

AVALIAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DO SRTM NA ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS SPOT 4 ESTUDO DE CASO: ANGRA DOS REIS – RJ

**Rafael Silva de Barros¹
Carla Bernadete Madureira Cruz²
Rafael Balbi Reis³
Elizabeth Maria Feitosa da Rocha⁴
Leonardo Gomes Barbosa⁵**

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Depto. de Geografia e Fundação IBGE -
Coordenação de Cartografia (CCAR) – rsbarros@ibge.gov.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Depto. de Geografia - cmad@ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Depto. de Geografia - macrbr@hotmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – Depto. de Geografia – elizabethmfr@bol.com.br

⁵ Fundação IBGE - Coordenação de Cartografia (CCAR) – leogomes@ibge.gov.br

RESUMO

Imagens de satélite originalmente apresentam deformações em sua geometria que precisam ser corrigidas para que tenham confiabilidade. Os métodos mais precisos consideram a necessidade de se utilizar modelos digitais de elevação durante o processo de correção, principalmente para o caso de áreas com relevo acidentado.

Apesar dos produtos de sensoriamento remoto terem apresentado um crescimento acentuado nas últimas décadas, especialmente nos últimos 6 anos, com o lançamento de diversos novos satélites / sensores, muito recentemente tem se falado da necessidade de se aprimorar a qualidade geométrica dos mesmos.

O presente trabalho visa demonstrar que a ortorretificação de imagens – neste caso a pancromática do SPOT 4 (10 m de resolução) – pode ser realizada utilizando DEMs gerados pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sem que haja perda significativa da qualidade geométrica, se comparado com o uso do DEM gerado a partir de curvas de nível oriundas do mapeamento oficial, na escala 1:50.000. O fato dos dados do SRTM se encontrarem disponíveis gratuitamente na Internet facilita a adoção desta metodologia.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, SRTM, Ortorretificação de Imagem

ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODEL FROM SRTM ON SPOT 4 IMAGES ORTORETIFICATION STUDY AREA: ANGRA DOS REIS, RJ

ABSTRACT

Satellite Images originally present deformations in geometry that must be corrected so as to present accuracy. The methods which offer more precision need to use digital elevation models on the correction process, especially at areas where the relief is bumpy.

Although remote sensing products present an accentuated growth on last decades, especially on the last 6 years with the disponibilization of many new satellites / sensors, its really desirable to improve the geometric quality from the images.

*This work aims to demonstrate that orthorectification of images – in this case the pancromatic band of the SPOT 4 satellite – may be realized by using DEMs generated through SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) data, without losing geometric quality, if compared with the use of the DEM generated through contour lines of the official maps at 1:50.000 scale.*

Keywords: Remote Sensing, SRTM, Image Orthorectification

1. APRESENTAÇÃO

Imagens de satélite originalmente apresentam deformações em sua geometria que precisam ser corrigidas para que tenham confiabilidade. Tais imperfeições se originam na instabilidade da plataforma (espacial) onde se encontram os sensores, no movimento de rotação e na própria forma da Terra, além das características dos sensores. Genericamente, este processamento relativo à correção geométrica é chamado de georreferenciamento, embora possa ser realizado de diferentes formas, gerando resultados com características distintas. A denominação destas variações da correção geométrica apresenta algumas incongruências, porém, em todos os casos, após sua realização as imagens passam a estar referenciadas a um sistema cartográfico conhecido.

Crosta (1992) subdivide as correções geométricas em dois grupos: as baseadas no modelo de geometria orbital e as baseadas em pontos de controle no terreno. O primeiro grupo descreve aquelas que fazem uso de informações referentes à atitude do satélite (características de sua órbita no instante de aquisição da imagem), além de considerar a rotação terrestre e o fator de amostragem do sensor (Crosta, *op. cit.*). A este grupo, porém, soma-se outro tipo de correção em que há um maior detalhamento nos dados referentes ao satélite, relacionados ao exato momento da aquisição. No segundo grupo a preocupação concentra-se em se estabelecer uma relação entre pontos com coordenadas conhecidas que possam ser observados tanto na imagem como em mapas ou, na falta destes, no campo, fazendo-se uso de GPS (de maior ou menor precisão). Crosta (*op. cit.*) usa o nome registro de imagens para o processo de georreferenciamento em que são relacionados pontos na imagem que se deseja corrigir com os respectivos pontos adquiridos em outra imagem que já foi georreferenciada. Moreira (2001) denomina este último procedimento de retificação geométrica, enquanto diz que a correção baseada em pontos de controle extraídos de cartas é composta por duas etapas: uma de correção geométrica propriamente dita e outra de registro da imagem com um sistema de referência através de cartas topográficas ou de GPS. Sendo assim sua nomenclatura entra em conflito com a de Crosta (1992). INPE (2004) denomina de registro à transformação geométrica que relaciona coordenadas da imagem com coordenadas de um sistema de referência.

Schowengerdt (1997) apresenta uma denominação que reúne quatro tipos de correções geométricas, que geram produtos com maior qualidade à medida que exigem mais e melhores dados de entrada:

- **Registro:** assim como descrito em Crosta (1992), esta operação referencia uma imagem à outra, já corrigida, da mesma área.
- **Retificação:** é o referenciamento de uma imagem com um mapa. Este autor denomina este procedimento também de georreferenciamento – termo que não é tão comum na literatura, apesar de seu uso cotidiano.
- **Geocodificação:** é um caso especial de retificação que inclui um escalonamento para um pixel padrão, permitindo que a imagem se ajuste perfeitamente com outras imagens de diferentes sensores e mapas.
- **Ortorretificação:** correção da imagem, pixel-a-pixel, com relação à distorção topográfica. Com esta correção toda a imagem parece ser adquirida com visão de topo, isto é, a imagem fica em uma projeção ortográfica.

O referenciamento de pontos da imagem com pontos de controle que podem ter sido adquiridos de cartas, GPS ou de outra imagem corrigida previamente é uma etapa presente em quaisquer das correções baseadas em pontos de controle. A qualidade da correção dependerá da precisão com que estes pontos foram adquiridos, de sua distribuição sobre a imagem e da perfeita marcação dos mesmos na mesma.

A ortorretificação é dependente de um modelo para o sensor / satélite utilizado (pré-existente no software a ser adotado) e de um Modelo Digital de Elevação (DEM), sendo que este último garantirá a correção da imagem com relação à superfície topográfica. É necessário ainda que os pontos de controle sejam adquiridos com precisão, normalmente através de GPS ou DGPS (GPS Diferencial). Este último sendo o método que atinge a maior precisão no posicionamento, mesmo em áreas com relevo movimentado, que apresentam grandes deformações nas correções convencionais.

A obtenção do DEM, que em geral esteve associada à digitalização das curvas de nível e pontos cotados (oriundos, normalmente das bases cartográficas oficiais), a identificação de suas cotas, para posterior modelagem digital, pode agora, para a ortorretificação de imagens de sensores de média resolução (e algumas outras aplicações, em função da avaliação da escala), se dar a partir dos arquivos oriundos dos dados do SRTM, disponíveis na Internet gratuitamente, para toda a América Latina e grande parte do mundo.

Uma última atenção deve ser dada à estimativa da precisão da correção geométrica, que normalmente é feita através da estatística RMS (resíduo médio quadrático). Adquirindo-se pontos de controle com qualidade e posicionando-os com precisão sobre a imagem é possível a indicação de um RMS baixo, muitas vezes menor do que um pixel. Porém ao se testar a correção utilizando-se pontos

que não foram usados no processo, percebe-se que os deslocamentos são normalmente maiores do que os apresentados no RMS, principalmente nas porções da imagem com relevo acidentado.

Os produtos de sensoriamento remoto têm apresentado um crescimento acentuado nas últimas décadas, especialmente nos últimos 6 anos, com o lançamento de diversos novos satélites / sensores, destacando-se tanto os de alta resolução como a disponibilização de imagens (e produtos derivados) gratuitos, como as dos sensores ASTER e CBERS, por exemplo. As aplicações para os mesmos são as mais vastas, com destaque para o uso nas geociências (as mais antigas dentre as aplicações civis) – ver Florenzano (2002), na cartografia e na educação (Sausen, 1997). É preciso, porém, que estes usos se façam de maneira apropriada, sem que se criem falsas expectativas quanto às suas reais possibilidades – o que é típico ao se considerar novas tecnologias – ou se deixem os preconceitos adiarem os verdadeiros ganhos que possam vir a ser obtidos.

2. OBJETIVO

O presente trabalho visa demonstrar que a ortorretificação de imagens – neste caso pancromática do SPOT 4 – pode ser realizada utilizando DEMs gerados pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sem que haja perda significativa da qualidade geométrica, se comparado com o uso do DEM gerado a partir de curvas de nível oriundas do mapeamento oficial, na escala 1:50.000.

3. SR NA REPRESENTAÇÃO DO RELEVO

O uso da aerofotogrametria há muito tempo é a forma consagrada para extração da altimetria. Com a disponibilização de pares estereoscópicos da série SPOT (SPOT 1, em 1986), passou-se a contar com a possibilidade de se obter a altimetria através de seus DEMs. Segundo Toutin & Cheng (2002), os satélites da série SPOT são os mais populares para a obtenção de pares estereoscópicos e geração de DEM.

Até o SPOT 4, porém, o fato de só poderem adquirir os pares em órbitas diferentes, além de tornar mais difícil sua aquisição, em geral gerava DEMs de menor qualidade, visto que as condições atmosféricas se modificavam entre uma passagem e outra, reduzindo-se a similaridade entre as imagens.

O satélite Terra (lançado em 1999), que carrega diversos sensores a bordo, dentre eles o ASTER, o qual possui um total de 14 bandas com resoluções espaciais variando de 15 a 90 metros e oferece a possibilidade de se gerar pares estereoscópicos adquiridos na mesma órbita (*along track*), através de dois sensores idênticos, que adquirem a cena na posição Nadir e Off-Nadir, direcionado para trás (ângulos de incidência de 0° e 30.96°, respectivamente) (Engesat, 2004b). Com esta característica, observa-se a vantagem das cenas serem adquiridas ao longo da mesma órbita com intervalo de tempo curto, mantendo-se as condições atmosféricas e de iluminação semelhantes, permitindo assim um incremento na qualidade dos DEMs gerados.

O satélite Ikonos II (lançado em 1999) é de alta resolução espacial (1 a 4 metros, dependendo da banda), o que o torna alvo de interesse para diversos estudos, incluindo a obtenção de DEM automaticamente. Para a obtenção de um par estereoscópico, apesar da existência de um único sensor, duas cenas podem ser adquiridas em uma mesma órbita, gerando produtos de elevada precisão.

Com o lançamento do SPOT 5 (em 2002) as características de aquisição do par estereoscópico se modificou em virtude deste novo sistema possuir 2 sensores que adquirem as cenas com os ângulos de incidência de 20° na mesma órbita, sendo um direcionado à frente e outro para trás, o que garante a aquisição de cenas sob as mesmas condições atmosféricas e de iluminação, separadas por um intervalo da ordem de 90 segundos (ENGESAT, 2004a) como mostrado na figura 1. Como este sensor apresenta uma boa resolução espacial (variável de 2,5 a 10 metros) e seus antecessores sempre apresentaram boa qualidade geométrica, espera-se obter bons pares estereoscópicos.

O uso de imagens radar também tem mostrado um ótimo potencial para a geração de DEMs, apresentando algumas vantagens em relação aos sensores óticos, tais como: o fato de independer das condições atmosféricas para a obtenção da imagem, visto que é um sensor ativo adquirindo dados na faixa das microondas; a possibilidade de uso da técnica de interferometria ao invés da estereoscopia; a possibilidade de aquisição de dados em bandas espectrais que ultrapassem o limite da copa das árvores, chegando a atingir o solo em determinados casos (bandas X, P e L).

O Radarsat 1 tem sido usado para a geração de DEMs para diversas aplicações, como por exemplo em Toutin (1998). Os DEMs gerados pelo SRTM cada vez mais atraem usuários em função de sua disponibilização sem custos na Internet, já tendo sido alvo de vários estudos como em Heipke *et al.* (2002). Em virtude disto este produto está sendo avaliado e será mais detalhado no item seguinte.

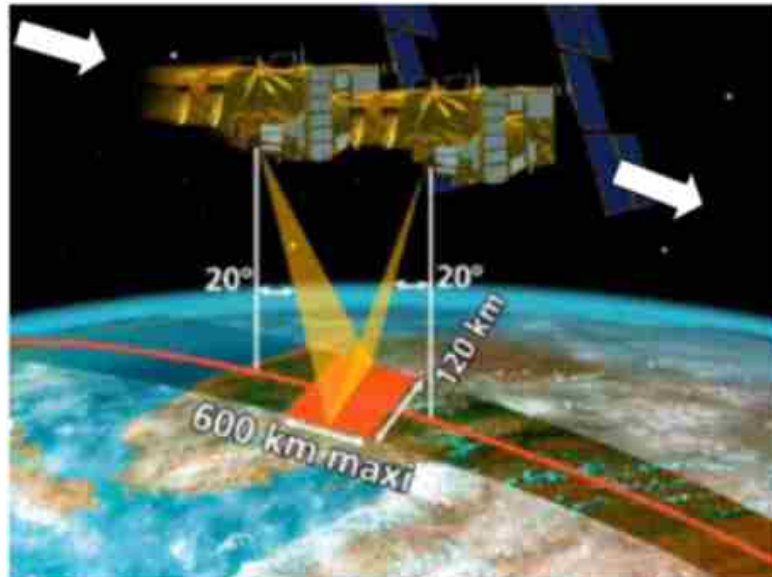


Figura 1: Aquisição das duas cenas relativas a um mesmo local, em uma única órbita
 Fonte: www.spotimage.com

4. SRTM

O SRTM não é o nome de um satélite, mas de uma missão espacial liderada pela NASA com parceria das agências espaciais da Alemanha (DLR) e Itália (ASI), realizada durante 11 dias do mês de fevereiro de 2000 visando gerar um modelo digital de elevação quase-global. Corresponde a um radar (SAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour, que adquiriu dados sobre mais de 80% da superfície terrestre, nas bandas C e X e fazendo uso da técnica de interferometria. Nesta técnica a altitude é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens radar sobre um mesmo local na Terra (CCRS, 2004). Podem ser utilizadas imagens adquiridas em datas diferentes ou em uma mesma órbita, caso haja duas antenas de recepção separadas a bordo da plataforma. Pode-se obter melhores resultados do que através de estereoscopia. O sistema SRTM contava com 2 antenas de recepção, separadas por um mastro de 60 metros (figura 2), o que possibilitou a aquisição dos dados em uma mesma órbita, garantindo a melhor qualidade dos mesmos. Os dados, adquiridos com resolução de 1 arco segundo, ou aproximadamente 30 metros, no equador, estão sendo processados, gerando-se os DEMs da área coberta. Os DEMs relativos à banda C estão sendo distribuídos pela NASA, já se encontrando disponíveis gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 metros. Há a possibilidade de se adquirir dados com resolução de 30 x 30 metros dependendo de acordos analisados individualmente pela NASA. Os dados relativos à banda X estão sendo processados e distribuídos pelo DLR – Centro Aeroespacial Alemão (JPL, 2004). Ao se iniciar a missão, esperava-se atingir precisões da ordem de 16 metros na altimetria (Duren *et al.*, 1998).

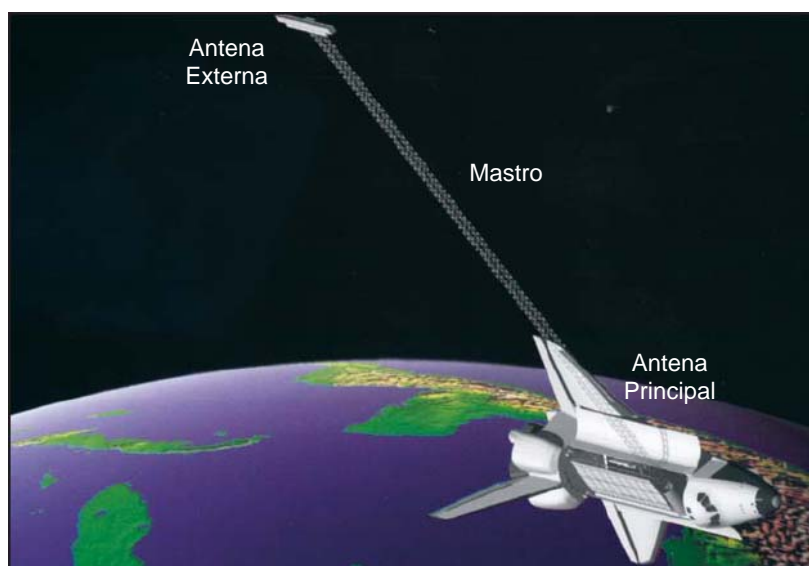


Figura 2: Esquema da aquisição de dados do SRTM – detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita
 Fonte: <http://erg.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs07103.html>

Os dados disponibilizados do SRTM podem ter uma grande aplicabilidade pois os DEMs de toda a América do Sul já se encontram disponíveis. Um ponto a seu favor – além da gratuidade para a resolução de 90 x 90 metros – é o uso da interferometria para o cálculo da altitude, que possui uma maior acurácia se comparada com a técnica da estereoscopia (CCRS, 2004). Alguns trabalhos indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do início da missão, como por exemplo em Heipke *et al.* (2002), que estimam em até 6 metros o erro vertical. Para atingir tais metas, os dados devem ser processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra ao sinal. Rao (2004) em experimentos de campo encontrou erros menores que 5 metros na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para a necessidade de validação também para deslocamentos do dado.

Os DEMs gerados estão sendo disponibilizados via ftp no seguinte endereço: ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/South_America/, em arquivos com extensão HGT compactados, cobrindo áreas de 1º por 1º no terreno, sendo as mesmas referenciadas por seu canto inferior esquerdo em coordenadas geográficas (ex: S23W043.hgt.zip). Cada arquivo tem aproximadamente uma linha e uma coluna de sobreposição com os arquivos correspondentes a áreas de sua vizinhança. O sistema de projeção utilizado é chamado cotidianamente de geográfico e o *datum* considerado, o WGS84, sendo as altitudes dadas em metro.

Apesar de todos os pontos positivos apresentados, os dados SRTM apresentam alguns problemas, tais como: valores espúrios (positivos e negativos) nas proximidades do mar e áreas onde não são encontrados valores. Estas últimas áreas recebem o valor -32768, indicando que não há dado disponível.

São diversas as possibilidades de correção desses problemas, desde substituição de tais áreas por dados oriundos de outros produtos – o GTOPO30 aparece como proposta para substituição em diversos textos – até mesmo o uso de programas que procuram diminuir tais incorreções através de edição de dados. Alguns destes programas são gratuitos e podem ser encontrados na Internet. Esta última opção foi a escolhida neste trabalho.

5. METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho, uma cena SPOT 4 foi ortoretificada de duas maneiras distintas, usando-se pontos de controle obtidos através de DGPS e com a utilização de dois DEMs com origens diferentes: um gerado a partir de curvas de nível e outro oriundo do SRTM, comparando-se as imagens finais para verificação de possíveis diferenças.

Em outubro de 2002 foi realizado um trabalho de campo de 3 dias de duração, com 3 equipes envolvidas. Foi feita uma previsão de ocupação de 20 possíveis pontos de controle, devendo-se alcançar um mínimo de 10 pontos bem distribuídos. Ao final dos trabalhos de campo, 7 pontos não haviam sido ocupados por questão de logística ou devido à precariedade de acesso. Uma das equipes ficou responsável pelo equipamento (Trimble Geodésico) posicionado no ponto base (vértice 1894 do IBGE), localizado no pátio de visitação das instalações da Eletronuclear, em Angra dos Reis. Outra equipe ficou responsável por ocupar os pontos localizados no litoral utilizando outro equipamento Magelan Promark (L1), enquanto a terceira equipe responsabilizou-se pelos pontos localizados no interior, usando um equipamento GTR topográfico (L1). O campo foi precedido de um planejamento, verificando-se a constelação GPS, determinação dos pontos a serem ocupados, o afastamento máximo da estação base, além da preparação de “extratos” das imagens indicando a exata localização dos pontos de controle, sempre escolhidos em cruzamentos de estradas, segundo características as mais favoráveis possíveis. Cada ponto foi ocupado por 20 minutos ou 1500 épocas – o que ocorresse primeiro – adquirindo pontos a cada 1 segundo. O GPS estava configurado, com o *datum* WGS84, adquirindo dados com PDOP máximo de 4. Para garantir o deslocamento das equipes, as mesmas fizeram uso de carros com tração nas 4 rodas, visto que algumas áreas são de difícil acesso. A correção dos pontos garantiu precisão sempre melhor do que 1 metro (antena topográfica).

Após a correção dos dados, foi utilizado o programa Mapgeo para verificação da ondulação geoidal nos pontos considerados, buscando-se, em seguida, converter a altitude elipsoidal em ortométrica. Assume-se um erro próximo a 3 metros (indicado no próprio Mapgeo) nesta operação. O passo final na manipulação dos pontos ocupados em campo foi gerar um arquivo com extensão txt, com a identificação dos pontos, suas coordenadas **Este e Norte** e suas altitudes ortométricas (obtida como descrito acima). Este arquivo foi lido automaticamente pelo Orthoengine/PCI (onde realizou-se a ortoretificação da imagem).

Com a base cartográfica oficial já no meio digital, foram atribuídas as cotas para as curvas de nível para sua posterior modelagem para geração do DEM com todas as curvas, mantendo-se a equidistância

de 20 metros. Como a base se encontrava com sistema de projeção UTM e *datum* SAD69, foi necessária sua conversão para o mesmo sistema de projeção com *datum* WGS84.

Para cobrir toda a área da imagem, foram adquiridos dois arquivos DEM do SRTM (S23W044 e S24W044), gerados com os dados adquiridos através da banda C, disponíveis no endereço FTP apresentado anteriormente. Como foram encontrados valores negativos (até -134) nas imediações do mar, foi utilizado o programa gratuito Blackart para conversão destes valores para zero, eliminando-se os valores negativos. Em ambos os DEMs haviam áreas sem dados, que precisaram ser interpoladas para minimizar os efeitos negativos na ortorretificação da imagem. Para isso foi utilizado o programa SRTMFill, também gratuito. Como foram usados 2 DEMs, foi preciso fazer um mosaico dos mesmos antes de reprojeta-los para o sistema UTM a fim de usá-los na correção da imagem. Esta operação foi feita no Orthoengine do PCI Geomatics (versão 9.0), usando-se a função de mosaico manual. Para serem inseridos no PCI os DEMs foram antes abertos no 3DEM que lê dados HGT e converte para Geotiff, mantendo os valores da elevação. Após o mosaico, o DEM foi reprojetoado no Focus (do PCI Geomatics) para o sistema UTM, mantendo-se o *datum* WGS84.

Estando os dados disponíveis iniciou-se a ortorretificação da cena 720-396, banda pancromática do SPOT 4, nível de processamento 1A (este nível é recomendado para a ortorretificação), de 18/06/2002, adquirida sob um ângulo de incidência R12,7 graus. Foi criado um projeto no Orthoengine, definindo-se sistema de projeção UTM, fuso 23, faixa K (-16° a -24°), *datum* WGS84. A imagem foi inserida no projeto, assim como o arquivo txt com os pontos de controle. A identificação dos pontos na imagem foi feita com o auxílio da planilha preparada para o campo, na qual constava os “extratos” e croquis feitos em campo para auxílio ao reconhecimento dos mesmos. Foram inseridos e localizados os 14 pontos disponíveis, conforme a figura 3. Procurou-se utilizar como pontos de controle 7 pontos (GCPs) bem distribuídos na imagem, ficando os demais como pontos de checagem (CPs), para validação da imagem. Ao final da seleção dos 7 pontos resultou um RMS de 4,37 metros, com resíduo máximo de 5,31 m para os GCPs e de 13,39 m para os CPs (ver em anexo o relatório dos resíduos gerado pelo sistema). O passo seguinte é a ortorretificação propriamente dita. Neste momento deve ser indicado o DEM a ser utilizado.

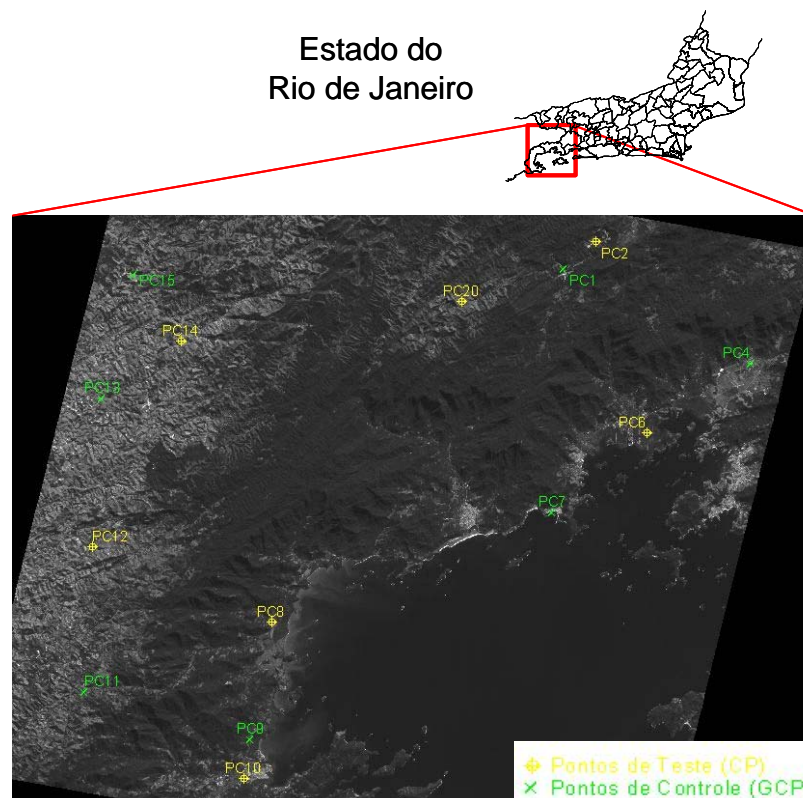


Figura 3: Localização da área de estudo e distribuição dos pontos de controle e de checagem (GCP e CP). Em amarelo os GCPs utilizados na Ortorretificação.

A primeira correção utilizou o DEM gerado pelo SRTM e já tratado a fim de minimizar suas imperfeições. Para isso o mesmo foi importado (se encontrava em Geotiff) para o Orthoengine, confirmando-se seu sistema de projeção e *datum* (UTM, fuso 24, WGS84) e definindo-se sua resolução e abrangência (optou-se por utilizar a porção do DEM equivalente aos limites da imagem). Após sua importação procede-se a ortorretificação, gerando a cena corrigida denominada Ortho_SRTM, indicando que a cena foi ortorretificada usando-se o DEM do SRTM.

Em seguida a cena original foi corrigida fazendo-se uso do DEM gerado pelas curvas de nível do mapeamento oficial. Para isso as mesmas foram importadas para o Orthoengine, sendo realizada a operação de geração do DEM no próprio sistema, mantendo-se o sistema de projeção e *datum*. Da mesma forma definiu-se sua resolução e abrangência, realizando-se em seguida a ortorretificação, criando-se a imagem Ortho_Curvas, indicando que a cena foi ortorretificada usando-se o DEM gerado a partir das curvas de nível.

Como o RMS não é um bom indicador da real acurácia da imagem final, para avaliação dos resultados alcançados os pontos de checagem foram plotados sobre cada um dos produtos finais, medindo-se seus afastamentos em relação aos locais ocupados em campo. Os resultados estão apresentados no item a seguir.

6. ESTUDO DE CASO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de aplicação está localizada nas imediações de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro. Uma das características principais da área é a grande variação do relevo, o que a qualifica como excelente candidata aos objetivos do trabalho, uma vez que tal característica apresenta uma complexidade maior para ortorretificação.

A área de estudo localiza-se nos arredores de Angra dos Reis, Rio de Janeiro (figura 3). Compreende a parte da bacia hidrográfica da Baía de Ilha Grande, compondo parcialmente a Macrorregião Ambiental 3 (Bacia da Baía da Ilha Grande). Estão incluídos nesta área municípios fluminenses e paulistas.

A área é caracterizada por relevo acidentado e com forte influência do oceano Atlântico. Sua latitude em torno de 23° S, sua proximidade da costa e as características meteorológicas de grande escala do continente sul-americano conferem à região um clima litorâneo ameno, com ventos de baixa intensidade e recebendo eventualmente a influência das massas de ar polar, porém com impactos de intensidade moderada sobre a temperatura no inverno e sobre as precipitações no verão e estações intermediárias.

Situado nesta região, o município de Angra localiza-se na unidade de relevo Planalto da Bocaina, representado por um bloco montanhoso, com altitudes em torno de 1.800m a NW e em torno de 1.000m na vertente litorânea. Nas bacias hidrográficas da área de estudo são encontrados desníveis desde poucos metros até quase 400 metros. A morfologia reflete a estrutura e a litologia, produzindo um relevo esculpido por dissecação diferencial. Ainda como domínio morfológico têm-se os depósitos sedimentares que, apesar de descontínuo, apresenta uma significativa expressão areal bordeando as áreas escarpadas. Tais domínios incluem aluviões integrados por areias, cascalhos, argilas inconsolidadas e sedimentos marinhos, constituídos por restingas, cordões litorâneos, planícies e terraços marinhos, flúvio-marinhos e fluviais, atestando as ações de processos morfogenéticos recentes e variações do nível do mar. Na porção da área de estudo contida no estado do Rio de Janeiro, predominam os seguintes solos: cambissolo, latossolo vermelho-amarelo, e neossolo, ocorrendo ainda afloramentos rochosos.

A área de estudo apresenta uma série de pequenas bacias, devendo-se destacar a bacia do rio Mambucaba que, nascendo em São Paulo e atravessando os municípios de Paraty e Angra dos Reis apresenta uma maior extensão e volume d'água, apresentando relevante importância para a comunidade que vive na sua proximidade por causa de seu iminente risco de cheias.

Em virtude de seu relevo e clima, o acesso a algumas porções da área pode ser bastante dificultado, especialmente após chuvas, exigindo-se o uso de veículos preparados para tais terrenos – normalmente carros altos, com tração nas 4 rodas.

6.2 RESULTADOS

O trabalho ainda se encontra em desenvolvimento, porém os primeiros resultados confirmam a impressão inicial de que os DEMs gerados pelo SRTM, mesmo disponibilizados com resolução degradada, apresentam-se consistentes o bastante para diversas aplicações – especialmente onde ainda não se disponha de dados em escala maior – dentre elas a ortorretificação de imagens SPOT 4 (senão de imagens diversas que permitam trabalhos até a escala 1:50.000).

A tabela 1 a seguir apresenta os GCPs utilizados (cuja distribuição é apresentada na figura 3). Nela pode-se observar a variação das altitudes dos pontos levantados no litoral em relação aos pontos do interior, em média superior a 1.000 metros. Observa-se que em geral os resíduos são baixos, não atingindo os 5,5 metros, o que é aceitável para escalas até 1:50.000. O RMS geral foi de 4,37 metros. Analisando-se conjuntamente a figura 3 vê-se, ainda, que os pontos apresentam uma boa distribuição por toda a imagem, cobrindo locais baixos e altos da área de estudo. Ressalta-se também que o cálculo do RMS é feito após a fase de identificação dos pontos de controle na imagem, porém antes da ortorretificação propriamente dita – momento em que o DEM é utilizado. Desta forma os resíduos

apresentados são válidos tanto para ortorretificação da imagem usando o DEM do SRTM quanto o gerado a partir das curvas de nível. Os demais dados referentes aos GCPs estão apresentados no anexo 1 (relatório dos resíduos, gerado pelo OrthoEngine), onde também podem ser encontrados os resíduos referentes aos CPs.

Tabela 1: Pontos de Controle (GCP), altitudes ortométricas e resíduos

GCP	Altitude (m)	RMS (m)
1	1.160,89	3,489
4	16,81	3,000
7	4,46	3,757
9	4,32	4,804
11	1.353,37	2,754
13	939,84	4,494
15	1.047,15	5,311

A tabela 2 apresenta os CPs utilizados para validação da ortorretificação. Nela verificamos os afastamentos verificados em cada ponto de checagem com relação à posição ocupada no campo, para cada uma das imagens finais. Percebe-se que na imagem em que foi utilizado o DEM proveniente do SRTM verificaram-se deslocamentos superiores, conforme o esperado, dado a menor resolução da fonte. No entanto, numa comparação direta com a imagem em que foi utilizado o DEM gerado a partir das curvas de nível, as diferenças não são muito grandes: a maior delas foi de 6,5 metros, no CP número 8, com média de 2,9 metros de diferença entre os dois produtos finais.

Tabela 2: Pontos de Checagem, altitudes ortométricas, deslocamentos dos CPs em relação aos locais ocupados em campo, nas imagens ortorretificadas com os DEMs gerados a partir das curvas de nível e a partir do SRTM e a diferença entre os dois afastamentos.

CP	Altitude (m)	Curvas (m)	SRTM (m)	Diferença (m)
2	1.195,363	20,6	20,7	0,1
6	3,639	5,4	4,0	-1,4
8	5,956	5,0	11,5	6,5
10	4,700	0,5	5,2	4,7
12	1.025,787	4,3	7,0	2,7
14	1.070,884	18,6	19,2	0,6
20	1.100,073	16,0	20,5	4,5
Médias		10,1	12,6	2,9

Nota-se que apesar dos maiores afastamentos em relação aos pontos ocupados em campo (tanto na imagem corrigida com uso do DEM do SRTM quanto na que foi usado o DEM gerado a partir das curvas de nível) ocorrerem nos CPs localizados nos locais mais altos (altitudes acima de 1.000 metros), as maiores diferenças foram verificadas nos pontos mais baixos. As figuras 5a / 5b / 5c e 6a / 6b / 6c apresentam a localização do ponto ocupado em campo e a sua localização sobre as imagens ortorretificadas utilizando-se o DEM do SRTM e o DEM originado das curvas de nível, em dois níveis de zoom diferentes. As primeiras figuras referem-se ao ponto 10, localizado numa área de baixa altitude, enquanto as últimas figuras apresentam o ponto 20, localizado numa altitude de aproximadamente 1.100 metros.

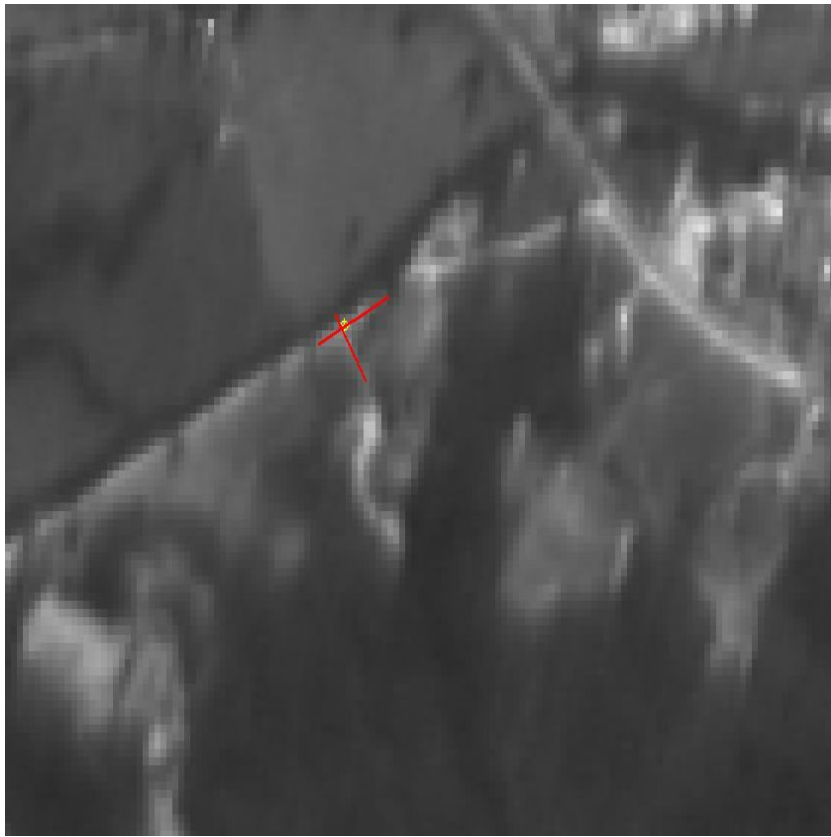


Figura 5a: Localização do Ponto de Checagem (CP 10) sobre a imagem ortorretificada

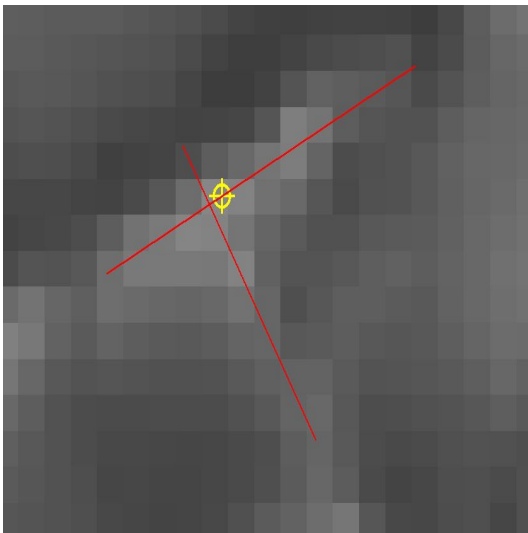


Figura 5b: Detalhe do afastamento entre o ponto ocupado em campo (CP10: cruzamento das linhas vermelhas) e seu posicionamento (símbolo amarelo) sobre a imagem ortorretificada com uso do DEM do SRTM

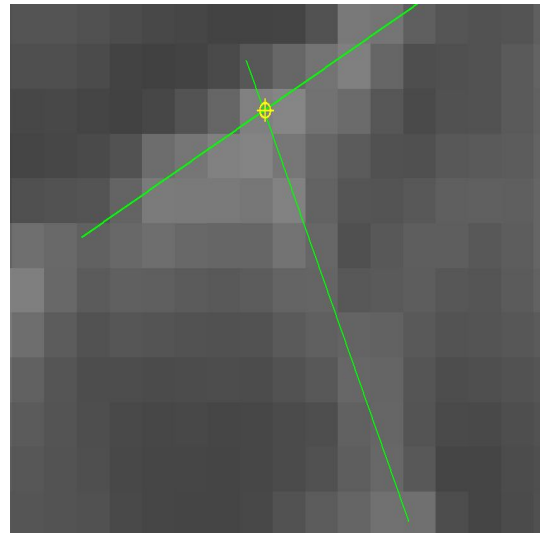


Figura 5c: Detalhe do afastamento entre o ponto ocupado em campo (CP10: cruzamento das linhas verdes) e seu posicionamento (símbolo amarelo) sobre a imagem ortorretificada com uso do DEM gerado através das curvas de nível



Figura 6a: Localização do Ponto de Checagem (CP 20) sobre a imagem ortorretificada

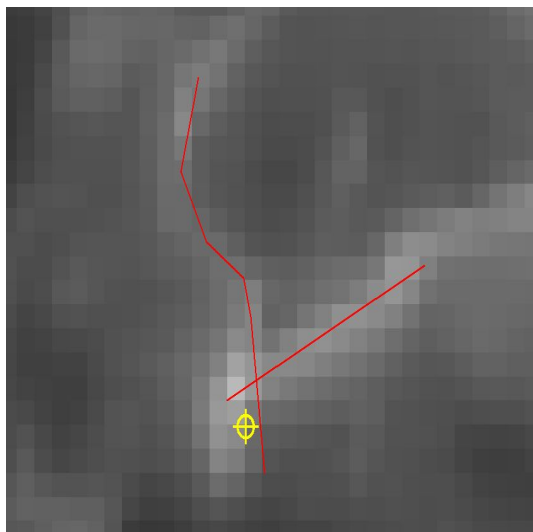


Figura 6b: Detalhe do afastamento entre o ponto ocupado em campo (CP20: cruzamento das linhas vermelhas) e seu posicionamento (símbolo amarelo) sobre a imagem ortorretificada com uso do DEM do SRTM

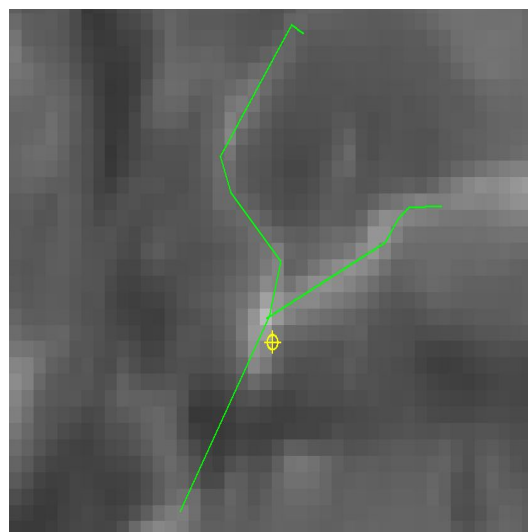


Figura 6c: Detalhe do afastamento entre o ponto ocupado em campo (CP20: cruzamento das linhas verdes) e seu posicionamento (símbolo amarelo) sobre a imagem ortorretificada com uso do DEM gerado através das curvas de nível

Ao confrontar o DEM do SRTM com as altitudes dos pontos ocupados em campo verificou-se que as diferenças não seguiram um padrão relacionado às áreas altas ou baixas, atingindo valores entre 0,54 e 13,09 metros, com 4,80 metros de média, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Altitudes verificadas em campo e obtidas através do DEM do SRTM

GCP	Altitudes (m)		Diferenças (m)	
	Campo ¹	SRTM	SRTM – Campo	Módulo
1	1.160,89	1163,00	2,11	2,11
2	1.195,363	1.205,10	9,74	9,74
4	16,81	29,90	13,09	13,09
6	3,639	5,1	1,46	1,46
7	4,46	3,30	-1,16	1,16
8	5,956	6,5	0,54	0,54
9	4,32	5,3	0,98	0,98
10	4,700	13,7	9,00	9,00
11	1.353,37	1363,0	9,63	9,63
12	1.025,787	1.022,1	-3,69	3,69
13	939,84	940,9	1,06	1,06
14	1.070,884	1.063,60	-7,28	7,28
15	1.047,15	1043,3	-3,85	3,85
20	1.100,073	1.096,50	-3,57	3,57
Mínimo	3,64	3,30	-7,28	0,54
Máximo	1.353,37	1.363,00	13,09	13,09
Média			2,00	4,80
Baixos ²			3,99	4,37
Altos ³			0,52	5,12

¹ Altitudes medidas em campo com GPS, corrigidas com uso de ondulação geoidal (Mapgeo).

² Média das diferenças de altitudes dos pontos localizados em áreas baixas.

³ Média das diferenças de altitudes dos pontos localizados em áreas altas.

Da mesma forma como foram verificadas diferenças de altitude entre os pontos medidos em campo e no DEM do SRTM, observou-se também diferenças entre os valores de elevação do DEM do SRTM e as curvas de nível em diversos pontos. Conclui-se desta forma que o mesmo não poderia ser utilizado em substituição à altimetria extraída de cartas topográficas na escala 1:50.000 em quaisquer aplicações. A forma deste DEM, contudo resguarda boa semelhança com a forma do relevo indicado pela visualização das curvas de nível, como pode ser observado na figura 7, onde vê-se a localização do divisor de águas indicado pelo DEM no mesmo local sugerido pelas curvas de nível.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos pode-se afirmar que o uso do DEM gerado pelo SRTM (banda C) não influenciou significativamente a ortorretificação da imagem considerada. As diferenças verificadas entre as duas imagens ortorretificadas (com DEM do SRTM e com o DEM das curvas de nível) apresentaram-se pequenas: sempre menores do que 6,5 metros, com média de 2,9 metros entre os 7 pontos avaliados.

Ressalta-se, contudo, que o uso dos dados do SRTM não devem ser feito indiscriminadamente, pois apresenta imperfeições que não os qualificam para trabalhos que exijam maior rigor na altimetria. Sendo assim, os mesmos não permitem que se substitua o uso das curvas de nível presentes nas cartas topográficas. Lembra-se ainda que nas comparações sempre foram utilizadas curvas extraídas das cartas topográficas na escala 1:50.000.

Uma das vantagens do uso do SRTM refere-se ao tempo necessário para geração do DEM. Tal tarefa normalmente consome um grande intervalo de tempo visto que em poucos casos dispõe-se de uma base digital, já em 3D. Além disso não se pode desconsiderar o fato de determinado usuário não dispor nem da base analógica.

Em função do crescimento do uso dos produtos do sensoriamento remoto aliado à busca por maiores precisões, a ortorretificação de imagens pode se tornar um procedimento mais comumente utilizado. Neste sentido o uso do DEM do SRTM pode ajudar a disseminar tal procedimento uma vez que suprime a dificuldade representada pela geração do DEM, pelo menos com relação a sensores de média resolução. Por enquanto a ortorretificação de imagens ainda se encontra limitada em virtude da existência de poucos (e caros) softwares que executam tal procedimento. À medida que esta operação se tornar disponível em um maior número de sistemas (quem sabe os softwares livres / free não solucionem esta questão, pelo menos para os sensores mais utilizados) tal limitação também será reduzida.

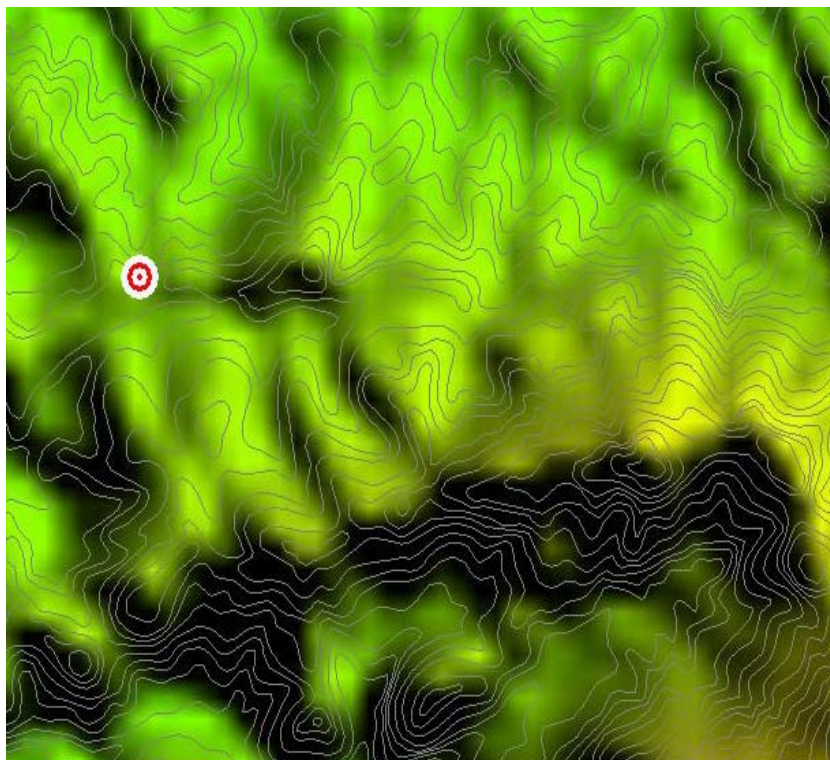


Figura 7: DEM do SRTM com curvas de nível sobrepostas apresentando uma coerência nas formas do relevo. Está plotado ainda o CP 12 sobre o DEM.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CCRS** (2004). Canada Centre for Remote Sensing. Site: www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs. Acesso: 05/01/2004.
- CROSTA**, A. P. (1992). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas - SP. 170p.
- DUREN**, R.; **WWONG**, E.; **BRECKENRIDGE**, B; **SHAFFER**, S; **DUNCAN**, C.; **TUBBS**, E.; **SALOMON**, P. (1998). Metrology, attitude and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. AeroSense Conference on Acquisition, Tracking and Pointing. XII.
- ENGESAT** (2004a). Ficha Técnica Resumida - SPOT 5. Site: <http://www.engesat.com.br/satelites/spot5.html>. Acesso: 12/02/2004.
- ENGESAT** (2004b). Ficha Técnica Resumida - Aster. Site: <http://www.engesat.com.br/satelites/spot5.html>. Acesso: 12/02/2004.
- FLORENZANO**, T. G. (2002). Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. Oficina de textos. São Paulo.
- HEIPKE**, C.; **KOCH**, A.; **LOHNANN**, P. (2002). Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results. ISPRS Commission – IV Symposium. Ottawa.
- INPE** (2004). Manual on-line do SPRING. Site: <http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/intro.htm>. Acesso: 07/01/2004.
- JPL** (2004). Jet Propulsion Laboratory – Shuttle Radar Topography Mission. Site: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataproduct.htm>. Acesso: 12/02/2004.
- MOREIRA**, M. A. (2001). Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. São José dos Campos – SP – INPE.
- RAO**, K. S. (2004). Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements. Site: www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm. Acesso: 28/02/2004.
- SAUSEN**, T. M. (1997). Cadernos Didáticos para Ensino de Sensoriamento Remoto. SELPER capítulo Brasil e INPE.
- SCHOWENGERDT**, R. A. (1997). Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing. Second Edition. Academic Press.
- TOUTIN**, T. (1998). Stereo Radarsat for Mapping Applications. 2nd International ADRO Symposium. Montreal, Canada.
- TOUTIN**, T.; **CHENG**, P. (2002). Comparison of Automated Digital Elevation Model Extraction Results Using Along-Track ASTER and Across-Track SPOT Stereo Images. SPIE Journal, Optical Engineering, 41 (9), p. 2102-2106.

Anexo 1: Relatório dos Resíduos da Ortoretificação

Residual Units: Ground Units

Residual Info for 1 Images

GCPs: 7 X RMS 3.52 Y RMS 2.58

Check Points: 6 X RMS 6.32 Y RMS 7.99

Tie Points: 0 X RMS Y RMS

Listing: GCPs only All Images

ID	Res	Res X	Res Y	Photo ID	Ground X	Ground Y	Ground Z	Comp X	Comp Y
PC20	13.394	-5.795	12.075	A_Orig	546.900.626	7.474.368.960	1100.07	546894.83	7474381.04
PC14	10.697	-8.240	-6.820	A_Orig	521.537.419	7.470.786.762	1070.88	521529.18	7470779.94
PC2	9.021	-8.441	3.184	A_Orig	559.025.661	7.479.816.313	1195.36	559017.22	7479819.50
PC8	8.385	-1.181	-8.301	A_Orig	529.734.028	7.445.439.217	5.96	529732.85	7445430.92
PC12	6.859	-0.331	-6.851	A_Orig	513.575.490	7.452.252.947	1025.79	513575.16	7452246.10
PC15	5.311	-5.109	-1.450	GCP A_Orig	517.300.165	7.476.870.109	1047.15	517295.06	7476868.66
PC6	5.085	-5.019	0.815	A_Orig	563.619.160	7.462.594.525	3.64	563614.14	7462595.34
PC9	4.804	-3.579	3.205	GCP A_Orig	527.862.885	7.434.948.199	4.32	527859.31	7434951.40
PC13	4.494	4.254	1.448	GCP A_Orig	514.435.005	7.465.683.466	939.84	514439.26	7465684.91
PC7	3.757	3.689	-0.712	GCP A_Orig	555.129.979	7.455.376.663	4.46	555133.67	7455375.95
PC1	3.489	3.689	3.391	GCP A_Orig	556.169.525	7.477.339.786	1160.89	556168.70	7477343.18
PC4	3.000	-1.783	-2.413	GCP A_Orig	573.016.247	7.468.822.168	16.81	573014.46	7468819.76
PC11	2.754	-0.255	-2.742	GCP A_Orig	512.882.642	7.439.200.961	1353.37	512882.39	7439198.22