GERAÇÃO DE CARTA TOPOGRÁFICA COM ESTÉREO-PARES FINE DO RADARSAT-1 E DADOS ETM+ LANDSAT 7 EM AMBIENTE DE RELEVO MONTANHOSO NA REGIÃO AMAZÔNICA (SERRA DOS CARAJÁS, PARÁ)

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

Abstract The feasibility to generate topographic maps based on orbital remote sensing data was investigated for mountainous terrain of the Carajás Mineral Province (Pará State), Brazilian Amazon. Radargrammetric digital elevation models (relative and absolute DEMs) were obtained from Fine-Mode RADARSAT-1 stereo-pairs (F2, F5) and evaluated with regard to their altimetric information. The DEM extractions were based on a geometric modeling (RADARSAT-1 Specific) available at the OESE software (PCI Geomatics). The planimetric features were extracted from digital integrated Fine/ETM+ Landsat 7 products. Precise planialtimetric information from DGPS (differential global positioning system) field campaign was used as GCPs (ground control points), for the modeling of the absolute DEM and the orthorectification of the radar and optical data, or as ICP (independent check points), for the calculation of planialtimetric accuracy of the topographic map. The planialtimetric accuracy of the topographic map has met the requirements for 1:100,000-map (semi-detailed scale), class B, as requested by the Brazilian Standard for Cartographic Accuracy (PEC). The investigation was carried out as an INPE-Geoambiente's project with funds from FAPESP and supported by CVRD.

Keywords: topographic map, DEM, RADARSAT-1 stereoscopy, ETM+ Landsat 7, Carajás Province, Amazon Region.

Resumo A viabilidade de geração de carta topográfica por sensores remotos orbitais foi investigada para ambiente montanhoso da Província Mineral de Carajás (Pará). Modelos digitais de elevação ou DEMs (digital elevation models) radargramétricos (relativo e absoluto) foram obtidos de estéreo-pares Fine Mode do RADARSAT-1 (F2, F5) e avaliados em termos de informação altimétrica. A extração dos DEMs foi baseada no modelo geométrico "RADARSAT-1 Specific", disponível no software OESE (OrthoEngine Satellite Edition, PCI Geomatics). A informação planimétrica foi extraída de produtos digitais integrados Fine/ETM+ Landsat 7. Informações planialtimétricas de precisão foram obtidas de campanha de campo com DGPS (differential global positioning system) e usadas ou como GCPs (ground control points), para o modelamento do DEM absoluto e na ortorretificação dos dados de radar e ópticos, ou como ICPs (independent check points), para a estimativa de acurácia planialtimétrica da carta topográfica. A pesquisa mostrou que a acurácia planialtimétrica da carta topográfica atendeu aos requisitos de mapeamento na escala de semi-detalle (1:100.000), classe B, do PEC (padrão de exatidão cartográfica) nacional. A investigação foi conduzida através de um projeto de pesquisa entre o INPE e a empresa Geoambiente, com recursos da FAPESP e apoio da CVRD.

Palavras-chave: carta topográfica, DEM, estereoscopia Fine RADARSAT-1, ETM+ Landsat 7, Serra dos Carajás.

INTRODUÇÃO Um modelo digital de elevação ou DEM, como uma representação tridimensional (3D) do relevo, é uma das mais importantes fontes de dados para análise geoespacial e modelagem nas Geociências. Várias aplicações em Cartografia, Geologia, Geomorfologia, Hidrologia, etc., utilizam informações de DEMs na caracterização de atributos morfométricos do terreno. Um DEM é também fonte de informação básica para a produção de cartas topográficas. Estimativas recentes do IBGE indicam que aproximadamente 15% do território nacional estão cartografados na escala de 1:50.000, 80% estão mapeados na escala de 1:100.000 e em torno de 75% dispõem de cartografia na escala de 1:250.000 (IBGE 2001). Grande parte deste acervo está desatualizada e a disponibilidade de recursos para atualização e novos levantamentos é limitada, particularmente na Amazônia.

Com a possibilidade de imageamentos com radares de abertura sintética ou SARs (Synthetic Aperture Radars), dois métodos

têm sido usados para derivar informações de altimetria: a estereoscopia (ou radargrametria) e a interferometria. A diferença entre as abordagens está no uso de atributos distintos que caracterizam a onda eletromagnética. Os principais atributos do sinal nas microondas são: o comprimento de onda (ou frequência), a amplitude, a fase e a polarização (fig. 1). O comprimento de onda (λ) refere-se à distância que a onda trafega no tempo requerido para gerar um ciclo. As bandas mais utilizadas em radares imageadores são: X (λ entre 2,40 a 3,75 cm), C (3,75 a 7,5 cm), L (15 a 30 cm) e P (77 a 136 cm). A frequência indica o número de recorrências da onda por tempo. A amplitude refere-se ao desvio máximo da curva senoidal. A fase descreve a posição de um ponto de vibração no senoide e a direção de movimento com relação a um datum ou posição de referência, variando entre 0 a 2π . Deve ser mencionado que o sinal em microondas tem um componente polarizado definido pelo plano de vibração do vetor campo elétri-

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

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

co (E), dado pelo vetor soma de um componente polarizado horizontalmente e um componente polarizado verticalmente. A polarização depende da diferença de fase entre estes dois componentes, podendo ser linear, i. e., horizontal (H) ou vertical (V). Outros possíveis estados incluem as polarizações circulares e elípticas, que descrevem todas orientações angulares de E e sua variação no tempo. Imageamentos com radares polarizados linearmente são os mais comuns (ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1, ERS-2), operando com microondas polarizadas horizontalmente (H) ou verticalmente (V) e registrando somente a amplitude do sinal retroespalhado (componentes V ou H).

Na estereoscopia de radar orbital, a elevação é obtida de medidas no deslocamento na posição de um ponto do terreno, em um par estereoscópico de imagens de amplitude, tomadas sob geometrias de visadas distintas (órbitas diferentes). Na interferometria, a elevação é obtida de medidas de diferenças da fase do sinal retroespalhado em duas tomadas, ou sob geometrias distintas através de aquisições simultâneas com duas antenas (single-pass), ou com uma antena, em passagens defasadas de poucos dias, aproveitando o deslocamento de traçado para a repetição da mesma órbita (*repeat-pass*). Assim, a distância linear entre os dois pontos de observação (linha base) varia de centenas de quilômetros na estereoscopia, para poucos metros (*single-pass*) a poucas centenas de metros (*repeat-pass*) na interferometria. Também, a diferença entre os ângulos de incidência das observações (ângulo de interseção) é muito maior na estereoscopia que na interferometria (Toutin & Gray 2000). Como consequência, a escala de sensibilidade das duas abordagens é distinta, ligada aos modos diferentes de como um SAR mede a distância sensor/alvo. A interferometria é mais precisa, pois utiliza medidas de fase (frações do comprimento de onda), enquanto que a estereoscopia

utiliza medidas na escala de células de resolução espacial (metros). Apesar da maior sensibilidade, a interferometria apresenta limitações sob condições de topografia acidentada ou quando ocorre variação temporal (baixa coerência) entre as duas aquisições (Kervyn 2001). Exemplos de DEMs interferométricos (single-pass) foram os da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), de fevereiro de 2000 com o ônibus espacial Endeavour (NASA), gerando dados topográficos de elevada resolução (bandas C e X) de grande parte do planeta.

Pela versatilidade do imageamento do satélite RADARSAT-1, com variações em azimute de visada, incidência, área imageada e resolução espacial, a estereoscopia reveste-se também de grande potencial para o mapeamento topográfico. Na estereoscopia RADARSAT-1, duas imagens da mesma área são adquiridas sob diferentes geometrias através de variações em azimutes de visadas e/ou incidências, possibilitando a percepção em 3D. Através da correlação entre as cenas, são obtidas paralaxes que permitem extrair a altimetria. Em estudos anteriores, os autores avaliaram o desempenho de um estéreo-par Fine (F2/F5) do RADARSAT-1, integrado com dados TM-Landsat 5, na produção de uma carta topográfica inédita para condições de relevo plano da Floresta Nacional de Tapajós (Paradella *et al.* 2003, Paradella *et al.* 2004a). A investigação em Carajás, conduzida agora sob condições de relevo acidentado, complementa a pesquisa anterior. Os resultados destas investigações permitem estabelecer o potencial e os limites da radargrametria orbital em aplicação cartográfica na Amazônia, região de importância em recursos naturais e carente de mapeamento topográfico.

FUNDAMENTAÇÃO Radargrametria A estereoscopia de radar orbital é função 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. Como os detalhes sobre este assunto já foram apresentados nas publicações anteriores, não serão abordados novamente. Toutin (1997) propõe o critério da Razão de Paralaxe Vertical (VPR-*vertical parallax ratio*), como um estimador robusto da melhor configuração em estéreo-par SAR, sendo definido 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 das imagens no par (direita/esquerda), respectivamente. Desconsiderando a curvatura da Terra, o ângulo de visada é igual ao de incidência. Assim, quanto maior o VPR, melhor a percepção em profundidade e maior o potencial em estimar a altimetria. Este critério foi utilizado na escolha da melhor configuração do estéreo-par Fine RADARSAT-1.

Cabe salientar que sob latitudes equatoriais, o azimute de visada do RADARSAT-1 é relativamente constante a 78 graus para órbitas ascendentes (imageamentos noturnos) e 282 graus para tomadas em órbitas descendentes (imageamentos diurnos). Na escolha da direção de visada do par deve ser considerada a orientação dominante da morfologia do terreno: feições topográficas alinhadas paralelamente ao azimute de visada do imageamento são atenuadas e as dispostas ortogonalmente são realçadas. Outro aspecto a ser considerado é que a utilização de imagens em tomadas descendentes evita dificuldades de percepção visual ligadas à inversão de relevo. Em síntese, estéreo-pares de imagens do mesmo lado (ascendente/ascendente ou descendente/descen-

Figura 1 - Representação lateral e frontal dos atributos do campo elétrico da onda eletromagnética: comprimento de onda (λ), amplitude (A), fase (ϕ), campo elétrico vertical (E_v) e campo elétrico horizontal (E_h). (fonte: Sanden 1997)

dente) são geralmente recomendados para todos os tipos de terrenos. Estéreo-pares de imagens opostas (ascendentes/descendentes) fornecem um exagero vertical maior, mas são somente recomendados para áreas planas, onde as variações tonais são mais similares em ambas visadas. Detalhes sobre este assunto podem ser vistos em Santos *et al.* (1999).

Imagens de radar são extremamente sensíveis às variações da macro e da microtopografia do terreno (Lewis & Henderson 1998). Assim, na extração de um DEM radargramétrico, o tipo de relevo passa a ser o fator mais crítico na acurácia de erros altimétricos. Toutin (1999) investigou a relação de dois descritores de relevo derivados da elevação (declividade e aspecto) com a acurácia altimétrica para DEMs estereoscópicos do RADARSAT-1. Os resultados mostraram que a acurácia teve grande correlação com a declividade, mas não tanto com o aspecto, e que esta correlação depende muito da geometria em estéreo utilizada. De modo geral, constatou-se uma menor acurácia em elevação para DEMs de terrenos montanhosos, quando comparados com terrenos planos. Os resultados obtidos na Floresta Nacional de Tapajós, com acurácia altimétrica absoluta (RMSE = 14,628 m), atendendo aos requisitos cartográficos na escala de semi-detalle (classe A), foram promissores e estimularam a avaliação complementar para condições de relevo montanhoso em Carajás.

Modelagem na Extração de Elevação O modelo "RADARSAT-1 Specific" do software OESE (PCI Geomatics), foi desenvolvido para aproveitar ao máximo as informações do posicionamento do satélite e do sensor na plataforma RADARSAT-1. O modelo usa informações contidas na estrutura de dados do formato CEOS (Committee for Earth Observation Satellites) para o cálculo das posições da plataforma e do SAR, e extrai distâncias em alcance (slant range) da antena ao terreno. A altimetria é estimada através de soluções que satisfaçam a geometria definida pelas duas posições em estéreo do sensor, através de planos de equifrequência Doppler e distâncias slant range, permitindo o cálculo da interseção em 3D nas imagens do estéreo-par e a determinação das posições planialtimétricas (E, N, H). A adição de informações de GCPs, embora não necessária, 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., sem estimativa válida de erro em elevação. No caso do uso de GCPs, o DEM extraído será absoluto, com a estimativa real da acurácia altimétrica.

A correlação de imagens é o processo central nesta modelagem radargramétrica e substitui a capacidade humana de identificar pontos correspondentes no estéreo-par. Como resultado do processo são obtidas as coordenadas de pixels de pontos homólogos, sendo as diferenças de localização entre as imagens ou as paralaxes, expressas em linhas e colunas. A informação de referência, representada por uma matriz de pixels de uma imagem é movida sobre uma janela definida na outra imagem, 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 geodésicas (ϕ , λ , H), na projeção definida pelo usuário, são determinadas para o ponto medido através de um processo de interseção de mínimos quadrados. O resul-

tado é uma grade irregular no sistema de projeção de mapas, a qual é transformada em um DEM regular. Detalhes sobre este assunto podem ser vistos em (PCI 2001).

Acurácia Planialtimétrica Os critérios de erro linear e erro circular com intervalos probabilísticos de confiança foram utilizados na pesquisa para estimativas de acurácias altimétrica e planimétrica. O uso do 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 internacionalmente para quantificar o erro em elevação do DEM versus medidas reais em elevação (elevação verdadeira). Um valor de LE90 de 20 metros indicará que 90% dos pixels do DEM apresentam variação em elevação em relação à "elevação verdadeira" de 20 metros ou menos. A designação CE90 é uma medida dos erros combinados em latitude e longitude da planimetria do produto, 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, a seguintes relações foram usadas:

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

onde:

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

onde 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 foram utilizadas:

$$CE90 = 2,15 \times RMSE$$

onde:

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

sendo 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 da distribuição normal.

As cartas topográficas no Brasil devem obedecer quanto à acurácia planialtimétrica, ao padrão de exatidão cartográfica – PEC, que é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 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 x 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 (RMSE). Nos cálculos das acurácias de altimetria e planimetria da pesquisa foram usados os critérios do erro linear e erro circular com 90% de intervalo probabilísticos, de aceitação internacional (Toutin 1998). Para a classificação da classe da carta foram usados os requisitos de PEC altimétrico e planimétrico da COCAR. Maiores detalhes sobre estas relações e estatísticas relacionadas podem ser encontrados em <http://home.earthlink.net/~loganscott53/>

Circular_Error_Probable.htm e em <http://www.cocar.ibge.gov.br/CCA32.htm>.

ÁREA-TESTE A área de estudo está localizada na parte central da Serra dos Carajás (Pará), que se expressa como um grande sigmóide de relevo positivo, possuindo 160 km de eixo maior, no sentido leste-oeste, e 60 km de largura, norte-sul. O corpo principal da Serra estende-se de leste para oeste, com ligeiro desvio para WNW e compreende um conjunto de cristas contíguas, constituindo-se o maior relevo montanhoso na região, que se salienta acima do nível geral das colinas florestadas entre os vales dos rios Xingu e Araguaia. (Fig.2). A maior parte da região é drenada pela rede hidrográfica do rio Itacaiúnas, que corta a borda ocidental da Serrania dos Carajás e desemboca na margem esquerda do rio Tocantins, em Marabá. O seu principal afluente é o rio Parauapebas, que corta a parte oriental da Serra dos Carajás; outros afluentes importantes são os Igarapés Azul, Cinzento e Águas Claras. Desde a sua descoberta, Carajás vem sendo transformada na maior província mineral do país e uma das maiores anomalias minerais do planeta. Além do minério de ferro, há outras jazidas com direitos de exploração pertencentes à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), merecendo menção o depósito de manganês do Azul, além de vários prospectos de minério de cobre (Salobo, Sossego, I18, IB fase IV, Cristalino e Alemão), ouro, níquel e as ocorrências de bauxita, estanho, cromo e wolframita, em processo de avaliação.

A região é caracterizada por relevos montanhosos de serras e platôs, com altitudes variando de 150 a quase 800 metros e corresponde aos restos de uma paleocordilheira arrasada, de idade Pré-Cambriana, enquanto que a idade de seu aplainamento é relativamente moderna, situando-se entre os fins do Mesozóico e a primeira parte do Terciário (Ab'Sáber 1986). Para Maurity & Kotschoubey (1995), as seqüências vulcanossedimentares da região de Carajás são capeadas por uma espessa cobertura laterítica, formada, provavelmente, no Terciário Inferior. Durante o Terciário Superior e o Quaternário, um lento soerguimento regional levou à dissecação do manto laterítico e a individualização dos vastos platôs observados na região. A cobertura vegetal é caracterizada por Floresta Ombrófila Densa, mostrando marcante relacionamento com o relevo, que reflete variações na geologia (Paradella *et al.* 1994). Uma vegetação baixa, tipo savana ("campos rupestres"), está associada com as lateritas dos platôs e mostra um contraste marcante ("clareiras") com a vegetação densa da floresta circundante (Silva *et al.* 1986).

Geologicamente, a Província Mineral de Carajás é caracterizada por três unidades principais (DOCEGEO 1988): (1) Complexo Xingu, com gnaisses tonalíticos a granodioríticos e rochas metassupracrustais; (2) Supergrupo Itacaiúnas, composto pelos Grupos Grão-Pará (rochas metavulcânicas e metassedimentares) e Rio Fresco (metarenitos) e (3) granitos proterozóicos. Segundo Pinheiro (1997), a história estratigráfica e tectônica se inicia por um episódio de deformação dúctil sinistral (responsável pela trama milonítica do embasamento) seguido por, no mínimo, três episódios de deformação rúptil (responsáveis pelo desenvolvimento das principais feições estruturais/tectônicas, como os Sistemas Transcorrentes Cinzento e Carajás). O primeiro episódio de deformação rúptil destal foi o responsável pela preservação de parte das seqüências vulcânicas e sedimentares. Um evento posterior, transpressional sinistral, foi responsável pela inversão tectônica afetando rochas ao longo da Falha de Carajás, megaestrutura que corta a Província segundo WNW-ESE. Os eventos rúpteis poste-

riores são relacionados à reativação de sistemas de falhas. Veneziani *et al.* (2004), utilizando imagens orbitais (RADARSAT-1, TM-Landsat), dados aerogeofísicos e verificações de campo, caracterizaram quatro fases de deformação com natureza compressiva, localmente extensionais, de idade arqueana a proterozóica e reativações distensivas posteriores, responsáveis pela configuração morfoestrutural da Província. A área de pesquisa com 3.736 km² englobou grande parte da folha topográfica Serra dos Carajás (SB-22-Z-A-II) na escala 1:100.000. Esta carta foi produzida a partir de fotos pancromáticas de 1967, da Força Aérea norte-americana, com trabalhos de campo realizados em 1979 e restituição, edição e impressão conduzidos em 1981 pelo IBGE.

IMAGENS ORBITAIS UTILIZADAS Na tabela I são indicadas as características das quatro imagens RADARSAT-1 Fine utilizadas na investigação. Os dois estéreo-pares descendentes F2/F5 são de dezembro de 2001, com um intervalo de uma semana entre as aquisições, de modo a minimizar possíveis variações nas respostas de retroespalhamento do terreno, induzidas por condições atmosféricas e/ou atividades antropogênicas (uso da terra, desflorestamento, etc.). A proporção de "overlap" das imagens em cada estéreo-par foi de 99% e o ângulo de interseção foi de 6 graus. Além dos dados SAR, uma aquisição mais recente (agosto de 2002) do ETM+ Landsat 7 foi usada na geração dos produtos integrados e na elaboração da carta topográfica.

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, ETM+ Landsat 7), 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. A campanha de campo foi conduzida no período de 22 de setembro a 02 de outubro de 2002 com equipe do INPE, da Geoambiente e da empre-

Figura 2 - Localização da área de pesquisa (Serra dos Carajás).

sa Survey GPS, e envolveu levantamentos estático, estático rápido e cinemático, utilizando receptores GPS de frequências dupla e simples, no transporte de coordenadas, no rastreamento de uma Referência de Nível (RN) e no rastreamento dos pontos de controle, previamente selecionados em escritório. Medidas em pontos mais isolados (lagos de S11, ilhotas no Itacaiúnas, clareiras N6, N7, N8) somente foram possíveis com uso de helicóptero da CVRD.

O levantamento estático foi realizado com equipamentos GPS de dupla frequência (modelo Legacy GGD da Javad), rastreando-se dois vértices que foram utilizados como bases de referência (Mina de N4, Hotel Jatobá), além de uma referência de nível do IBGE (RN 1612-D), que serviu de base para o cálculo da ondulação geoidal (N). Além do cálculo de N foram também determinadas as altitudes ortométricas utilizando o Mapa Geoidal do Brasil 1992 (MAPGEO92), que, segundo Camargo (2003), apresenta precisões absoluta na ordem de 3,0 m e relativa de 1,0 cm/km. As precisões das medidas estáticas obtidas foram de 0,5 cm + 1 ppm para a planimetria e 1cm/km para a altimetria, em função da distância entre o ponto determinado e a RN. No levantamento estático rápido, os pontos previamente selecionados em escritório foram levantados em campo com equipamentos GPS de uma frequência (modelo Reliance da Astech), utilizando como referência as duas bases, com média de ocupação de dez minutos por ponto. Os maiores erros em planimetria para os cinquenta pontos levantados foram de 0,75 m em Este e 0,18 m em Norte. O maior erro em altimetria foi de 0,24 m, calculado pela ondulação geoidal obtido em função da RN. Finalmente, o levantamento cinemático em modo contínuo foi conduzido com receptores GPS de frequência simples, com intervalo de gravação de dois segundos, acoplado em veículo e translado pelo helicóptero, e teve como objetivo rastrear as vias de acesso e estradas percorridas bem como as rotas de sobrevôo.

ABORDAGEM METODOLÓGICA Geração dos DEMs Relativo e Absoluto As etapas na geração dos DEMs radargramétricos foram bem detalhadas nos trabalhos anteriores (Paradella et al. 2003, Paradella et al. 2004a). O fluxograma da figura 3 sintetiza as principais fases do processo. Dependendo da utilização ou não de GCPs serão gerados DEMs absoluto ou relativo. A escolha de pontos notáveis nas imagens SAR, de características estáveis e com requisitos de quantidade, de distribuição em área e abrangendo os máximos e mínimos de elevação não é usualmente uma tarefa fácil. Isto se torna mais complicado devido às características da

área de pesquisa, com relevo predominantemente acidentado, coberto com Floresta Ombrófila Densa, e com setores desprovidos de acesso e sem grandes expressões nas imagens de atividades antropogênicas, excluindo os locais de mineração. Mais de uma centena de pontos notáveis, escolhidos no escritório como locais potenciais para as medidas planialtimétricas de precisão, foram verificados em campo. Deste total, 50 pontos geodésicos foram determinados com receptores GPS (método estático), além do monitoramento viário com uso de um receptor geodésico e cadastral de uma frequência (método cinemático de rastreio). Deste conjunto de medidas, uma parte foi usada como GCPs na geração dos DEMs absolutos, e outra foi utilizada como ICPs, no cálculo das acurácias altimétricas dos DEMs relativos e absolutos.

Produção da Carta Topográfica As etapas na produção da carta topográfica são mostradas na figura 4. A partir do DEM absoluto e com informações dos GCPs foi conduzida a ortorectificação das imagens Fine e ETM+ Landsat 7, através das funções de correções geométricas dos pacotes OESE e Xpace (PCI 2001). Vários trabalhos têm 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, Paradella et al. 2004b). Neste tipo de fusão digital, a informação de matiz é fornecida pelo sensor óptico, controladas pelas respostas espectrais da 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 devem ser integradas em um produto final, que preserve o conteúdo dos dados originais. A experiência nas aplicações em Geociências tem mostrado que a transformação RGB (*Red-Blue-Green*)/IHS (*Intensity-Hue-Saturation*) fornece os melhores resultados nas fusões SAR/Ópticas (Harris et al. 1999). Neste sentido, imagens SAR têm sido usadas como canais de intensidade na transformação IHS/RGB, pois representam informação de elevada frequência espacial relacionada com a morfologia do terreno. Em relação aos dados cromáticos, uma grande variação de cores é desejada no produto final e deste modo, o uso do realce por decorrelação nos canais originais ópticos, antes da transformação RGB/IHS, propiciará maior

Tabela 1 - Características das imagens RADARSAT-1 e ETM+ Landsat 7.

Sensor	RADARSAT-1 Fine 2	RADARSAT-1 Fine 2	RADARSAT-1 Fine 5	RADARSAT-1 Fine 5	ETM+ Landsat 7 (1,2,3,4,5,7)
Órbita	Desc.	Desc.	Desc.	Desc.	224-64
Data	07/12/2001	07/12/2001	14/12/2001	14/12/2001	13/08/2002
Coordenadas	50° 15' 06"	50° 20' 59"	50° 18' 38"	50° 24' 35"	50° 17' 03"
Centro	6° 05' 52"	6° 31' 19"	6° 18' 31"	6° 30' 51"	5° 39' 27"
Incidência	39°-42°	39°-42°	45°-48°	45°-48°	Az. Sol: 49° Elev. Sol.: 43°
Resolução	8,7 m x 8,4 m	8,7 m x 8,4 m	7,8 m x 8,4 m	7,8 m x 8,4 m	30 m x 30 m
Área	62 km x 56 km	62 km x 56 km	57 km x 50 km	57 km x 50 km	180 km x 180 km
Formato	Path Image (SGF)	Path Image (SGF)	Path Image (SGF)	Path Image (SGF)	GeoTiff
Pixel	6,25 m x 6,25 m	6,25 m x 6,25 m	6,25 m x 6,25 m	6,25 m x 6,25 m	30 m x 30 m
Pixels x linhas	9966 x 9024	9969 x 9026	9086 x 7871	9086 x 7871	6574 x 5999
Look (r x az)	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	-----
Bits/pixel	16 bits	16 bits	16 bits	16 bits	8 bits
Arquivo	180,281 Mb	179,909 Mb	141,124 Mb	141,263 Mb	327 Mb

gradação de cores no produto final. 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 escolha de bandas Landsat para a integração com imagens de radar (Paradella *et al.* 1998). Deste modo, as três melhores bandas ETM indicadas por este critério foram utilizadas na integração, sendo previamente realçadas 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

as imagens Fine 5 como canais 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 acurácia planimétrica dos produtos integrados foi obtida a partir das informações de campo dos ICPs. Para cálculo de RMSE e CE90, 17 ICPs foram selecionados como pontos notáveis nas imagens ortorretificadas Fine 5 (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 ETM+ Landsat 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 inseridos os pontos cotados de cam-

Figura 3 - Etapas na geração do DEM radargramétrico

Figura 4 - Etapas na produção da Carta Topográfica.

po. Na etapa final foi conduzida a edição da carta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES DEMs Radargramétricos Relativo e Absoluto

As imagens F2 e F5 são apresentadas na figura 5. Os DEMs relativo e absoluto, suas respectivas curvas de nível e dois exemplos de produtos integrados, são mostrados na figura 6. Para o cálculo da acurácia altimétrica, os valores digitais de elevação do DEM relativo foram convertidos da superfície elipsoidal (produto original do DEM relativo) para a superfície geoidal, através da subtração de uma constante de valor correspondente a -2,565 m, obtida da média dos valores da ondulação geoidal para os pontos medidos com DGPS. Na tabela 2 são mostradas as estatísticas de erro em elevação para os DEMs absoluto e relativo, considerando-se 29 e 14 ICPs, respectivamente.

Os resultados obtidos de acurácia altimétrica (RMSE = 33,977 m) do DEM relativo em Carajás são condizentes com a classe A do PEC na escala de 1:250.000 (RMSE $\leq$ 33,33 m). Estes resultados de Carajás, que equivalem aos obtidos para terrenos planos de Tapajós, confirmam o potencial de uso deste tipo de DEM para aplicações de mapeamento cartográfico em escala regional na Região Amazônica, ou em situações onde não se disponha ou não seja possível a obtenção de informações de precisão (DGPS), como as aplicações de defesa (inteligência/militares). Além disso, este tipo de produto é valioso em ortorretificações (correções geométricas de imagens orbitais com uso de DEM). Um outro aspecto vantajoso deste produto é o custo baixo da obtenção do DEM, pela não necessidade de uso de GCPs e pela rapidez de processamento.

Os resultados em acurácia altimétrica do DEM absoluto (RMSE = 20,110 m) confirmam uma melhora considerável no processo de geração do DEM radargramétrico com o uso dos GCPs, com um decréscimo de erro altimétrico de 41% do DEM relativo para o absoluto. Além disso, tal valor corresponde ao obtido com estereopar F1-F5 para relevos moderados no Canadá (Toutin 1998). Finalmente, uma análise comparativa de perfis topográficos, extraídos dos DEMs radargramétricos e medidas de precisão cinemática de campo (DGPS), foi realizada para três situações fisiográficas distintas (Fig. 7 a, b, c): (a) topografia plana de crosta laterítica com vegetação de campo rupestre; (b) topografia plana com Floresta Ombrófila Densa e (c) relevo em declive com Floresta Ombrófila Densa. A comparação dos perfis topográficos indicou que os perfis ortométricos (linhas contínuas fortes), assumidos como referências para as diferentes condições topográficas, apresentam aderências maiores com os perfis do DEM absoluto (linhas com quadrados). Diferentemente do observado em Tapajós, os perfis do DEM relativo (linhas tracejadas-pontilhadas) exibiram, sistematicamente, deslocamentos verticais para baixo, em relação aos perfis de referência.

Carta Topográfica A partir das informações planialtimétricas de GCPs e do DEM absoluto foi conduzida a ortorretificação das imagens RADARSAT-1 Fine 5 e ETM+ Landsat 7, usando-se as funções disponíveis no OESE e Xpase. As imagens Fine 5 foram escolhidas na integração SAR/Óptico pelo melhor contraste de feições indicativas de processos antropogênicos. Como pontos notáveis na ortorretificação das imagens ETM+ e Fine foram utilizados 16 e 19 GCPs, respectivamente. Os valores de RMSE obtidos em relação aos GCPs para as ortorretificações são apresentados na tabela 3.

É importante mencionar que a acurácia em erro das ortorretificações, expressa por valores de RMSE (E, N), depende

Figura 5 - Estéreo-pares RADARSAT-1 Fine Descenderes (A, B = Fine 2; C, D = Fine 5).

da precisão da plotagem do GCPs e da contribuição do DEM no processo de correção geométrica. De modo geral, os valores de RMSE obtidos para as bandas do ETM+ Landsat 7 estão próximos dos observados em literatura, com precisão planimétrica da ordem de sub-célula de resolução espacial. No caso das imagens Fine 5, a precisão planimétrica de 23 m é menor do que a obtida em literatura (Toutin 1997), sendo muito provável que as características do ambiente, induzindo dificuldades de posicionamento dos

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

DEM	RMSE	LE90	Erro Sistemático	Valor Mínimo	Valor Máximo
relativo	33,977 m	56,029 m	28,840 m	-7,318 m	77,465 m
absoluto	20,110 m	33,162 m	7,556 m	-37,646 m	34,489 m

Tabela 3 - Erros Médios Quadráticos para as ortorretificações das imagens ETM+ Landsat 7 e Fine 5 RADARSAT-1 em relação aos GCPs utilizados

IMAGEM	RMSE (E)	RMSE (N)	RMSE (Total)
ETM+ Landsat 7	11,21 m	8,88 m	14,30 m
Fine 5 (superior)	18,95 m	13,09 m	23,03 m
Fine 5 (inferior)	0,87 m	3,55 m	3,65 m

Tabela 4 - Estimativas de Acurácia Planimétrica da Carta Topográfica.

ICPs	RMSE	CE90
17	22,673 m	48,748 m

Figura 6 - DEMs relativo e absoluto (curvas de nível com equidistâncias de 50 metros) = A, B; Fusão IHS Fine 5/ETM 4R5G3B (Decorrelacionado) = C; Fusão IHS Fine 5/DEM absoluto = D.

pontos notáveis e a plotagem monoscópica, contribuíram para este resultado. A partir dos resultados de acurácia planimétrica da tabela 3, as imagens ópticas e SAR foram ortorretificadas com espaçamento de pixel comum de 25 m, de forma a balancear aspectos de precisão geométrica com a integridade radiométrica dos dados. Na ortorretificação das imagens Fine 5 foi utilizada a interpolação com remoção do ruído *speckle*, através de filtragem EFROST, com janela de 5 x 5 pixels. No caso das bandas do ETM+ Landsat 7 foi usado o interpolador por convolução cúbica.

Com as imagens SAR e Landsat ortorretificadas foram gerados os vários produtos integrados, que serviram para a interpretação visual na produção da carta topográfica. A maior contribuição

do ETM+ Landsat 7 foi na caracterização da cobertura vegetal (Florestas Ombrófila Densa e Aberta, campo rupestre, vegetação secundária), atividades antrópicas (detecção de estradas, obras de infra-estrutura de mineração e lavra, culturas, solo exposto, etc.), hidrografia (rios, lagoas), etc. Devido à melhor resolução espacial, as imagens Fine 5 contribuíram na detecção de traçados menores de drenagens e de detalhes de feições antropogênicas (estradas, obras de infra-estrutura, linha de transmissão, áreas de solos expostos). A acurácia planimétrica final da carta topográfica, expressa por RMSE e CE90, foi calculada a partir de medidas de 17 ICPs de alvos notáveis nas imagens ortorretificadas Fine 5, com os resultados apresentados na tabela 4. A carta topográfica radargramétrica final e seu detalhe são mostrados na Figura 8.

CONCLUSÕES

A investigação possibilitou as seguintes conclusões:

- (a) Os resultados de acurácia altimétrica (RMSE = 33,977 m) do DEM radargramétrico relativo atendem aos requisitos da classe A de Padrão de Exatidão Cartográfica, na escala de 1: 250.000;
- (b) Os resultados de acurácia altimétrica (RMSE = 20,110 m) do DEM radargramétrico absoluto são condizentes com a classe B do Padrão de Exatidão Cartográfica nacional, na escala de 1:100.000;
- (c) Os resultados de acurácia planimétrica (RMSE = 22,673 m) da Carta Topográfica orbital atendem aos requisitos de exatidão da Classe A do PEC-altimétrico, na escala de 1: 100.000;

(d) Pela ausência de resultados de literatura, enfocando o desempenho dos dados RADARSAT-1 Fine na geração de DEMs estereoscópicos de terrenos montanhosos da região Amazônia, os valores obtidos em Carajás devem ser considerados como balizadores do potencial da tecnologia radargramétrica orbital (banda C-HH), para este tipo de ambiente fisiográfico. O advento no período 2005-2006 dos radares polarimétricos de melhor resolução espacial nas bandas L (ALOS/PALSAR) e C (RADARSAT-2), reforça a importância da radargrametria orbital como uma alternativa valiosa no levantamento cartográfico de extensas áreas na Amazônia brasileira.

Agradecimentos Ao INPE pelos estéreo-pares Fine e dados ETM+ Landsat 7; ao Dr. Maurício Reis e a CVRD pelo uso do helicóptero MBB na campanha de campo com DGPS e ao técnico Paulo Hahn Junior (Survey GPS) pela operação com os receptores geodésicos Javad em campo. Um agradecimento especial a FAPESP pelos recursos financeiros do PIPE (Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas, processo 1999/06271-7) e ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa do primeiro autor (Processo CNPq 300985/90-8). Aos relatores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Ab'Sáber A.N. 1986. Geomorfologia da Região, In: Carajás: Desafio Político, Ecologia e Desenvolvimento, Capítulo 5, CNPq, Editora Brasiliense, José M. G. de Almeida (org.), p. 88-124.
- 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.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, Belém, Anexo, 10-54.
- 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 Remote Sensing*, 20:210-221.
- Harris J.R., Viljoen D.W., Rencz A.N. 1999. Integration and Visualization of Geoscience Data. In: *Remote Sensing for the Earth Sciences*, A. N. Rencz, Ed.; J. Wiley & Sons, Am. Soc. Photog. & R. S., Vol. 3, pp: 307-354.
- IBGE 2001. Mapa Índice Digital-Mapeamento Geral do Brasil. 1ª. Edição, CD-ROM.
- Kervyn F. 2001. Modeling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment.

Figura 7 - Perfis topográficos com fisiografia variada: (a) platô de crosta laterítica (N1), (b) topografia plana com floresta densa (N4 Sul) e (c) topografia acidentada com floresta densa (estrada Azul-Bahia).

Computer & Geosciences, 27:1039-1050.

Lewis A.J. & Henderson F.M. 1998. Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F. Henderson, & A. Lewis (eds) *Principles & Applications of Imaging Radar*, Manual of R.S., 3rd. Edition, Cap. 2., Amer. Soc. Phot. and R.S., John Wiley & Sons Inc. N. Y., p. 131-181.

Maurity C.W., Kotschoubey B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no platô N1- Serra dos Carajás-PA: degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7:331-362.

Paradella W.R., Silva M.F.F., Rosa N.A., Kushigbor C.A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of

the Carajás Mineral Province (Amazon region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. *Intern. J. Remote Sensing*, 15:1633-1648.

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.

Figura 8 - Carta topográfica (e detalhe) da Serra dos Carajás.

- Paradella W.R., Cecarelli I.C.F., Luiz S., Oliveira C.G., Cottini C.P., Okida R. 2003. Produção de carta topográfica através da estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-1 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). *Rev. Bras. Geoc.*, **33**:99-110.
- Paradella W.R., Oliveira C.G., Luiz S., Cecarelli I.C.F., Cottini C.P., Okida R. 2004a. Operational use of RADARSAT-1 Fine stereoscopy integrated with Landsat-5 Thematic Mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. *Can. J Remote Sensing*, **31**:139-148.
- Paradella W.R., Santos A.R., Veneziani P., Cunha E.S. P. 2004b. Radares imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. *Rev. Bras. Cartografia*, **57**:56-62.
- PCI 2001. *Geomatica*. PCI Geomatics Inc., Canada. (OESE, Xpace Reference Manuals: version 8.2).
- Pinheiro R.V.L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems. Amazon, Brazil*. University of Durham, U.K.,

Ph. D. Dissertation, 408p.

- Raggam H. & Gutjahr K. 1998. DEM generation using RADARSAT stereo data. In: *Proceedings*, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, 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.
- Silva M.F.F., Menezes N.L., Cavalcante P.B., Joly, C.A. 1986. Estudos botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: *Carajás: Desafio Político, Ecologia e Desenvolvimento*, Capítulo 8, CNPq, Editora Brasiliense, José M. G. de Almeida (org.), p. 185-207.
- Simard R., Plourde F., Toutin T. 1996. Digital Elevation Modelling with Stereo SIR-B Image Data. In: *Proceedings*, International Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, ISPRS, Commission VII, Enschede, The Netherlands, 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.
- Toutin T. 1997. Évaluation de la géométrie des images RADARSAT: premiers résultats. In: *Proceedings: GE'97: International Symposium on Geomatics in the era of RADARSAT*, Ottawa, Canadá, CD-ROM.
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: *Proceedings*, ADRO Final Symposium, Montreal, Canadá, CD-ROM.
- Toutin T. 1999. Slope and aspect dependence of radargrammetric DEM", In: *Proceedings*, 4th. International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 21st. Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Canadá, CD-ROM.
- Toutin T. & Gray L. 2000. State-of-the-art of extraction of elevation data using Satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photog. and R. S.*, **55** (1): 13-33.
- Van der Sanden J.J. 1997. *Radar remote sensing to support tropical forest management*. Tropenbos Guyana Series, Georgetown, Guiana, 330 p.
- Veneziani P., Santos A.R., Paradella W.R. 2004. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM-LANDSAT 5), aerogeofísica e dados de campo. *Rev. Bras. Geoc.*, **34** (1):67-78.
- http://home.earthlink.net/~loganscott53/Circular_Error_Probable.htm (2004)
- <http://www.cocar.ibge.gov.br/CCA32.htm> (1984)

Manuscrito A-1495

Recebido em 12 de março de 2004

Revisão dos autores em 11 de julho de 2005

Revisão aceita em 20 de julho de 2005