

Avaliação da qualidade de ortoimagens do sensor PRISM/ALOS-2: estudo de caso para São Gabriel, RS, Brasil

Angela Akemi Goto Nakahori, Sérgio Florêncio de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM). Av. Bento Gonçalves, 9500, C.P. 15044, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. angela.nakahori@gmail.com, sergio.florencio@ufrgs.br

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram a geração e a avaliação de ortoimagens ALOS/PRISM utilizando-se os MDEs (Modelos Digitais de Elevação) a partir das diferentes combinações de visadas deste sensor e de uma imagem com nível de processamento 1B1. A área de estudo foi definida na região rural do município de São Gabriel - RS, que possui relevo quase plano (média altimétrica de 160 m). Na primeira etapa foram gerados os MDEs utilizando a combinação das três visadas e os pontos de controle obtidos através de levantamento de campo. Entre outros parâmetros, foi testada a quantidade mínima necessária de pontos de controle capazes de gerar o MDE, bem como o nível de processamento e o tamanho de janela. Na etapa seguinte, comparou-se o resultado da extração com os Modelos Digitais de Elevação do ASTER (GDEM) e o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), este gerado a partir do Projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2009). Por fim, avaliaram-se os MDEs com os pontos de checagem. Por meio de análises estatísticas, foram selecionados os melhores MDEs para ortorretificação. Os resultados demonstraram que, para esse estudo específico, todos os MDEs da combinação de visada *Backward - Forward* gerados a partir dos pontos de controle utilizados seriam aprovados, dado apresentarem os menores valores de RMS (Erro Médio Quadrático entre 2,94 e 3m). Comprovou-se ainda que ao se utilizar MDEs oriundos de outras combinações, as ortoimagens obtidas atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) Classe A para escala 1:25.000, assim como as ortoimagens geradas a partir dos Modelos de Elevação Globais SRTM e GDEM. O caráter plano do relevo da área de estudo parece ser a principal razão para o bom desempenho observado do SRTM em conjunto com os MDEs gerados a partir do PRISM.

Palavras-chave: ortoimagens ALOS/PRISM, processamento 1B1, modelos digitais de elevação, ortorretificação.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE QUALITY OF GENERATED ORTHOIMAGES FROM PRISM/ALOS-2: A CASE STUDY FOR SÃO GABRIEL, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL. The focus of this study was the generation and evaluation of ALOS/PRISM orthoimages using DEMs (Digital Elevation Models) derived from distinct combinations of sensor viewing from a 1B1 image processing level. The studied area chosen was a rural one located in São Gabriel municipality, in the State of Rio Grande do Sul, Brazil, which is nearly flat (average altimetry 160 m). In the first stage the DEMs were generated using a combination of the three viewing and control points obtained through field survey. Among other parameters, the minimum amount of control points needed that could generate the MDE, the processing level and the window size were tested. Next, two results were compared: the extraction with ASTER (GDEM) Digital Elevation Models and SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), which was generated from the Project TOPODATA from the National Institute for Space Research (INPE, 2009). Finally, the DEMs with the checkpoints were evaluated and the best DEMs for orthorectification were selected using statistical analysis. The results showed that for this specific study all DEMs combining views Backward-Forward generated from the control points would be approved, since they have the lowest values of RMS (Mean Square Error between 2.94 and 3m). Moreover, it was shown that when using DEMs from other combinations, the orthoimages obtained also comply with the Cartographic Accuracy Standard (PEC) for Class A scale 1:25,000 as well as the orthoimages generated from Global SRTM Elevation Models and GDEM. The flatness of the studied area seems to be the main reason for the good performance achieved by SRTM together with the PRISM generated DEMs.

Key words: ALOS/PRISM orthoimages, 1B1 processing level, Digital Elevation Models, orthorectification.

INTRODUÇÃO

O Brasil possui carência de infraestrutura geodésica e mapeamento cartográfico em parte devido a suas características continentais em parte pela falta de investimento governamental.

Essa situação tem levado a um vazio cartográfico de determinadas regiões que carecem de cartas topográficas em escalas superiores a 1: 50.000. Associado ao elevado custo de um recobrimento do território em escalas de 1: 25.000, o uso de imagens obtidas a partir dos sen-

sores transportados pelo satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) é uma alternativa interessante. Essas imagens possuem uma boa relação custo-benefício e excelente qualidade em termos do posicionamento prometido e das características das imagens. Os sensores

utilizados são, segundo o JAXA (2009), o AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer – Type 2*), o PRISM (*Pancromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*) e o PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*).

As imagens do sensor pancromático PRISM, cuja resolução espacial é de 2,5 m, caracterizam-se pelo imageamento estereoscópico obtido a partir da tomada quase instantânea de três visadas distintas, *Backward* (para trás), Nadir (ortogonal) e *Forward* (para frente). Deste modo, possibilitam a geração de MDEs (Modelo Digital de Elevação) a partir das combinações possíveis entre estas visadas (EORC/JAXA, 2008).

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade de uma ortoimagem obtida por meio de MDEs gerados pelo próprio sensor PRISM, dado o baixo custo envolvido na produção do resultado cartográfico, contribuindo assim para ampliar o mapeamento sistemático e seu uso em ações de planejamento, monitoramento e atualização cartográfica, dentro da escala adequada. Esta pesquisa também teve o intuito de atender à intenção da Coordenação de Cartografia do IBGE de se utilizar as imagens ALOS/PRISM na geração de uma base cartográfica de referência com imagens de qualidade geométrica compatível e com a exatidão esperada para produtos do Sistema Cartográfico Nacional (IBGE, 2009).

A área de estudo escolhida foi uma região rural próxima ao município de São Gabriel, RS. Foi feita a avaliação da ortoimagem gerada a partir da PRISM e com nível de processamento 1B1, buscando atender às recomendações propostas no Relatório de Avaliação do ALOS/PRISM divulgado pelo IBGE.

SENSORES DIGITAIS

Os sensores digitais são arranjos retangulares de fotodetectores em estado sólido que captam a energia refletida e a quantificam como imagem. O tipo mais comum de detector é o CCD (*Charge-Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplada), composto por elementos

sensores pontuais de silício e que armazenam carga elétrica proporcional à intensidade de luz incidente (Wolf e Dewitt, 2000).

Um sensor linear *pushbroom* é um arranjo linear de fotodetectores que produz imagens de forma dinâmica em relação à superfície terrestre com uma linha de imagem a cada intervalo de tempo. Seis Parâmetros de Orientação Exterior (POE) são gerados para cada linha e compreendem as coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) do Centro Perspectivo (CP) no espaço objeto e os ângulos de altitude, ou seja, a rolagem ou *roll* (ϖ), arfagem ou *pitch* (φ) e guinada ou *yaw* (κ), rotações que representam os possíveis movimentos sofridos pela plataforma orbital (Grodecki e Dial, 2001). Os parâmetros de orientação interior, isto é, distância focal, posição do ponto principal, os coeficientes de distorção das lentes e outros parâmetros diretamente ligados à descrição dos parâmetros físicos do sensor são geralmente os mesmos para toda a imagem (Dial e Grodecki, 2004).

Já um sensor trilinear, também chamado de TLS (*Tri Linear Scanner*), é um sistema baseado no uso simultâneo de três sensores. Cada um deles registra uma faixa do terreno nas direções nadir (perpendicular), à frente (*forward*) e atrás (*backward*). Com o deslocamento da aeronave e a aquisição contínua, cada ponto no terreno é imageado três vezes, o que é importante em termos de recuperação da posição tridimensional (Tommaselli *et al.*, 2000). As três linhas adquiridas pelo sensor podem ser comparadas às três linhas de uma imagem de quadro com os mesmos parâmetros geométricos,

ou seja, os Parâmetros de Orientação Exterior, que podem ser considerados os mesmos para as três linhas capturadas (Medeiros, 2007). A maior vantagem desse tipo de sensor seria a tomada quase que instantânea das imagens para geração de MDE, já que, teoricamente, as condições de iluminação da cena são mantidas. Em sensores que geram pares estereoscópicos fazendo visada *across-track*, os estereopares são obtidos em órbitas laterais à área a ser imageada com intervalos de dias entre as aquisições, o que pode acarretar diferenças radiométricas e espectrais entre os alvos (Costa e Vergara, 2009).

SENSOR ALOS-PRISM

O satélite japonês ALOS foi lançado pela Agência Espacial Japonesa (JAXA) no dia 24 de janeiro de 2006 com a missão de observar e obter imagens do planeta para fins de monitoramento de desastres ambientais, levantamento de recursos naturais e, em especial, de suporte à Cartografia, tendo vida útil estimada em cinco anos.

O sensor PRISM opera na faixa do visível com uma banda pancromática e pode operar nos modos Nadir e *Triplet* (Tabela 1). No primeiro modo, é utilizada apenas a visada nadir, com os 6 CCDs que a compõe, e obtendo imagens em uma faixa de 70 km. No modo *Triplet*, as 3 visadas são utilizadas, cada uma com 4 CCDs, de modo a fornecer imagens estereoscópicas em uma faixa de 35 km. Com essa metodologia, as visadas *forward* e *backward* mostram inclinações de 23,8°, formando, respectivamente, pares estereoscópicos com

Tabela 1. Características do sensor PRISM.
Table 1. Characteristics of the PRISM sensor.

Número de bandas	1 - Pancromática
Comprimento de onda	0,52~0,77 microns
Número de radiômetros	3 (nadir para frente e para trás)
Relação Base/Altura (B/H)	1,0 (entre as visadas para frente e para trás)
Resolução Espacial	2,5 m (nadir)
Largura da Faixa	35 km (triplet) / 70 km (nadir)
Resolução Temporal	46 dias
Resolução Radiométrica	8 bits

uma relação base/altura (B/H) igual 1,0 (EORC/JAXA, 2008).

A JAXA fornece as imagens PRISM com os níveis de processamento 1A, 1B1, 1B2R, 1B2G. No nível 1B1, as imagens são corrigidas radiometricamente, adicionando-se os coeficientes de calibração absoluta. Tais imagens possuem coeficientes de calibração geométrica anexados, mas não aplicados. As imagens são fornecidas em arquivos individualizados para cada CCD de cada visada.

A calibração do sensor PRISM é dada através da evolução do alinhamento entre as unidades CCDs (Orientação Interior) e o fornecimento de parâmetros apropriados de compensação. Em agosto de 2007, o sistema operava utilizando versão de três parâmetros atingindo precisão geométrica relativa de quatro metros ou menos em todos os três radiômetros. Em 2009, a acurácia divulgada foi de 2,4 metros. A precisão (acurácia) geométrica absoluta é conseguida através da atualização dos parâmetros de alinhamento pontual (AP) e pela constante evolução destes (EORC/JAXA, 2009).

DISTORÇÕES E CORREÇÕES GEOMÉTRICAS NAS IMAGENS

As imagens brutas produzidas, seja por sensores remotos, aerotransportados ou orbitais, possuem erros e distorções sistemáticos que são introduzidos no momento de sua aquisição e, geralmente, estão relacionados a diversos fatores. Entre estes, estão a rotação e a curvatura da Terra, o movimento do espelho durante o imageamento, a variação da altitude, a posição e a velocidade da plataforma e as distorções panorâmicas e as causadas pelo relevo topográfico. Tais erros podem ser corrigidos, eliminados ou reduzidos, aplicando-se modelos matemáticos de correção geométrica (El Ashmawy *et al.*, 2005).

Os modelos matemáticos para correção podem ser classificados em rigorosos e não rigorosos, também chamados de paramétricos (ou generalizados). Os modelos rigorosos visam a descrever as propriedades físicas e partem do princípio de colinearidade, isto é, que um ponto

no espaço-imagem (p), o seu respectivo ponto no espaço-objeto (P) e o centro perspectivo (CP) sejam colineares. Para desenvolver tais modelos matemáticos, faz-se necessário o conhecimento de dados de calibração do sensor, informações da órbita e altitude, que nem sempre estão disponíveis. Os Modelos Paramétricos ou não rigorosos têm seus parâmetros de orientação modelados como termos polinomiais de uma equação. Usualmente utilizam-se pontos de controle coletados no campo (espaço-objeto) para realizar a correspondência com a imagem.

Os métodos não-paramétricos mais frequentemente usados são baseados nos Polinômios Racionais 3D, conhecidos na literatura como *Modelo de Função Racional* (RFM- *Rational Function Model*) ou *Rational Polynomial Camera* (RPC) – *Rational Function Coefficients* (RFC) – Coeficientes Polinomiais Racionais (Toutin, 2004).

Existem várias pesquisas a respeito da aplicação de métodos não-rigorosos, tais como a utilização de Polinômios Simples e Polinômios Racionais (RPC). Apesar da similaridade, a principal diferença entre ambos os polinômios refere-se ao fato de que o Método Polinomial Racional envolve um quociente de transformações polinomiais e leva em conta também a elevação do terreno, permitindo modelar terrenos que apresentem maior variabilidade altimétrica (Cheng e Toutin, 2001; Hu *et al.*, 2004; Takaku e Tadono, 2007; Tommaselli e Medeiros, 2010). Os polinômios simples são menos complicados em seu uso e considerados desatualizados para correção de imagens, contudo, mostraram-se adequados para áreas limitadas, pequenas e planas. Em resumo, os métodos ditos não-paramétricos são considerados simples e sua vantagem é não levar em conta as informações das efemérides e da elevação do satélite e do sensor.

Kocaman e Gruen (2008) testaram dois modelos rigorosos para orientação das imagens PRISM, baseados em um algoritmo de ajustamento em bloco modificado. Para modelar geometricamente e validar as imagens do sensor PRISM, é possível usar dois modelos diferentes

de trajetória, o DGR (*Direct Georeferencing Model*) e o PPM (*Piecewise Polynomial Model*). No modelo DGR, os parâmetros de altitude e posição são modelados usando 9 parâmetros de correção de erros sistemáticos, enquanto no PPM, os parâmetros de orientação exterior (OE) são descritos em funções polinomiais de tempo. Para a obtenção dos coeficientes de OE, é utilizado o ajustamento em bloco. Entre os dois modelos, o DGR se mostrou mais eficiente quando há poucos pontos de controle e apresenta resultados mais consistentes nos campos de testes observados, atingindo valores entre meio e um terço do pixel de acurácia vertical.

Alguns modelos matemáticos comumente encontrados na literatura fazem o relacionamento direto entre espaço-imagem e espaço-objeto. Entre estes estão a Transformação Afim Geral 2D (Mitishita e Saraiva, 2002), Transformação Projetiva 2D e Polinômios de 2º Grau (Pino e Firkowski, 2009), Transformação Afim Geral 3D (Fraser *et al.*, 2001), Transformação Afim Paralela (Fraser *et al.*, 2004), *Direct Linear Transformation* - DLT (Mitishita *et al.*, 2003) e o Modelo de Função Racional - RPC (Dowman e Tao, 2002; Grodecki e Dial, 2001; Wang *et al.*, 2008).

O modelo APM (*Affine Projection Model*) foi utilizado por Pedro (2005) para ortorretificação de imagens Quickbird e IKONOS e por Cerqueira *et al.* (2006) com uma imagem IKONOS GEO.

A aplicação de detalhamento do desenvolvimento matemático da DLT foi realizada por Kwon (1998) e Debiasi (2008), esta última objetivando a ortorretificação de imagem do sensor CBERS-2.

Os Modelos de Função Racional (RFM), por fim, são tipos especiais de funções polinomiais onde é comum o uso em modelos não-paramétricos, implementados em quase todos os pacotes de *softwares* de processamento imagens. Desde o lançamento dos primeiros satélites de alta resolução, muita atenção foi dada ao uso de modelos geométricos alternativos, especialmente RPCs, para restituição, ortorretificação e modelagem de terreno.

MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E ORTORRETIFICAÇÃO

As técnicas disponíveis para geração de MDE são a topografia convencional, o levantamento geodésico, a fotogrametria (restituição), o sensoriamento remoto através de imagens estereoscópicas (usando o efeito paralaxe), e a Interferometria de Radar (SRTM, PALSAR) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

O Modelo Digital de Elevação do ASTER (GDEM) é produzido a partir do processamento automático de mais de 1,5 milhão de cenas desse sensor em arquivo, incluindo as estereoscópicas, para produzir 1.264,118 cenas individuais baseadas nos MDEs gerados pelo ASTER. A resolução desse modelo é dada como sendo de 30 m. Para as imagens do satélite ASTER, o quociente (B/H) é aproximadamente 0,6, relação que determina a resolução altimétrica (METI/NASA, 2009).

Os dados SRTM são o resultado de uma missão espacial da NASA, associada a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana). Essa missão teve como objetivo gerar um MDE usando a técnica de interferometria, que compara duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície. Esse método possuiria maior acurácia em relação à técnica de estereoscopia segundo a CCRS (2009).

No Brasil, pode-se obter os dados SRTM por meio do portal da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) ou no Projeto TOPODATA (INPE, 2009). Esse projeto oferece dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM disponibilizados pela internet (Valeriano e Rosseti, 2008). Os dados SRTM-TOPODATA possuem resolução de 30 m e são gerados a partir de interpolação por Krigagem (INPE, 2009; Valeriano e Rossetti, 2011).

Os modelos matemáticos para geração de ortoimagens são as Equações de Colinearidade na forma direta e inversa.

O modelo de colinearidade na forma inversa realiza a projeção dos pontos no referencial da imagem para o referencial do terreno. Na forma direta, realiza a projeção dos pontos do terreno para o referencial da imagem.

O Modelo de Polinômios Racionais é um modelo matemático simplificado que relaciona o espaço imagem (posição de linha e coluna) para latitude, longitude e altitude da superfície, sendo este implementado na maioria dos *softwares* comerciais (p. ex. SulSoft, 2009). Usando-se a imagem de satélite, determinam-se os Coeficientes de Polinômios Racionais (RPCs) a partir de pontos de controle medidos no terreno e um MDT (Modelo Digital de Terreno) ou MDE (Modelo Digital de Elevação) que representa os valores de elevação capaz de produzir uma imagem ortorretificada.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

Do mesmo modo que qualquer medição deve ser acompanhada de sua precisão e/ou exatidão, os produtos cartográficos (carta, planta ou imagem oriunda de levantamento topográfico, geodésico ou orbital) devem igualmente ser avaliados de acordo com esses parâmetros.

Para Gemael (1994), a acurácia ou exatidão está relacionada com os erros sistemáticos e aleatórios e diz respeito à dispersão de valores em relação ao valor exato da observação. Já o termo precisão está somente vinculado aos erros aleatórios e refere-se à dispersão de valores em relação à média das observações.

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) no Brasil foi estabelecido a partir

do Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984, juntamente com as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) e visa a avaliar estatisticamente um produto cartográfico de acordo com a sua exatidão posicional (Tabela 2). Nesse caso, 90% dos pontos bem definidos numa carta não deverão apresentar erro superior ao Erro Planimétrico ou Altimétrico estabelecido quando testados no terreno. Essa percentagem corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão. Tomado isoladamente num trabalho cartográfico, não deverá ultrapassar 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica. O decreto ainda considerou equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático (EMQ).

ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

A área de estudo localiza-se a sul de São Gabriel, município da região centro-oeste do Rio Grande do Sul, e a 320 km da capital do Estado, Porto Alegre (Figura 1). Sua escolha deveu-se à prévia disponibilidade de um levantamento de campo (Salomoni, 2009) e ao interesse da Superintendência Regional do Rio Grande do Sul (Setor de Cartografia da SR-11), que buscava o desenvolvimento de uma metodologia de utilização de imagens do sensor PRISM/ALOS e pontos de controle, MDE SRTM e MDE GDEM para anteprojetos daquela instituição.

Os *softwares* utilizados foram o ENVI 4.7, EZSURV 2.40, Global Mapper 8.0 e Surfer 8.0 e a imagem ALOS adquirida é

Tabela 2. Padrão de Exatidão Topográfica (PEC) segundo a legislação brasileira para cartas na escala 1:25.000. Abreviaturas: Ec, Escala da carta; EP, Erro Padrão/Desvio Padrão/Erro Médio Quadrático; Eq, equidistância entre curvas de nível.

Table 2. Topographic Accuracy Standards (PEC) established by 1984 Brazilian laws to 1:25.000 scale charts. Abbreviations: Ec, chart scale; EP, standard error, standard deviation or mean square error (considered equivalents to Brazilian laws); Eq, equidistance between contour lines.

Classe	Planimetria				Altimetria			
	PEC		EP		PEC		EP	
A	0.5 mm* Ec	12.5m	0.3 mm* Ec	7.5m	1/2*Eq	5m	1/3*Eq	3.3m
B	0.8 mm* Ec	20m	0.5 mm* Ec	12.5m	3/5*Eq	6m	2/5*Eq	4m
C	1.0 mm* Ec	25m	0.6 mm* Ec	15m	3/4*Eq	7.5m	1/2*Eq	5m

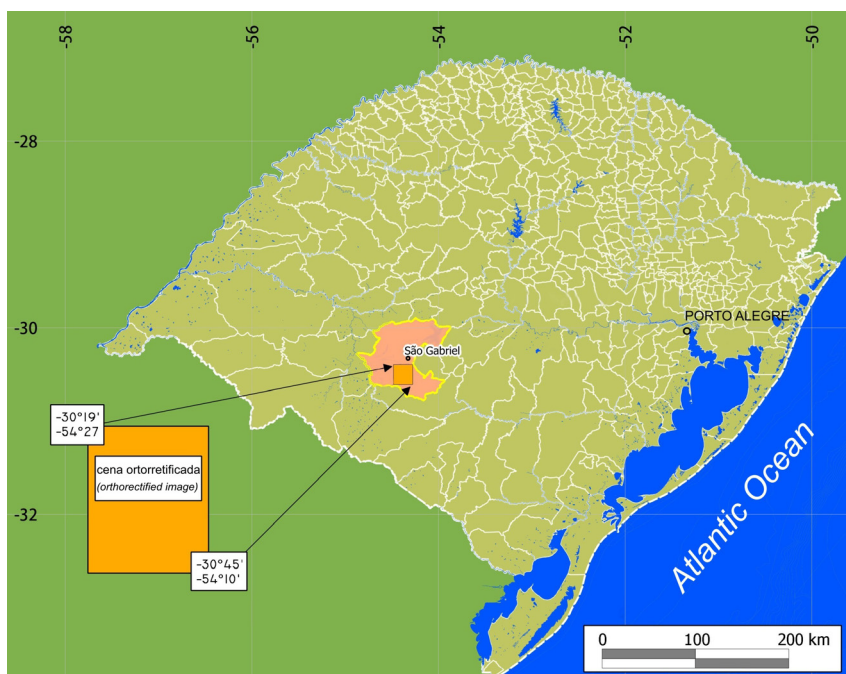


Figura 1. Mapa do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, e a localização da área foco do estudo.

Figure 1. Geographical map of the State of Rio Grande do Sul, Brazil, and the location of studied area.

a nominada como ALPSMN065714215, datada de 19/04/2007, com nível de processamento 1B1.

Vinte e quatro pontos de controle (GPCs, *Ground Points Control*) foram obtidos por meio de receptores GNSS L1L2 com as coordenadas determinadas por ajustamento em rede geodésica, com precisão planimétrica de 2 cm e altimétrica de 5 cm e nível de precisão de 1 δ (nível de confiança de 68%).

A metodologia empregada de utilização de imagens do sensor PRISM/ALOS pode ser resumida em seis etapas, expressas na Figura 2. A primeira delas consistiu na obtenção de um mosaico de imagens que unisse as informações das imagens do tipo 1B1, já que são fornecidas com correções geométricas e em 12 arquivos separados para cada uma das três visadas (4 CDs), totalizando 12 faixas ou tiras. Para o processo de junção das faixas, foi utilizado suporte da Empresa SulSoft, objetivando estabelecer uma rotina em linguagem IDL, ainda não implementada no *software* ENVI. Através deste método, obtém-se

um “pseudo-georreferenciamento” das coordenadas do canto de cada uma das faixas pela sobreposição de 32 pixels entre cada CCD (EORC/JAXA, 2008). O “pseudo-georreferenciamento” é uma operação de registro de imagens que resulta em um mosaico de imagens ainda não georreferenciadas, obtido a partir de valores arbitrários colocados nos campos de informação cartográfica. A segunda imagem obtida também é “pseudo-georreferenciada” e irá propiciar um mosaico de imagens georreferenciadas (SulSoft, 2009). Assim, são obtidos mosaicos para as visadas *Backward*, Nadir e *Forward*, que constituirão os dados de entrada para os demais processos.

Na segunda etapa, são gerados os RPCs a partir dos pontos de controle (PCs) obtidos do levantamento geodésico de cada mosaico (*Backward*, Nadir e *Forward*) e que fornecem os Parâmetros de Orientação Exterior (POE) a serem associados ao cabeçalho da imagem de cada mosaico (*.hdr). Para a determinação dos seis POE, escolheu-se o Modelo Matemático Polinomial de Primeira Or-

dem do tipo genérico e oferecido pelo *software* ENVI (2009). Esse modelo tem um relacionamento linear entre a coordenada geográfica e a da câmera, dado o alinhamento do sensor na direção x. Os seis pontos de controle correspondem ao mínimo necessário para se obter uma solução (sete no caso do MMQ).

Em polinômios de ordens superiores, é necessário um maior número de pontos de controle, capazes de modelar uma superfície com relevo mais acidentado. Para cenas onde há variação dos POE entre as linhas do sensor, geralmente derivadas de plataformas menos estáveis, como as aerotransportadas, também é importante aumentar o número de pontos (SulSoft, 2009). Na área de estudo, com relevo quase plano, optou-se por utilizar polinômios de grau 1.

O terceiro passo consiste na determinação dos pontos conjugados em combinações disponíveis entre as três visadas. Para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), foram combinados os mosaicos *Backward* (B), Nadir (N) e *Forward* (F), cujas etapas são descritas na Figura 3.

Visando a avaliar a influência da quantidade de Pontos de Controle (PC) na geração do MDE foram realizados testes a partir do conjunto de pontos disponíveis. Metade dos pontos foi selecionada para a geração do MDE propriamente dito, e os restantes (de 11 a 6 pontos) foram utilizados como pontos de controle. Houve o cuidado para que houvesse uma boa distribuição espacial dos pontos e que o PC 75, com a maior cota altimétrica, estivesse presente em todas as combinações geradas.

Os Pontos de Amarração (PA, *Tie Points*) foram gerados automaticamente, optando-se por um número de 25, recomendado pelo manual do *software* ENVI. Nessa etapa, o objetivo foi diminuir a paralaxe em y para um valor menor ou igual a um pixel, o que só pode ser obtido na combinação B-N. Comparativamente, para a combinação B-N, o valor de paralaxe foi quase dez vezes menor. Para as combinações em que uma das visadas era a *Forward*, esse procedimento foi benéfico para a obtenção de valores de paralaxe menores, no entanto, estes não foram

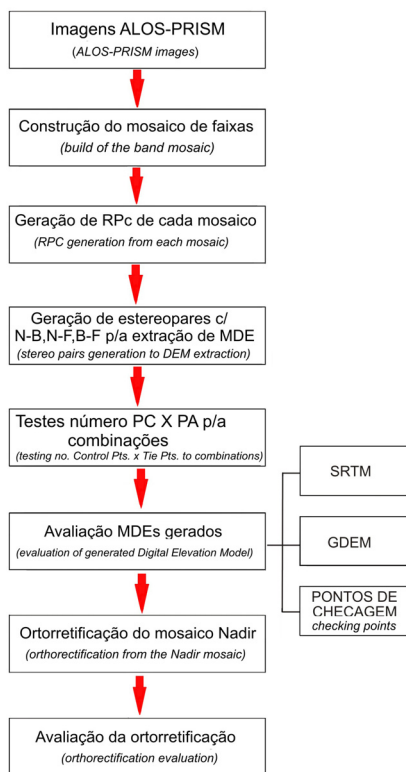


Figura 2. Fluxograma das etapas realizadas para utilização das imagens ALOS/PRISM na geração de uma base cartográfica.
Figure 2. Flow chart of the steps performed to use ALOS / PRISM images in generating a base map.

menores que o valor estipulado de um pixel. A visada (F) apresenta variações de ordem radiométrica e geométrica que dificultam a plena e inequívoca posição dos pontos com precisão melhor que 4 pixels.

Geraram-se, para cada uma das três combinações, no mínimo, 6 MDEs distintos, totalizando 24 MDEs com resolução de 2.5m.

Fez-se a avaliação desses MDEs utilizando-se os pontos que não participaram de nenhuma etapa do processo. Esses foram denominados Pontos de Checagem (PC), sendo ao todo 13, também bem distribuídos pela imagem. Para este teste utilizaram-se as combinações B-F, B-N e N-F gerados a partir de 6, 7 e 11 PCs, elaborados com parâmetros de processamento padrão, a janela de correlação 5x5 e o nível 4.

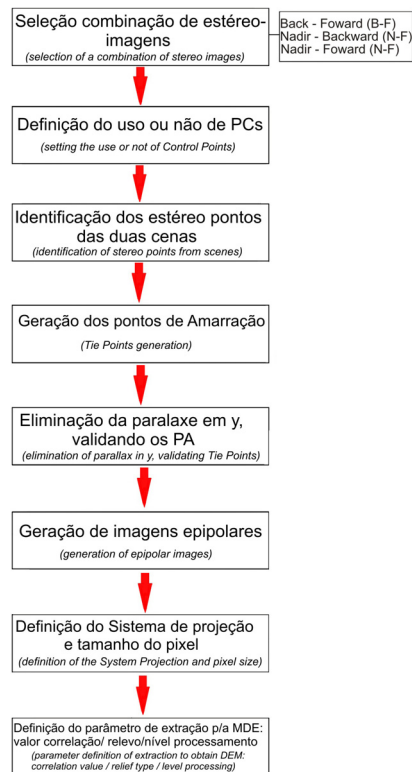


Figura 3. Fluxograma para geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) com o uso da combinação de mosaicos Backward (B), Nadir (N) e Forward (F).
Figure 3. Flow chart to generate a Digital Elevation Model (DEM) using a combination of Backward (B), Nadir (N) e Forward (F) mosaics.

Para a combinação B-F, considerando-se a quantidade de PCs utilizados na geração do MDE, o resultado final da análise estatística pode ser visualizado na Tabela 3. Foi possível observar que os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) são inferiores ao valor máximo estabelecido pelo PEC para a Classe A, considerando-se a escala 1: 25.000, que é de 3,3 m. Nesse caso, todas as combinações poderiam ser utilizadas para o processo final de ortorectificação. Essa visada, em ângulos opostos de 23.8°, consegue delinear a rede de drenagem com muito mais nitidez.

Para a combinação B-N, os resultados são apresentados na Tabela 4. Utilizando-se o mesmo critério anterior, o único MDE aprovado seria o gerado a partir de 7 PCs (B-N 07). Na sequência da análise, o único MDE aprovado para

a combinação N-F foi o gerado a partir de 11 PCs (N-F11), conforme ilustrado na Tabela 5.

Levando-se em consideração que o MDE mais adequado é aquele que apresenta menor Erro Padrão (EMQ), o MDE B-F11, com valores de 2.943, foi o mais adequado para a ortorectificação do mosaico Nadir. Entretanto, os MDEs B-F07 (EMQ=2.99), MDE B-F06 (EMQ=3.00), B-N07 (EMQ=3.23) e N-F11 (EMQ=3.18) também poderiam ser utilizados, confirmando a validade da seleção das combinações B-F, independente do número de pontos de controle (acima de 6) para o processo de ortorectificação.

Para a avaliação SRTM e GDEM, a mesma metodologia foi usada e também buscando validar a qualidade dos modelos com os pontos de checagem. A Tabela 6 apresenta os valores altimétricos coletados e os resultados estatísticos finais. A análise dos resultados mostra que o modelo SRTM possui valores de elevação muito próximos aos dos pontos de checagem e atesta seu melhor uso na obtenção do MDE. O bom desempenho desse modelo global de superfície pode ser explicado pelo fato de que a área de estudo apresenta pouca variação altimétrica e que a resolução de 30 m confere um aspecto mais homogêneo para o relevo da área. O GDEM também apresentou valor de EMQ baixo, mas cerca de quatro vezes maior do que o obtido pelo SRTM.

Após a avaliação dos MDEs PRISM, Modelos Globais SRTM e GDEM, o processo de ortorectificação do mosaico nadir foi utilizado com 8 pontos de controle (os que não foram incluídos na etapa de extração do MDE). Para o processo de avaliação da ortoimagem, foi aplicada uma análise estatística de acurácia dos pontos de checagem por meio dos testes de t-Student e Qui-quadrado, buscando a classificação da ortoimagem quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Segundo o IBGE (2009), o número mínimo de pontos de controle necessários para ortorectificação seriam sete. Utilizando-se os oito pontos, o EMQ foi de 0,93. Na ortorectificação

Tabela 3. Resultado final da análise estatística para a combinação B-F, considerando a quantidade de Pontos de Controle usados na geração do Modelo Digital de Elevação, mostrando que todas poderiam ser utilizadas no processo final de ortorretificação.

Table 3. Final results of the statistical analyses of the B-F combinations taking into account the number of Control Points (PC) used in the generation of the Digital Elevation Model (MDE). It shows that all combinations could be used in the final processes of orthorectification.

Combinações	B-F06	B-F07	B-F11
Número de pontos	13	13	13
Soma	-55.741	-49.741	15.259
Mínimo (m)	-19.318	-19.318	-12.318
Máximo (m)	14.164	15.164	18.239
Média (m)	-4.288	-3.826	1.174
Mediana	-1.534	-1.353	3.647
Erro Padrão (EMQ)	3.002	2.993	2.943
Desvio-Padrão	10.824	10.794	10.612

Tabela 4. Resultados para combinação B-N, mostrando que o único MDE aprovado seria o gerado com o Ponto de Controle 7 (B-N07).

Table 4. Final results to the B-N combination showing that B-N07 is the most appropriate to generate the Digital Elevation Model (MDE).

Combinações	B-N06	B-N07	B-N11
Número de pontos	13	13	13
Soma	-217.741	-228.741	-190.740
Mínimo (m)	-38.781	-38.781	-38.781
Máximo (m)	5.135	20.164	3.164
Média (m)	-16.750	-17.595	-14.672
Mediana	-15.002	-18.002	-13.002
Erro Padrão (EMQ)	3.546	3.235	3.436
Desvio-Padrão	12.787	11.666	12.390

Tabela 5. Resultados para combinação N-F e a aprovação do PC11 (N-F11).

Table 5. Final results to the N-F combination confirming Control Point 11 (N-F11) as the most appropriate to generate the MDE.

Combinações	N_F06	N_F07	N-F11
Número de pontos	13	13	13
Soma	-53.741	-70.741	-57.741
Mínimo (m)	-31.781	-29.781	-31.143
Máximo (m)	23.998	19.998	15.998
Média (m)	-4.134	-5.442	-4.442
Mediana	-1.318	-6.382	-5.382
Erro Padrão (EMQ)	4.415	4.100	3.188
Desvio-Padrão	15.918	14.785	11.493

Tabela 6. Resultados estatísticos para SRTM e GDEM com os valores altimétricos e os resultados estatísticos finais, atestando a maior adequação de SRTM para terrenos mais planos, como o da área estudada.

Table 6. Altimetric values collected and the comparative statistical results to the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) and Digital Elevation Models from ASTER (GDEM). The obtained data shows that SRTM is the most adequate to be applied mainly in mostly flattened areas. Nonetheless, GDEM also exhibits good results.

Combinações	SRTM	GDEM
Número de pontos	13	13
Soma	35.259	33.259
Mínimo (m)	0.441	-14.382
Máximo (m)	4.466	13.466
Média (m)	2.712	2.558
Mediana	2.857	2.857
Erro Padrão (EMQ)	0.372	2.111
Desvio-Padrão	1.341	7.611

foi utilizado o modelo polinomial de primeiro grau, já que as informações dos Parâmetros de Orientação Exterior (POE) foram empregadas para a geração do mosaico e os modelos globais SRTM e GDEM, objetivando testar sua capacidade de atender ao PEC Classe A, na escala 1: 25.000.

A Tabela 7 apresenta os dados comparativos das diferenças planimétricas encontradas nas ortoimagens entre os modelos usados e os pontos de checagem. As coordenadas dos pontos estão referenciadas ao Sistema Geodésico SIRGAS2000 e na Projeção UTM, fuso 21, MC=57°. Ao se analisar esta tabela, pode-se observar que a média do Erro Planimétrico (*Erro Plan*) do GDEM é maior que aquela obtida pelo SRTM em quase todos os pontos obtidos e que o valor de Desvio-Padrão do SRTM é menor.

Para a ortorretificação, utilizou-se o MDE B-F11PCs por ser o que apresentou, como visto, o menor valor de EMQ, inferior também ao Erro Padrão máximo permitido para o PEC Classe A na escala 1:25.000. Optou-se também por selecionar o MDE PRISM, que apresentou o maior valor de EMQ para fins de análise (MDE N-F06PCs), mesmo que não atendessem à especificação quanto ao PEC.

Complementando essa etapa de investigação, foi escolhido o melhor MDE da combinação B-N (B-N07PCs) e o melhor da combinação N-F (N-F11PCs), visando a avaliar se a geometria da visada chegaria a afetar de alguma forma a qualidade final da ortoimagem. Os valores das diferenças planimétricas do MDE N-F06PCs e do B-F11PCs podem ser comparados e observados na Tabela 8. Comparando-se os erros planimétricos nas duas combinações tem-se que o erro planimétrico apresentado pela combinação N-F06PCs é cerca de um metro maior, mesmo que os valores de desvio-padrão sejam muito próximos.

Com o intuito de gerar e analisar ortoimagens com MDEs oriundos da combinação das visadas foi ainda realizada a análise do MDE das combinações B-N

Tabela 7. Dados comparativos de discrepância entre as coordenadas dos pontos de checagem e as ortoimagens geradas pelo SRTM e GDEM.
Table 7. Comparative data between the check points obtained with SRTM and GDEM and the planimetric coordinates from the obtained orthoimages. The points were referred with the Geodesical System SIRGAS2000 and in UTM (Zone 21, MC=57°).

Pontos	SRTM			GDEM		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)
13	0.650	-0.750	0.992	0.250	1.250	1.275
15	-1.975	-2.400	3.108	-1.200	-1.250	1.733
25	-5.025	0.200	5.029	-3.550	-3.150	4.746
43	-0.075	-5.675	5.675	0.975	-4.500	4.604
59	-1.275	1.200	1.751	-2.025	0.075	2.026
75	-0.800	2.450	2.577	-1.075	2.000	2.271
84	-0.350	-2.225	2.252	-1.250	-2.125	2.465
89	1.125	3.725	3.891	3.750	4.075	5.538
99	-1.725	-2.525	3.058	-4.850	-2.450	5.434
107	5.225	0.875	5.298	5.425	1.475	5.622
162	4.200	5.100	6.607	3.550	4.5750	5.791
Média	-0.002	-0.002	3.658	0.000	0.0750	4.604
Variância	8.115	9.799	3.194	10.149	8.753	3.242
Desvio-Padrão	1.785	1.720	1.342	3.186	2.959	1.801

Tabela 8. Dados comparativos entre os MDEs das imagens PRISM.

Table 8. Comparative data between Digital Elevation models (MDE) in PRISM images. The obtained values show that the planaltimetric error for the combination N-F06PCs is near a meter high since the standard deviation is nearly the same.

Pontos	B-F11PCs			N-F06PCs		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)
13	0.200	0.900	0.922	3.325	2.175	3.973
15	-1.000	-1.325	1.660	0.200	-2.375	2.383
25	-2.500	-1.950	3.171	-4.725	-2.700	5.442
43	1.375	0.075	1.377	0.525	-4.025	4.059
59	-2.100	-2.300	3.114	-1.725	-0.050	1.726
75	-0.925	1.650	1.897	-1.325	1.725	2.175
84	4.675	1.250	4.839	4.900	2.150	5.351
89	3.500	1.475	3.798	3.575	2.075	4.134
99	2.650	2.200	3.444	1.075	3.825	3.973
107	-1.175	-1.000	1.543	-1.150	-1.400	1.819
162	-4.700	-0.950	4.795	-4.700	-1.400	4.904
Média	0.000	0.002	2.778	-0.002	0.000	3.630
Variância	7.904	2.487	1.904		6.432	1.914
Desvio-Padrão	2.811	1.577	1.380		2.536	1.384

(B-N07PCs) e N-F (N-F11PCs), cujos dados de erros planimétricos obtidos estão expressos na Tabela 9.

Finalmente, e com o objetivo de analisar a acurácia da ortoimagem e sua capacidade de atendimento ao PEC, efetuaram-se os testes estatísticos t-Student e Qui-quadrado. Para isso, utilizaram-se como parâmetros os valores de média, desvio-padrão e variância do Erro Planimétrico, resumidamente apresentados na Tabela 10.

Para o Teste de T-Student foram considerados os 11 pontos de checagem analisados, totalizando 10 graus de liberdade, buscando determinar a média populacional esperada para cada conjunto de medidas, isto é, para cada ortoimagem, considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 90% conforme preconizado no PEC. A Tabela 11 mostra os resultados de tcalc.

$$(t_{\alpha, 10}) = 1.372, \text{ valor tabelado}$$

Aplicando-se o teste de hipótese com nível de significância de 10%, considerando a escala 1:25.000, PEC Classe A, o Erro Planimétrico máximo admissível é de 12.5 m. Dessa forma, o teste de hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12.5 \text{ m}$$

$$H_1: \mu > 12.5 \text{ m}$$

Como $t_{\text{calc}} \leq t_{\alpha, n-1}$, foi aceito H_0 , que significa 90% de confiança de que

Tabela 9. Dados comparativos entre os MDEs obtidos nas combinações B-N07PCs e N-F11PCs.
Table 9. Comparative data of MDE and the B-N07PCs and NF11PCs combinations.

Pontos	NB07			NF11		
	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)	dx (m)	dy (m)	Erro Plano (m)
13	3.125	-0.500	3.165	0.700	0.225	0.735
15	-1.975	-1.525	2.495	-3.300	-0.525	3.341
25	-2.625	-1.700	3.127	-2.125	-2.650	3.397
43	-1.350	-3.675	3.915	0.850	-1.000	1.312
59	-1.775	-0.050	1.776	-1.050	-0.675	1.248
75	0.675	2.200	2.301	-2.175	1.150	2.460
84	-1.450	-1.500	2.086	-0.150	-0.725	0.740
89	2.525	1.775	3.086	1.375	1.975	2.406
99	-3.900	-1.300	4.111	-3.675	0.575	3.720
107	4.775	2.225	5.268	6.150	-1.575	6.348
162	1.975	3.600	4.106	3.400	3.200	4.669
Média	0.000	-0.041	3.222	0.000	-0.002	2.762
Variância	7.637		1.103	8.725	2.760	3.096
Desvio-Padrão	2.764		1.050	2.954		1.760

Tabela 10. Média, desvio-padrão e variância do Erro Planimétrico para os MDEs analisados.

Table 10. Average, standard deviation and variance for the analyzed Digital Elevation Models (MDE).

Combinação	SRTM	GDEM	B-F11PCs	N-F06PCs	N-B07PCs	N-F11PCs
Média (m)	3.658	4.604	2.778	3.630	3.222	2.762
Variância (m)	3.194	3.242	1.904	1.914	1.103	3.096
Desvio-Padrão (m)	1.342	1.801	1.380	1.384	1.050	1.760

Tabela 11. Resultados do Teste de t-Student.

Table 11. Results of the t-Student Test.

	SRTM	GDEM	B-F11PCs	N-F06PCs	N-B07PCs	N-F11PCs
α_{10}	1.372	1.372	1.372	1.372	1.372	1.372
μ_0	4.213	5.349	3.348	4.202	3.656	3.489
tcalc	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372	-1.372

a média populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível de 12.5 m.

O teste do Qui-Quadrado foi aplicado para avaliar se os valores de desvio-padrão estão dentro do IC de 90%. Os parâmetros para o cálculo são o desvio-padrão (σ) e a variância (S^2), onde

$\chi^2 = 4.87$ é valor tabelado da Distribuição Qui-Quadrado para 10 graus de liberdade

Considerando os mesmos pontos de checagem, os resultados do teste estão resumidos na Tabela 12.

Aplicando-se o teste de hipótese com nível de significância de 10% e conside-

rando o valor do Erro Padrão máximo admissível de 7.5 m, de acordo com o PEC para a escala 1:25.000 Classe A, tem-se o seguinte teste de hipótese:

$$H_0: \sigma \leq 7.5 \text{ m}$$

$$H_1: \sigma > 7.5 \text{ m}$$

Como $\chi^2 \leq \chi^2_{calc}$, aceita-se a H_0 , que garante os 90% de confiança de que o desvio-padrão populacional dos erros é igual ou inferior ao erro máximo admissível.

De acordo com os testes de hipótese efetuados, pode-se afirmar que todas as ortoimagens geradas a partir dos MDEs, sejam os modelos globais SRTM

e GDEM ou aqueles extraídos a partir das combinações das visadas (Nadir, *Backward* e *Forward*), atendem a escala 1:25000 PEC Classe A.

Cabe ressaltar que, nos MDEs gerados a partir das combinações das visadas do próprio sensor, em especial a combinação B-F, os valores médios encontrados para o erro planimétrico foram inferiores aos valores médios obtidos pelo SRTM e GDEM. Já os modelos extraídos a partir do PRISM possuem erro padrão inferiores aos modelos globais. Ainda é importante observar que a resolução dos modelos globais é quase dez vezes superior ao MDE do PRISM/ALOS, mas, no caso específico desta área

Tabela 12. Resultados do Teste do Qui-quadrado.
Table 12. Results of the Chi-square Test.

	SRTM	GDEM	B-F11PCs	N-F06PCs	N-B07PCs	N-F11PCs
α_{10}	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
χ^2_0	10.87	10.87	10.87	10.87	10.87	10.87
σ	2.56	2.58	1.98	1.98	1.50	2.52
χ^2	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87

de estudo, com variação de relevo de no máximo 400 m, o SRTM produziu um bom resultado. Ao se efetuar o cálculo do efeito do deslocamento do relevo desta cena considerando-se a escala 1: 25000 PEC A, foi verificado que variações altimétricas de até 247 m podem ser consideradas planas.

Como produto final para o mosaico da imagem adquirida, foi elaborada uma carta-imagem ilustrativa (São Gabriel - MI 2981-3 ou SH-21-Z-B-III-3-SE), na escala 1:25.000 (Figura 4). Ainda para este mosaico, seria possível gerar mais duas cartas: Suspiro 2944-1-NO e Suspiro 2944-1-NE.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após os testes realizados para a quantidade de pontos de controle, níveis de processamento, tamanhos de janela de correlação e outros parâmetros e diante dos dados disponíveis e das características do relevo da área testada, é possível concluir que o Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado a partir das combinações de visadas, é compatível com os modelos globais existentes. Entre os modelos globais, comparativamente, apresentou melhores resultados para o SRTM-TOPODATA. Adicionalmente, foi possível verificar que os melhores modelos digitais foram os gerados a partir da combinação B-F com uma relação B/H=1. Além disso, o uso de níveis de processamento maiores ou diferentes dos considerados padrão pelo *software* não trouxe nenhuma melhoria para a qualidade do MDE gerado.

Em termos qualitativos, as ortomagens geradas atendem plenamente a à escala proposta nesta pesquisa de alcançar o Padrão Classe A do PEC e os parâmetros utilizados para o processamento foram os considerados “padrão” pelo *software*.

Os resultados aqui obtidos atingiram os objetivos propostos de testar a metodologia e as recomendações aplicadas pelo IBGE para as imagens do sensor PRISM nos níveis de processamento 1B2R e 1B2G, contribuindo assim para a avaliação do sensor. De acordo com os testes de hipótese efetuados, é possível afirmar que todas as ortomagens geradas a partir dos MDEs, quer sejam os modelos globais avaliados SRTM e GDEM ou aqueles extraídos a partir das combinações das visadas, atendem a escala de 1: 25.000 PEC Classe A.

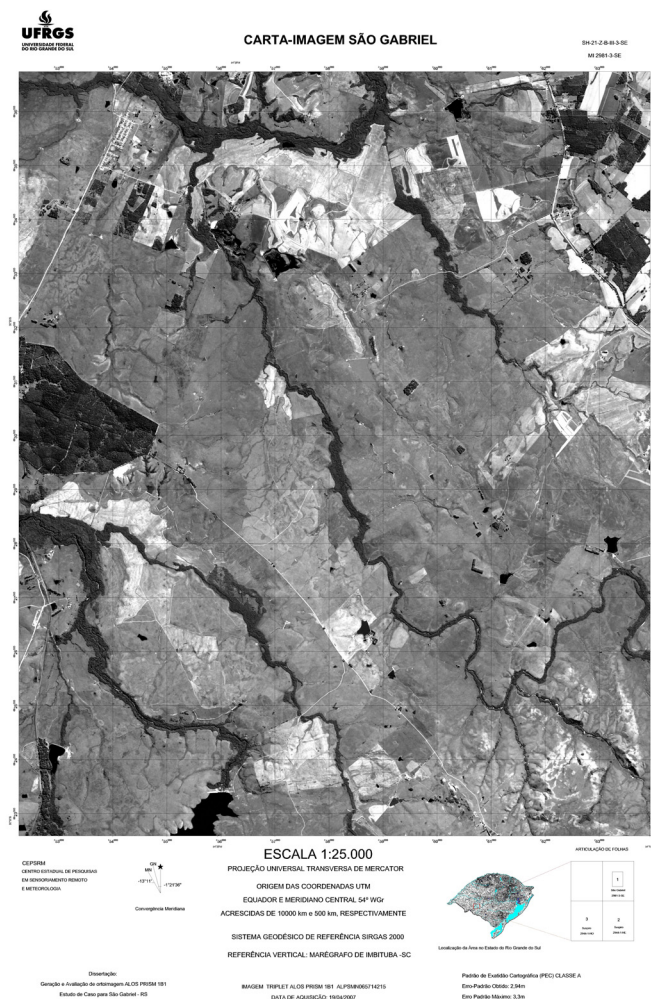


Figura 4. Carta-imagem de área estudada no município de São Gabriel, Rio Grande do Sul.
Figure 4. Chart image of the processed area in the São Gabriel municipality, State of Rio Grande do Sul, Brazil.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa de pesquisa. Ao INCRA - Superintendência Regional do Rio Grande do Sul - RS-11 pelo fornecimento dos dados de levantamento de campo. À SulSoft pela licença do *software* ENVI. Ao CEPSTRM - Centro de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia.

REFERÊNCIAS

- CANADIAN CENTRE OF REMOTE SENSING (CCRS). 2009. SAR Methods. Disponível em: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/synthetic-aperture-radar/1156>. Acesso em: 05/01/2012.
- CERQUEIRA, J.D.M.; CANDEIAS, A.L.B.; SILVA, D.C. 2006. APM Orthorectification with Satellite High Resolution Image. *Geodésia Online*, 4:1-11.
- CHENG, P.; TOUTIN, T. 2001. Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite data. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 22, Singapura, 2001. *Anais...* Singapura, p. 1203-1208.
- COSTA, F.A.L.C.; VERGARA, O.R. 2009. Geometria de aquisição de estereopares em câmeras de imageamento linear de sensores orbitais passivos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal, 2009. *Anais...* Natal, p. 1983-1991.
- DEBIASI, P. 2008. *Ortorretificação de imagens CCD CBERS-2 através da Transformação DLT*. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 71 p. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13763/000647878.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10/05/2012.
- DIAL, G.; GRODECKI, J. 2004. RPC Replacement Camera Models. In: ASPRS 2005 ANNUAL CONFERENCE, Baltimore, 2005. *Anais...* Baltimore. [CD-ROM].
- DOWMAN, I.; TAO, V. 2002. An Update on the use of Rational Function for photogrammetric restitution. *ISPRS Highlights*, 7(3):22-29.
- EL ASHMAWY, N.; ELMANADILI, Y.; BARAKAT H. 2005. Comparative analysis and evaluation of various mathematical models for stereo IKONOS satellite images. In: FIG WORKING MEET 2005 AND 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE GLOBAL SPACIAL DATA INFRASTRUCTURE, Cairo, 2005. *Anais...* Cairo, p. 30. Disponível em: http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_27/ts27_03_elashmawy_et al.pdf. Acesso em: 30/07/2012.
- ENVI. 2009. ENVI Service Pack©. Get useful information from geospatial imagery. Exelis Visual Information Solutions. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/language/en-US/ProductsServices/ENVI.aspx>. Acesso em: 19/06/2012
- EORC/JAXA. 2008. Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency. Alos Data Users Handbook. Revision C. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf. Acesso em: 12/05/2012.
- EORC/JAXA. 2009. Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency. Calibration and Validation. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/calval/calval_index.htm. Acesso em: 15/10/2009.
- FRASER, C.S.; HANLEY, H.B.; YAMAKAWA, T. 2001. Sub-metre georepositioning with IKONOS GEO Imagery. In: JOINT ISPRS WORKSHOP HIGH RESOLUTION MAPPING FROM SPACE, Hannover, 2001, *Anais...* Hannover, 8 p. [CD-ROM].
- FRASER, C.S.; DARE, P.M.; YAMAKAWA, T. 2004. Digital Surface Modelling from SPOT 5 HRS Imagery using the Affine Projective Model. In: ISPRS CONGRESS, Istanbul, 2004. *Anais...* Istanbul, 4 p. Disponível em: <http://www.isprs.org/hrs/PDF/71.pdf>. Acesso em: 12/05/2012.
- GEMAEL, C. 1994. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba, Editora da UFPR, 319 p.
- GRODECKI, J.; DIAL, G. 2001. IKONOS geometric accuracy. In: JOINT INTERNATIONAL WORKSHOP ON HIGH RESOLUTION MAPPING FROM SPACE, Hannover, 2001, *Anais...* Hannover, p. 77-86.
- HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. 2004. Understanding the rational function model: methods and applications. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Congress, 20, Istanbul, *Proceedings*, pp. 663-668.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2009. Relatório de avaliação planialtimétrica de dados ALOS/PRISM. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/alos/relatorios.php>. Acesso em: 09/07/2012.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). 2009. TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>. Acesso em: 10/06/2012.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). 2009. ALOS. Disponível em: http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html. Acesso em: 10/05/2012.
- KOCAMAN, S.; GRUEN, A. 2008. Geometric Modeling and validation of ALOS/PRISM imagery and products. In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, ISPRS CONGRESS, 27. *Proceedings*, pp. 731-738.
- KWON, Y.-H. 2008. *Direct Linear Transformation - DLT, 1998*. Disponível em <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html#3d>. Acesso em: 12/05/2012.
- MEDEIROS, N.G. 2007. *Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas*. Presidente Prudente, SP. Tese de Doutorado. UNESP, 183 p.
- METI/NASA. 2009. The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan and United States National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> e <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Acesso em: 05/05/2012.
- MITISHITA, E.; SARAIVA, C. 2002. Modelos Matemáticos para Fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução Ikonos 2 - Geo. *Série em Ciências Geodésicas, Pesquisas em Ciências Geodésicas*. Curitiba, Editora UFPR, vol. 2, p. 131-151.
- MITISHITA, E.; SARAIVA, C.; MACHADO, A. 2003. Monorestituição de imagens de satélite de alta resolução IKONOS 2 (Geo), utilizando-se da Transformação DLT e Modelo digital do Terreno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, 2003. *Anais...* Belo Horizonte, vol. 1, p. 357-364.
- PEDRO, P.C. 2005. *Ortorretificação de imagens de alta resolução IKONOS e QuickBird utilizando os modelos APM (Affine Projection Model)*. Curitiba, PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 97 p.
- PINO, L.G.M.; FIRKOWSKI, H. 2009. Avaliação de Modelos de Transformação Bidimensional para a compatibilização de bases cartográficas associadas a diversos Sistemas Geodésicos de Referência. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(2):259-276.
- SALOMONI, R. 2009. Relatório das atividades de campo efetuadas em São Gabriel - RS em 20 e 21/01/2009. Porto Alegre, INCRA - SR 11. [inédito].
- SULSOFT. 2009. Guia do ENVI em Português. Disponível em: <http://www.sulsoft.com.br/index.php/downloads/>. Acesso em: 15/05/2012.
- TAKAKU, J.; TADONO, T. 2007. PRISM geometric validation and DSM generation status. In: JOINT PI SYMPOSIUM OF ALOS DATA NODES FOR ALOS SCIENCE PROGRAM, 1, Kyoto, 2007. *Anais...* Kyoto, 4 p. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/conf/Proc_PIsymp2007/contents/proceedings/Optical_Sensors_Cal_Val/OCV07.pdf. Acesso em: 15/06/2012.
- TOMMASELLI, A.M.G.; MEDEIROS, N.G. 2010. Determination of the indirect orientation of orbital images using control straight lines. *The Photogrammetric Record*, 25(130):159-179. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00572.x>
- TOMMASELLI, A.M.G.; HASEGAWA, J.K.; GALO, M. 2000. Modernas Tecnologias de Aquisição de Imagens em Fotogrametria. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 6(1):49-64.
- TOUTIN, T. 2004. Review article: Geometric Processing of Remote Sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10):1893-1924. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000101611>
- VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. 2008. TOPODATA: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. INPE, São José dos Campos, 50 p. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>. Acesso em: 05/01/2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>

- VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. 2011. Topo-
data: Brazilian full coverage refinement of SRTM
data. *Applied Geography (Sevenoaks)*, **32**:300-309.
- WANG, I.; YANG, X.; XU, F.; LEASON, A.;
MEGENTA, S. 2008. An operational system
for Sensor Modeling and DEM generation of
satellite pushbroom sensor images. *In*: THE IN-
TERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTO-
GRAMMETRY, REMOTE SENSING AND
SPATIAL INFORMATION SCIENCES,
ISPRS CONGRESS, Pequim, 2008. *Anais...*
Pequim, **37**(B1):6 p. Disponível em: [http://
www.isprs.org/proceedings/XXXVII/con-
gress/1_pdf/128.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/128.pdf). Acesso em: 20/06/2012.
- WOLF, P.R.; DEWITT, B.A. 2000. *Elements of
Photogrammetry: with applications in GIS*. 3ª ed.,
Singapore, McGraw Hill, 608 p.

*Submitted on April 5, 2012
Accepted on January 14, 2013*