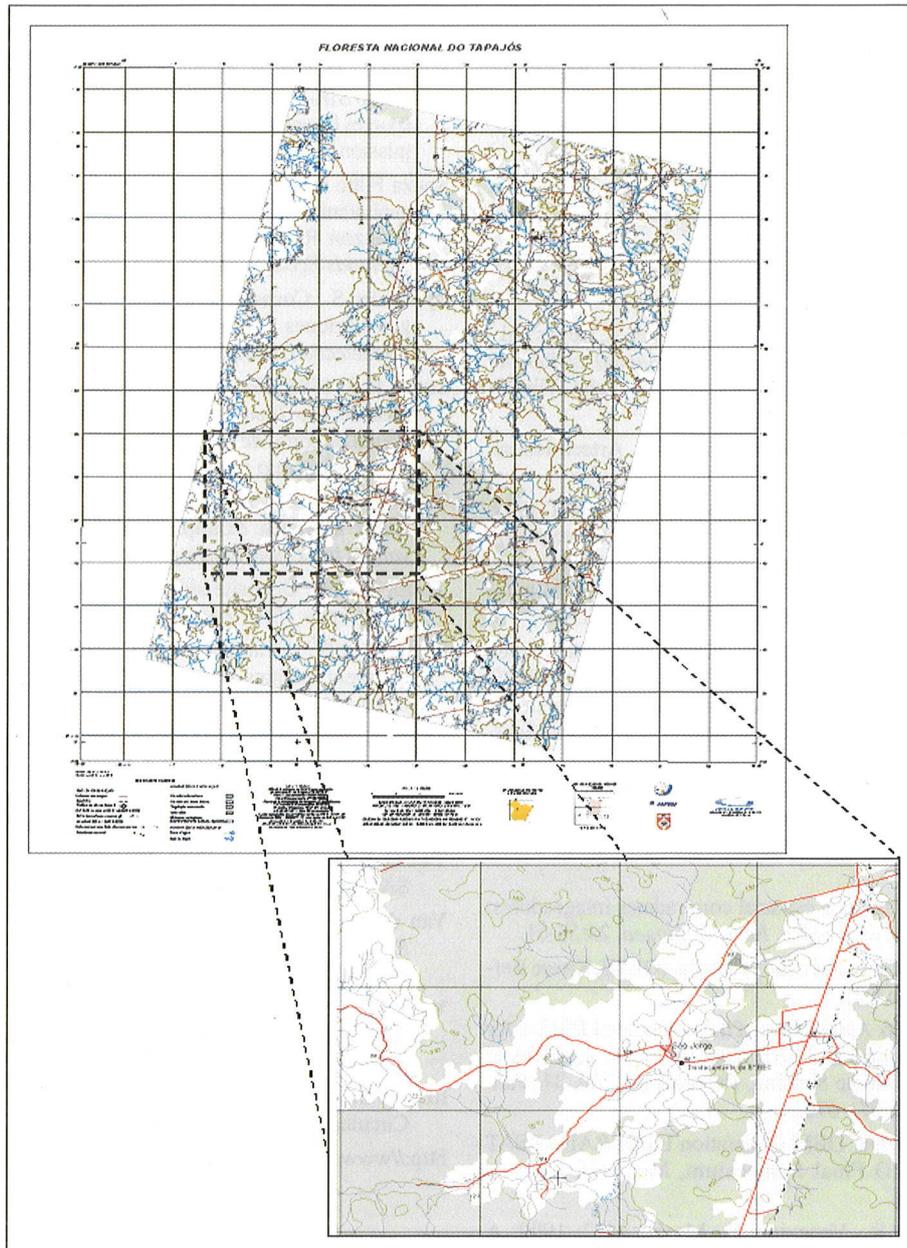


Figura 9 - Carta topográfica radargramétrica (e detalhe) de Tapajós.

Carvalho Fernandes (DSG) pelas imagens Fine e dados cinemáticos (DGPS); aos Drs. Thierry Toutin (CCRS) e Philip Cheng (PCI Geomatics) pelas discussões no uso do OESE. Ao técnico Paulo Hahn Junior (Survey GPS), responsável pela operação dos receptores geodésicos Javad em campo, ao Dr. Paulo de Oliveira Camargo

(FCT/Uesp) pelo processamento dos dados DGPS, e aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito. À FAPESP pelos recursos financeiros da investigação (Processo PIPE 1999/06271-7), e ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa do primeiro autor (Processo 300985/90-8).

Referências

ADIMB. 2000. *Desenvolvimento Metodológico para Exploração Mineral na Amazônia*, Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, Proposta Síntese, Brasília, Brasil, 39 p.

Camargo P.O. 2003. Relatório do Processamento dos Dados GPS do Flona Tapajós (Projeto 99/06271-7, PIPE-FAPESP). Geoambiente SR S/C Ltda, São José dos Campos, 56 p.

Fullerton J., Leberl F., Marque R. 1986. Opposite-side SAR image

- processing for stereo viewing. *Photogram. Engineer. Rem. Sensing*, **52**:1487-1498.
- IBGE. 2001. "Mapa Índice Digital-Mapeamento Geral do Brasil", 1ª Edição, CD-ROM.
- Harris J.R., Bowie C., Rencz A., Graham D. 1994. Computer-enhancement technique for the integration of remotely sensed, geophysical and thematic data for Geosciences. *Can. J. Rem. Sens.*, **20**:210-221.
- Harris J.R., Viljoen D.W., Rencz A.N. 1999. Integration and visualization of geoscience data. In: A.N Rencz (Ed) *Remote Sensing for the Earth Sciences*. J. Wiley & Sons, Am. Soc. Photog. & R.S., **3**:307-354.
- Leberl F.W. 1998. Radargrammetry. In: F. Henderson & A. Lewis (ed.) *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*, 3ª Ed., Cap. 4., Amer. Soc. Phot. and R.S., John Wiley & Sons Inc. N. Y., pp: 184-269.
- Leberl F.W. 1990. *Radargrammetric image processing*. Artech House, USA, pp: 700.
- Paradella W.R., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne synthetic aperture radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *Intern. J. Remote Sensing*, **18**:1483-1501.
- Paradella W.R., Santos A.R., Dall' Agnol R., Pietsch R.W., Sant' Anna M.V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated product in the Central Serra dos Carajás Granite area, Brazil. *Can. J. Remote Sensing*, **24**:376-392.
- Paradella W.R., Santos A.R., Veneziani P., Morais M.C. 2000. Synthetic Aperture Radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the Brazilian Amazon Region. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:538-542.
- Paradella W. R. 2001. A tecnologia espacial com radares imageadores: status e perspectivas nas aplicações. *Revista Infogeo*, **23**:58-61.
- PCI 2001. *Geomatica*. PCI Geomatics Inc., Canada. (OESE, Xpace Reference Manuals: version 8.2).
- Raggam H. & Almer A. 1996. Assessment of the potential of JERS-1 for relief mapping using optical and SAR data. In: Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, *Proceedings*, Vol. 31, Part. B4, Commission IV, pp: 671-676.
- Raggam H. & Gutjahr K. 1998. DEM Generation Using RADARSAT Stereo Data. In: ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, *Proceedings* CD-ROM.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Morais M.C. 1999. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, **29**:627-632.
- Shimabukuru Y.E., Amaral S., Ahern F.J., Pietsch R.W. 1998. Land Cover Classification from RADARSAT data of the Tapajós National Forest, Brazil. *Can. J. Remote Sensing*, **24**:393-401.
- Simard R., Plourde F., Toutin T. 1996. Digital elevation modelling with stereo SIR-B image data. In: Intern. Symp. Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, ISPRS, Commission VII, Enschede, The Netherlands, *Proceedings*, pp: 161-166.
- Souza Filho P.W.M. & Paradella W.R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança Mangrove Coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 Data. *Wetlands Ecology and Management*, **10**:123-132.
- Sylvander S., Cousson D., Gigord P. 1997. Etude des performances géométriques des images RADARSAT. *Bull. Soc. Fr. Photogram. Teledetection*, **148**:57-65.
- Torres R.B. 1998. *Contribuição ao estudo do arcaço estrutural da área do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas, através da integração digital de dados de topografia, geologia, magnetometria, gravimetria e sensoriamento remoto*. Dissertação de Mestrado, INPE, 152 p.
- Toutin T. 1995. Generating DEM from stereo images with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data. *EARSeL J. Advances in Remote Sensing*, **4**:110-117.
- Toutin T. 1996. Opposite-side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography. *IEEE Transac. Geosc. Remote Sensing*, **34**:543-549.
- Toutin T. 1997. Évaluation de la géométrie des images RADARSAT: premiers résultats. In: GER'97, Intern. Symp. Geomatics in the era of RADARSAT, Ottawa, Canadá, *Proceedings*, CD-ROM.
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, *Proceedings*, CD-ROM.
- Toutin T. & Gray L. 2000. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPR J. Photogram. Remote Sensing*, **55**:13-33.
- Twu G. Z. & Dowman I. 1996. Automatic height extraction from ERS-1 SAR imagery. *Int. Arch. Photogram. Remote Sensing*, **31**:380-383.
- Van der Sanden J.J. & Ross S.G. 2001. *Applications Potential of RADARSAT-2: A Preview*. Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) Internal Rept., Ottawa, Canada, 88 p.
- Vester C. & Toutin T. 1997. A training package on how to use RADARSAT data in stereo. In: ADRO, Intern. Symp. Geomatics in the era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *Proceedings*, CD-ROM.
- http://ourworld.compuserve.com/homepages/loganscott/Circular_Error_Probable.htm (1999)
- <http://www.cocar.ibge.gov.br/CCA32.htm> (1984)

Manuscrito SR-13

Recebido em 17 de novembro de 2002

Revisão dos autores em 28 de fevereiro de 2003

Revisão aceita em 01 de abril de 2003