

# MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO COM IMAGENS ESTEREOSCÓPICAS DIGITAIS DO SENSOR ASTER/TERRA

Flávio Fortes CAMARGO <sup>1</sup>, Teresa Gallotti FLORENZANO <sup>1</sup>,  
Cláudia Maria de ALMEIDA <sup>1</sup>, Cleber Gonzales de OLIVEIRA <sup>2</sup>

(1) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR.  
Avenida dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja. Caixa Postal 515. CEP 12227-010. São José dos Campos, SP.  
Endereços eletrônicos: fortes@dsr.inpe.br; teresa@dsr.inpe.br; almeida@dsr.inpe.br  
(2) Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.  
Avenida dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja. Caixa Postal 515. CEP 12227-010.  
São José dos Campos, SP. Endereço eletrônico: cleber@dsr.inpe.br

Introdução  
Área de Estudo  
Material  
Pré-Processamento dos Dados  
Definição da Legenda e Interpretação Visual  
Resultados e Discussão  
Qualidade dos Dados de Sensoriamento Remoto  
Mapa Geomorfológico  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – Neste artigo avaliaram-se as potencialidades e as limitações das imagens estereoscópicas do sistema sensor ASTER/Terra no mapeamento geomorfológico do município de São José dos Campos - SP. Com este intuito, os autores utilizaram: i) uma abordagem fotogramétrica para o tratamento geométrico e orientação do par estereoscópico de imagens; ii) estereo-correlação e cálculo automático de paralaxes, visando à extração automática de um modelo digital de elevação que forneceu as informações geomorfológicas; iii) métodos estatísticos na análise da acurácia posicional dos dados de sensoriamento remoto e iv) interpretação visual para o mapeamento de unidades geomorfológicas em ambiente digital. O mapa geomorfológico compreendeu 14 classes, e por meio da análise estatística, foi possível concluir que o par estereoscópico é adequado para mapeamento geomorfológico na escala de 1:50.000, e também, que o modelo digital de elevação possui acurácia altimétrica compatível com a escala 1:100.000.

**Palavras-chave:** morfografia, morfometria, ASTER/Terra, modelo digital de elevação.

**ABSTRACT** – *F.F. Camargo, T.G. Florenzano, C.M. de Almeida, C.G. de Oliveira - Geomorphological mapping using ASTER/Terra stereoscopic images.* This article evaluated the potential and drawbacks of using ASTER/Terra stereoscopic images for geomorphological mapping of the São José dos Campos municipality, São Paulo State, Brazil. For this purpose, the authors employed: i) a photogrammetric approach for geometric corrections and orientation of stereoscopic images; ii) stereo-correlation and automatic calculation of parallaxes, aiming to automatically extract a digital elevation model, meant to provide geomorphometric information; iii) statistical methods for a positional accuracy analysis of remote sensing data, and iv) visual interpretation for mapping geomorphological units in a digital environment. The geomorphological map comprised 14 classes. By means of statistical tests, the stereoscopic pair was judged to be suitable for geomorphological mapping at a 1:50,000 scale, and the elevation accuracy of the digital elevation model was found to be appropriate for cartographic products at a 1:100,000 scale.

**Keywords:** morphography, morphometry, ASTER/Terra, digital elevation model.

## INTRODUÇÃO

Mapas geomorfológicos são imprescindíveis em estudos e atividades de intervenção no meio físico. Esses mapas fornecem informações relevantes às pesquisas geomorfológicas e são úteis em atividades aplicadas, tais como inventários de recursos naturais, prevenção de desastres e planejamento urbano e rural.

O Sensoriamento Remoto é uma das principais fontes de dados para as atividades de mapeamento

geomorfológico. Desde as suas origens, as fotografias aéreas têm sido amplamente utilizadas em procedimentos monoscópicos e estereoscópicos de interpretação visual (Verstappen & Zuidam, 1991; Smith et al., 2006). Atualmente, uma ampla gama de novos sensores, aerotransportados e orbitais, adquire dados (monoscópicos e estereoscópicos) de variadas resoluções espaciais nas faixas espectrais do visível, do infravermelho e de

microondas. Aliado a isso, o emprego de métodos fotogramétricos (Giles & Franklin, 1998) e radargramétricos (Toutin & Gray, 2000) possibilita a geração de pares estereoscópicos e a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Cabe destacar também os avanços na interferometria e no imageamento a laser, que têm propiciado MDEs detalhados, igualmente úteis na caracterização e mapeamento do relevo (Toutin & Gray, 2000; Lohani & Mason, 2001).

Com relação ao emprego de pares estereoscópicos de imagens ópticas orbitais, o sistema sensor ASTER/Terra merece destaque. Esse sistema sensor cobre a região espectral do visível ao infravermelho termal através de 14 bandas, distribuídas entre os subsistemas VNIR (*Visible and Near-InfraRed*), SWIR (*Short Wave InfraRed*) e TIR (*Thermal InfraRed*). Os pares estereoscópicos são formados pelas imagens das bandas 3N (visada nadiral) e 3B (retro-visada), as quais têm 15 m de resolução espacial nominal e são geradas pelo subsistema VNIR (Abrams et al., 1999). Em órbita desde dezembro de

1999, o sistema sensor ASTER/Terra gerou um vasto acervo global de imagens. Esses dados têm um grande potencial de aplicação em estudos geomorfológicos, devido à sua qualidade geométrica e por possibilitar a integração da visão estereoscópica com dados altimétricos (MDE) e multiespectrais.

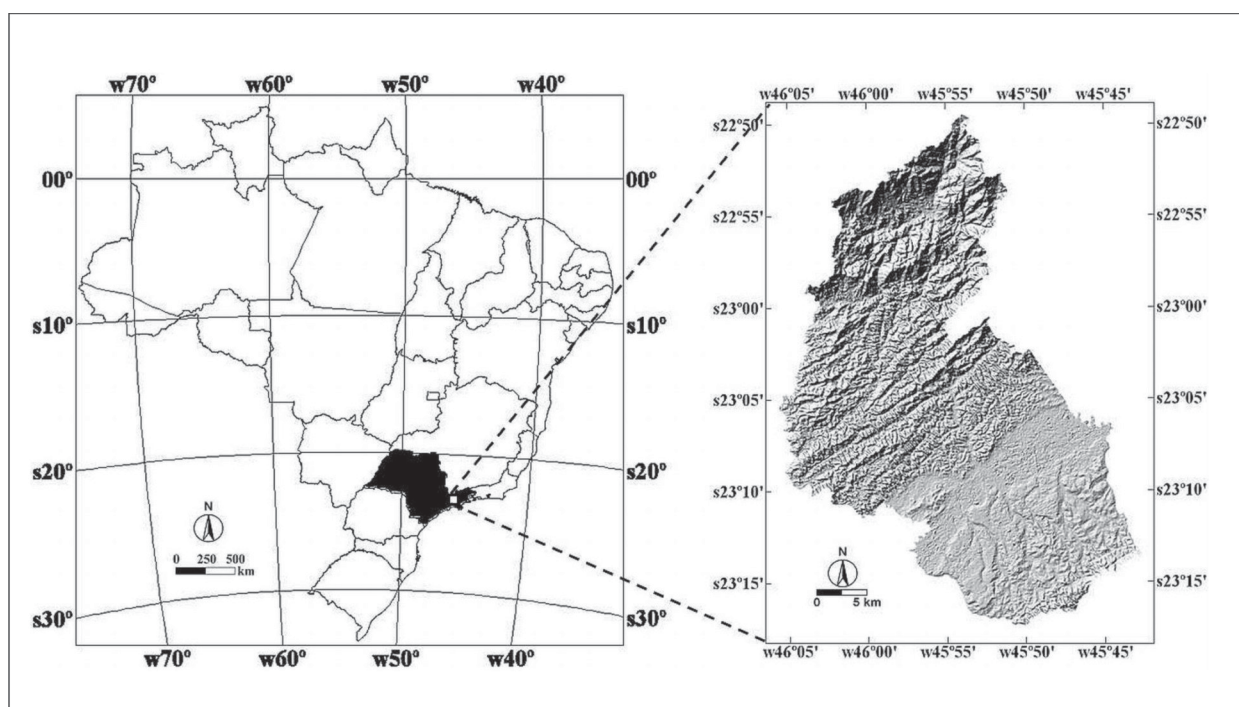
Nesse contexto, o objetivo deste artigo é explorar as potencialidades e limitações das imagens estereoscópicas do sistema sensor ASTER/Terra no mapeamento geomorfológico, utilizando como área de estudo o município de São José dos Campos - SP. Para tal propósito, foi utilizado um modelo matemático fotogramétrico para o tratamento geométrico e orientação do par estereoscópico de imagens; estereocorrelação e cálculo automático de paralaxes, visando à extração automática de um modelo digital de elevação que forneceu as informações geomorfométricas do mapa gerado; métodos estatísticos na análise da acurácia posicional dos dados de sensoriamento remoto; e, por fim, interpretação visual para o mapeamento das unidades em ambiente digital.

## ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, com 1.098,6 km<sup>2</sup>, corresponde ao município de São José dos Campos - SP, localizado no médio vale do rio Paraíba do Sul (Figura 1). Esse município foi selecionado para análise devido à sua diversidade geomorfológica, existência de estudos

anteriores e facilidade de acesso para trabalhos de campo.

O médio vale do rio Paraíba do Sul está inserido em um sistema montanhoso constituído das Serras do Mar e da Mantiqueira. Esse sistema é a mais destacada



**FIGURA 1.** Localização da área de estudo: estado de São Paulo destacado em preto, à esquerda, e relevo sombreado do município de São José dos Campos - SP, à direita.

feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano, e sua história evolutiva data do Pré-Cambriano (Almeida & Carneiro, 1998). Destacam-se, em ordem cronológica, três grandes conjuntos de eventos responsáveis pela sua morfografia: (i) sucessivas interações entre placas continentais (no Proterozóico), que formaram faixas móveis acrescionárias, colisionais e transpressionais (Almeida & Carneiro, 1998); (ii) geração da superfície de aplainamento Japi (entre o Cretáceo Superior e o Terciário Inferior) por meio da erosão de corpos rochosos (ígneos e metamórficos, principalmente) (Almeida, 2000); e (iii) tafrogênese (início no Paleógeno), sedimentação e preenchimento de hemigrabens (Almeida, 2000).

Esses processos definiram as características litológicas e geomorfológicas da área de estudo. Com relação à litologia, esta é composta de rochas cristalinas (ígneas e metamórficas) dos complexos: (i) Amparo, (ii) Embu, (iii) Paraíba do Sul e (iv) Paraísopolis. Ocorrem também rochas sedimentares da formação Taubaté (Terciário Superior) e depósitos quaternários (aluviões). Nos complexos citados, predominam gnaisses (datados do Arqueano ao Proterozóico

Médio) e suítes graníticas sin e pós-tectônicas (Proterozóico Superior), ambos ocasionados pelas movimentações crustais da orogênese Brasileira (Pré-Cambriano) (DNPM, 1983).

Nas rochas cristalinas, a geomorfologia da área de estudo é caracterizada por morrotes, morros e montanhas (Florenzano & Csordas, 1993). De acordo com Almeida & Carneiro (1998), planaltos e escarpas são sustentados por rochas mais resistentes, enquanto lineamentos rochosos e a rede de drenagem são condicionados por falhas, fraturas e zonas de cisalhamento. Em terrenos sedimentares, ocorrem planícies aluviais (Florenzano & Csordas, 1993), terraços (Verdade & Hungria, 1966) e colinas terciárias (Florenzano & Csordas, 1993). Cabe destacar a ocorrência de diversos padrões de alvéolos ou planícies aluviais intermontanas de pequeno porte. Verdade & Hungria (1966) verificaram a existência de dois níveis de terraços fluviais na margem direita (sudoeste) do rio Paraíba do Sul. Isso ocorre devido à tendência do rio em se deslocar no sentido noroeste (Verdade & Hungria, 1966), ocasionada pela inclinação nortenoeste do hemigraben (Almeida, 2000).

## MATERIAL E MÉTODO

No desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o seguinte material: (i) imagens estereoscópicas ASTER/Terra do subsistema *Visible Near-InfraRed* (VNIR) (bandas 3N e 3B; entre 0,78 e 0,86  $\mu\text{m}$ ); (ii) arquivo vetorial de eixo de logradouros; (iii) arquivos vetoriais de curvas de nível; (iv) arquivos de pontos cotados, (v) arquivo vetorial com a delimitação das unidades geotécnicas; (vi) arquivos com coordenadas (E, N e H) de 109 pontos obtidos a partir de levantamento de campo realizado com equipamentos GPS (Global Positioning System) geodésicos de uma frequência; e (vii) equipamentos Zscreen 2000 para visualização estereoscópica.

As imagens ASTER/Terra, de 31/08/2004, foram adquiridas no nível de processamento LIB. Os produtos deste nível de processamento consistem em imagens corrigidas por meio de coeficientes radiométricos e geométricos, além de co-registradas com as demais bandas do sistema sensor ASTER/Terra. Os coeficientes radiométricos representam os ganhos e *offsets* que devem ser aplicados para a calibração dos 5.000 detectores CCD (*charge-coupled device*). Por sua vez, os coeficientes geométricos projetam a imagem para o sistema UTM e as orientam no sentido da órbita da plataforma. Cabe destacar que as imagens utilizadas neste trabalho apresentam uma resolução espacial nominal de 15 m e uma razão base/altura da plataforma de 0,6 (Abrams et al., 1999).

O arquivo vetorial com as unidades geotécnicas encontra-se na escala 1:50.000, e os demais arquivos vetoriais, na escala 1:10.000. Todos eles compõem o banco de dados geográficos “Cidade Viva”, disponível gratuitamente na Prefeitura Municipal de São José dos Campos - SP (PMSJC), e cobrem a área deste município. As coordenadas GPS foram obtidas junto aos seguintes órgãos: Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE). Esses órgãos realizaram a conversão das altitudes geométricas em altitudes ortométricas. Os equipamentos ZScreen 2000 foram cedidos pelo INPE. Com relação aos aplicativos, foram empregados o programa PCI Geomatica 10.0.3, para processamento de imagens, e o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 9.2, para tratamento dos dados espaciais.

### PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

O pré-processamento dos dados foi constituído da orientação do par estereoscópico de imagens ASTER/Terra e da extração automática do MDE, por meio das imagens mencionadas. O par estereoscópico foi utilizado na interpretação visual, e o MDE, por sua vez, foi empregado na extração das informações geomorfológicas do mapa geomorfológico.

Adicionalmente, a acurácia planimétrica do par

estereoscópico e a altimétrica do MDE foram avaliadas por meio do método da análise da exatidão (Galo & Camargo, 1994), que utilizou como referência os critérios estabelecidos pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional: classes de exatidão por escala, Erro Padrão (EP) e Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). O EP consiste no desvio-padrão de referência. O PEC, o qual define a exatidão de produtos cartográficos, corresponde a um indicador estatístico de dispersão a 90% de probabilidade, obtido a partir do EP (Brasil, 1984).

Para a orientação do par estereoscópico, foi utilizado o aplicativo PCI Geomatica 10.0.3 (módulo OrthoEngine), com o qual se realizaram os seguintes procedimentos: 1) coleta de pontos de controle (PCs) e pontos de enlace (PEs); 2) estimação dos parâmetros do modelo matemático e 3) geração de imagens com geometria epipolar. Essas imagens apresentam uma orientação comum, e apenas as paralaxes no eixo X (que representam 98% do total de paralaxes) são mantidas (Toutin, 2001). Nos passos 1 e 2, utilizaram-se os dados de efemérides e atitude do sistema sensor ASTER/Terra (disponíveis nos metadados das imagens), o modelo matemático *Toutin*, 43 PCs 3D e 90 PEs 2D. Na seqüência, para a extração automática do MDE, realizou-se: 4) o cálculo das paralaxes por estéreo-correlação, e 5) a geração e a geocodificação do MDE.

O modelo matemático utilizado baseia-se nas condições e equações de colinearidade (para imagens individuais) e coplanaridade (para imagens estereoscópicas), e, portanto, baseia-se no modelo fotogramétrico rigoroso (Toutin, 2004a; 2006). Sabendo-se que os parâmetros necessários para as correções individuais (sensor/plataforma; rotação da terra e projeção cartográfica) são correlacionados, o modelo *Toutin* reduz esses parâmetros a um conjunto descorrelacionado, a partir dos quais realiza, simultaneamente, todas as correções mencionadas (Toutin, 2004a). A acurácia posicional do modelo pode ser melhorada com o uso de PCs, empregados em um procedimento iterativo de refinamento pelo método dos mínimos quadrados (Toutin, 2002; 2004a; 2004b; 2006).

As coordenadas planialtimétricas dos PCs foram obtidas por meio da base de eixo de logradouros (coordenadas E e N) e de um MDE (coordenada H) auxiliar, gerado a partir das curvas de nível e pontos cotados (mencionados na Seção 2.2). Com relação aos PEs, Toutin (2002; 2004a; 2004b; 2006) os define como pontos homólogos, coletados simultaneamente entre as imagens do par estereoscópico, os quais fornecem maior rigidez ao modelo.

O cálculo das paralaxes foi realizado por meio de janelas de busca e correlação, que localizam

*pixels* homólogos entre as imagens (Ehlers & Welch, 1987). A medida de correlação empregada pelo algoritmo utilizado pelo módulo OrthoEngine é o coeficiente normalizado de correlação cruzada (PCI Geomatics, 2006).

A acurácia planimétrica do par estereoscópico de imagens epipolares foi avaliada por meio de 24 pontos obtidos na base de eixo de logradouros. Cabe destacar que esses pontos são distintos dos que foram empregados no modelo *Toutin*, e portanto, independentes daqueles. Desse modo, foram obtidas as discrepâncias nas componentes E e N entre os pontos identificados no par estereoscópico e seus correspondentes na base de eixo de logradouros. Com base nessas componentes, foram obtidos os valores de discrepância na resultante. Para a validação da altimetria do MDE, utilizaram-se os 109 pontos obtidos em campo com equipamentos GPS e, posteriormente, foram obtidas as discrepâncias entre o MDE e as altitudes desses pontos. Esses dados (pontos para validação, imagens e MDE) estavam referenciados ao mesmo *datum* horizontal (SAD69/Brasil) e sistema de projeção (UTM).

Com relação à acurácia posicional da base de eixo de logradouros, esta se enquadra na classe A, escala 1:10.000 do PEC (Camargo et al., 2007). De acordo com Merchant (1982), dados de referência devem apresentar erro posicional igual ou inferior a um terço do erro padrão da escala avaliada. Desse modo, a base de eixo de logradouros (com erro máximo de 2,1 m) e os pontos GPS foram adotados como dados suficientemente acurados para os procedimentos de validação empregados neste trabalho.

Posteriormente, as discrepâncias obtidas foram utilizadas na análise de exatidão, a qual é composta dos testes de tendência (“*t*” de *Student*) e de precisão (Qui-quadrado -  $\chi^2$ ) (Galo & Camargo, 1994). Ambos os testes se apóiam nos valores de discrepâncias ( $\Delta$ ) entre as coordenadas dos produtos gerados e as coordenadas de referência (base cartográfica e/ou pontos GPS).

Com base na estatística amostral “*t*” e no seu respectivo intervalo de confiança, o teste de tendência permite verificar se a média das discrepâncias é igual a zero ( $H_0: \Delta \bar{X} = 0$  ou  $H_1: \Delta \bar{X} \neq 0$ ) e, desse modo, indica a ocorrência ou não de deslocamentos sistemáticos. Por outro lado, apoiado na estatística amostral  $\chi^2$  e no seu respectivo intervalo de confiança, o teste de precisão aponta se as variâncias amostral e a obtida a partir do erro padrão são iguais ou não ( $H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2$  ou  $H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$ ). Esse teste indica o grau de dispersão dos erros e, por conseguinte, a precisão (Galo & Camargo, 1994).

A etapa de pré-processamento foi encerrada com a extração da declividade por meio do MDE obtido. A

declividade, uma das componentes do vetor obtido da primeira derivação da superfície (MDE) e que caracteriza a inclinação da vertente, forneceu informações geomorfométricas das classes mapeadas.

### DEFINIÇÃO DA LEGENDA E INTERPRETAÇÃO VISUAL

Realizou-se um inventário das principais fontes bibliográficas sobre a geomorfologia da área de estudo. Quanto aos documentos cartográficos, foram consultados dois mapas geomorfológicos de escala regional (IPT, 1981; Ross & Moroz, 1997), um mapa geomorfológico de escala de semi-detelhe (1:250.000) (Florenzano & Csordas, 1993) e um mapa geológico de escala regional (DNPM, 1983). Foram consultados também os autores Verdade & Hungria (1966), que mapearam, na escala de 1:25.000, os terraços fluviais de um setor do rio Paraíba do Sul, e Coltrinari (2003), que estudou a geomorfogênese do planalto de São José dos Campos - SP.

Com base nessas fontes e nas imagens do subsistema VNIR do sensor ASTER/Terra, realizou-se um trabalho de campo, no dia 11/04/07, para o reconhecimento da compartimentação geomorfológica da área de estudo e verificação dos níveis de terraços fluviais identificados por Verdade & Hungria (1966). Os dados coletados nesse trabalho auxiliaram nas

atividades seguintes, de definição da legenda, interpretação visual e restituição.

Na definição da legenda, empregou-se o modelo de representação gráfica de padrões de relevo (representação em áreas), que segue a proposta do sistema ITC (Verstappen & Zuidam, 1991). Esse sistema destaca os aspectos morfogenéticos, por meio de cores e de denominações específicas que intuitivamente indicam processos. As formas foram separadas por grupos de processos morfogenéticos dominantes: (i) formas estruturais-denudacionais (matizes de roxo); (ii) formas de denudação (matizes de marrom) e (iii) formas de agradação (matizes de verde). Foram acrescentadas à legenda informações sobre a litologia, extraídas da carta geotécnica digital (mencionada na Seção 2.2). A nomenclatura das classes de unidades geomorfológicas foi definida com base na literatura consultada.

Antes da restituição, foram elaboradas chaves de interpretação visual que auxiliaram na identificação das feições geomorfológicas. Os processos e as principais estruturas litológicas, relacionadas à gênese dessas feições, são especificados na Seção 2.1. Os critérios para delimitação das unidades foram as rupturas nos talvegues (quebras negativas) e nos interflúvios (quebras positivas).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### QUALIDADE DOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Com relação ao MDE, por meio de uma análise visual e qualitativa, detectaram-se áreas sem dados (ocasionadas por problemas na extração das paralaxes). Essas áreas são mostradas na Figura 2 por círculos em cinza.

Os resultados das estatísticas descritivas e dos testes de hipóteses são apresentados na Tabela 1. Como os resíduos obtidos da resultante planimétrica estão em módulo, optou-se por não calcular o Erro Médio Quadrático (EMQ) destes. Com relação às estatísticas empregadas no teste de tendência, para a planimetria foram apresentadas somente aquelas referentes às componentes E e N, que forneceram o sentido do deslocamento.

As áreas sem dados, apontadas pelos círculos na Figura 2, correspondem principalmente a corpos d'água e sombras. Como nestes alvos a variância entre os *pixels* é próxima de zero, a estéreo-correlação e a extração automática das paralaxes são prejudicadas.

A validação da planimetria (Tabela 1) indica que o par estereoscópico de imagens epipolares são adequados para mapeamento temático na escala de 1:50.000. Isso foi constatado por meio da hipótese nula

do teste de precisão ( $\chi^2_{amostral} \leq \chi^2_{(n-1, 10\%)}$ ), aplicado à resultante planimétrica, a qual foi aceita para a classe A, escala 1:50.000. Com relação ao teste de tendência, a hipótese nula do teste t de *Student* ( $|t_{amostral}| < t_{(n-1, 5\%)}$ ) foi rejeitada em ambas as componentes planimétricas (E e N) e destacou a ocorrência de tendência ou deslocamento sistemático.

Por outro lado, os resultados da validação da altimetria do MDE ASTER/Terra (Tabela 1) concordam com trabalhos na mesma linha de pesquisa (Toutin, 2008; Oliveira & Paradella, 2009), com destaque para o EMQ de 9,38 m. Observa-se também que a hipótese nula do teste t de *Student* ( $|t_{amostral}| < t_{(n-1, 5\%)}$ ) foi rejeitada e que o MDE apresentou tendência positiva. Esse resultado é coerente, pois o MDE sofre a interferência da altura de diferentes tipos de cobertura da terra. Com relação ao teste de precisão, a sua hipótese nula ( $\chi^2_{amostral} \leq \chi^2_{(n-1, 10\%)}$ ) foi aceita para a classe A, escala 1:100.000, e para a classe B, escala 1:50.000 (Camargo et al., 2009).

### MAPA GEOMORFOLÓGICO

Na Figura 3 é apresentado o mapa geomorfológico final. O Quadro 1, por sua vez, apresenta a legenda detalhada do mapa obtido, destacando suas

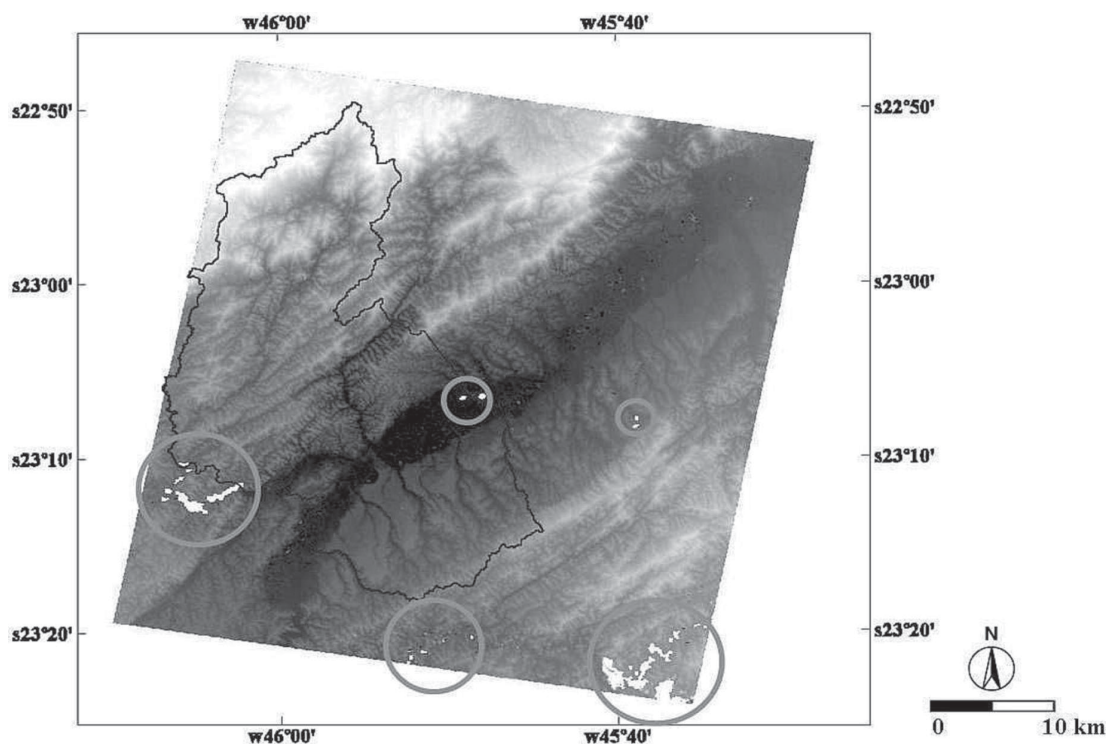


FIGURA 2. MDE ASTER, área de estudo (linha preta) e ausência de dados (círculos cinzas).

TABELA 1. Resumo das estatísticas de validação.

	E	N	Resultante Planimétrica	Altimetria (MDE ASTER/Terra)
Nº de amostras	24	24	24	109
Erro Mínimo - $\Delta_{\text{mínimo}}$ (m)	-59,04	-13,80	2,81	-18,40
Erro Máximo - $\Delta_{\text{máximo}}$ (m)	28,37	48,00	69,36	30,60
Erro Médio - $\Delta_{\text{médio}}$ (m)	-10,90	10,80	25,44	4,14
Desvio Padrão - $S_{\Delta}$	22,60	16,30	15,48	8,40
Erro Médio Quadrático - EMQ (m)	25,13	19,70	-----	9,38
$ t_{\text{amostral}} $	2,10	3,22	-----	5,15
$t_{(n-1, 5\%)}$	<b>1,71</b>	<b>1,71</b>	-----	1,66
$\chi^2_{\text{classeA}} (1:100.000)$	22,70	13,60	6,13	27,46
$\chi^2_{\text{classeA}} (1:50.000)$	90,81	54,30	24,51	171,63
$\chi^2_{\text{classeB}} (1:50.000)$	32,70	19,54	8,82	119,18
$\chi^2_{(n-1, 10\%)}$	<b>32,01</b>	<b>32,01</b>	32,01	127,21

características litológicas e geomorfométricas. Apresenta, também, para cada unidade geomorfológica, a participação (em área) das seis classes de declividade definidas na caracterização das unidades.

No mapa da Figura 3 observa-se que a atividade tectônica Pré-Cambriana condicionou o arranjo e a distribuição espacial das formas de relevo da área de estudo. O mapa mostra que as formas de gênese

estrutural-denudacional estão localizadas nas regiões noroeste e sudeste, enquanto as formas sedimentares Terciárias se concentram na porção sul-sudeste devido à inclinação norte-noroeste do hemigraben, a qual influenciou o deslocamento do canal fluvial do rio Paraíba do Sul no sentido noroeste (Verdade & Hungria, 1966; Almeida, 2000). A compartimentação geomorfológica da área de estudo é corroborada pelas

altitudes mínimas e máximas, apresentadas na legenda (Quadro 1), as quais destacam os diferentes patamares altimétricos dos blocos do hemigraben.

Outras variáveis morfométricas, como a declividade, também caracterizam as diferentes unidades geomorfológicas da área de estudo. Com relação aos

dados de declividade, inseridos na legenda (Quadro 1) do mapa geomorfológico, observaram-se alguns valores espúrios ( $> 45^\circ$ ) na classe “Planícies Aluviais”, que podem ser atribuídos a feições do terreno (edificações, cavas de areia etc.) ou a limitações no processo de estereó-correlação.

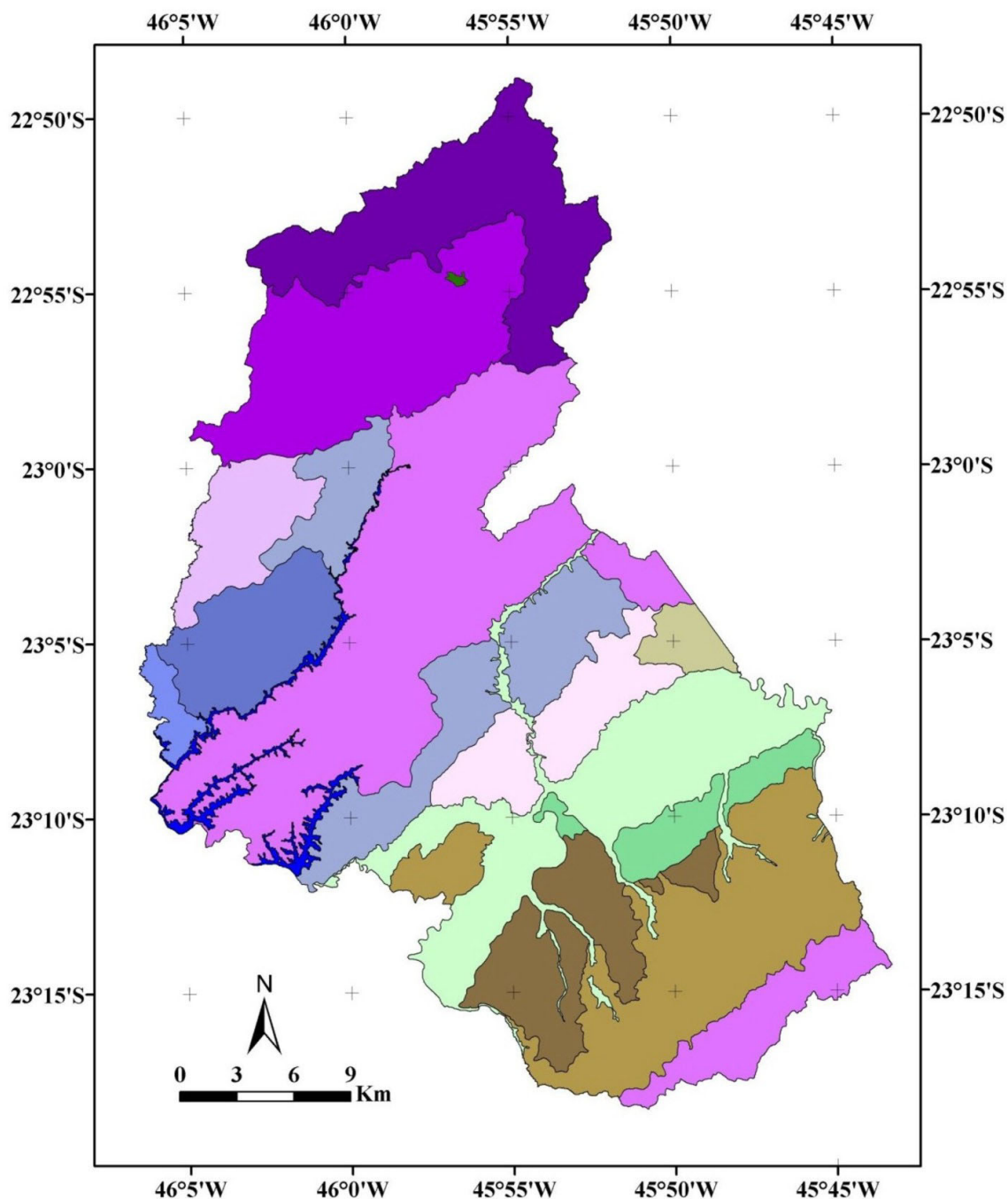

















FIGURA 3. Mapa geomorfológico obtido da interpretação visual das imagens estereoscópicas do sensor ASTER/Terra.

**QUADRO 1.** Legenda do mapa geomorfológico obtido da interpretação visual das imagens estereoscópicas do sensor ASTER/Terra.

Atributos Geomorfológicos													
Classes de declividade (área em km²)													
	Classes	Litologia	Altitude Mínima (m)	Altitude Máxima (m)	Altitude Média (m)	< 3°	3 - 8°	8 - 17°	17 - 25°	25 - 45°	> 45°	Área Total	
Corpos d'Água		Reservatório	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Formas de Agradação		Planícies Aluviais	Sedimentos argilo-arenosos	486,00	712,00	556,30	49,26	58,44	15,36	0,92	0,34	0,18	124,50
		Planície Aluvial Intermontana	Sedimentos arenosos	674,00	693,00	681,29	0,18	0,24	0,04	0,00	0,00	0,00	0,46
		Terraços Fluviais	Sedimentos argilo-arenosos	530,00	620,00	577,14	8,45	13,75	4,67	0,28	0,04	0,00	27,19
Formas de Denudação		Colinas Amplas	Sedimentos arenosos	542,00	657,00	593,51	1,86	5,34	4,68	0,47	0,03	0,00	12,38
		Colinas Pequenas	Sedimentos argilo-arenosos	544,00	718,00	607,04	19,02	59,06	52,35	4,11	0,21	0,01	134,76
		Colinas Tabulares	Sedimentos arenosos	547,00	718,00	614,68	22,73	30,43	9,95	0,54	0,13	0,02	63,80
Formas Estruturais - Denudacionais		Morros Arredondados	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos	543,00	705,00	607,20	3,51	12,49	22,16	8,89	1,96	0,00	49,01
		Morros Alongados e Paralelos	Migmatitos, gnaisses, xistos, filitos e suítes graníticas.	554,00	856,00	661,30	3,87	14,19	33,92	29,11	17,00	0,17	98,23
		Morros Alongados e limitados por Serras	Suítes graníticas	621,00	976,00	771,53	1,67	7,04	18,93	15,23	6,80	0,05	49,72
		Morros Alongados com Serras Locais	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos, com predomínio de suítes graníticas	638,00	1035,00	772,86	1,12	4,90	13,86	10,90	5,06	0,03	35,87
		Morros Arredondados e limitados por Serras	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos	663,00	821,00	738,02	0,66	1,63	4,39	2,04	0,47	0,18	9,37
		Serras Médias	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos, com predomínio de suítes graníticas	559,00	1125,00	744,01	8,44	34,89	93,51	80,46	44,52	0,52	262,34
		Serras Altas	<b>Sem informação</b>	673,00	1475,00	961,80	5,64	21,59	64,98	70,81	66,87	2,42	232,31
		Serras Altas e Escarpadas	<b>Sem informação</b>	649,00	2044,00	1287,47	1,05	6,70	28,20	33,25	32,33	0,97	102,50

## CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi explorar as potencialidades e limitações das imagens estereoscópicas do sistema sensor ASTER/Terra no mapeamento geomorfológico, utilizando como área de estudo o município de São José dos Campos - SP. Face aos resultados obtidos, são destacadas as principais conclusões:

- O par estereoscópico do sensor ASTER/Terra é adequado para mapeamento geomorfológico na escala de 1:50.000 ou inferior.
- O MDE ASTER/Terra, obtido de forma automática por meio de estereo-correlação das imagens epipolares, é adequado para mapeamento topográfico na escala de 1:100.000 ou inferior.



- A disponibilidade dos diferentes tipos de dados (estereoscópicos, multiespectrais e altimétricos) fornecidos pelo sistema sensor ASTER/Terra, de forma integrada, maximiza as possibilidades de análise do intérprete e propicia produtos cartográficos acurados e com informação morfográfica e morfométrica compatível com a escala de 1:50.000 ou inferior.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições de fomento à pesquisa CAPES e CNPq; à FINEP/SEBRAE (Proc. 2799/06); aos dados GPS fornecidos por FUNCATE, INPE e IEAv, bem como ao Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP), pela cessão das imagens ASTER/Terra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER user handbook** (Version 2). [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory – EROS Data Center, 135 p., 2007. Disponível em: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf). Acessado em: 01fev2007.
2. ALMEIDA, F.F.M. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, n. 70, p. 77-111, 2000.
3. ALMEIDA, F.F.M. & CARNEIRO, C.D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
4. BRASIL. **Decreto n. 89.817**, de 20 de junho de 1984: Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 22 de Junho de 1984.
5. CAMARGO, F.F.; FLORENZANO, T.G.; ALMEIDA, C.M.; OLIVEIRA, C.G. Geomorphological mapping using object-based analysis and ASTER DEM in the Paraíba do Sul Valley, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 6613-6620, 2009.
6. CAMARGO, F.F.; OLIVEIRA, C.G.; FLORENZANO, T.G.; ALMEIDA, C.M. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 23 e CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (SBC), p. 775-780, 2007.
7. COLTRINARI, L. **Evolução geomorfológica do planalto de São José dos Campos (SP)**. São Paulo, 2003. 114 p. Tese (Livro-docência) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
8. DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Folhas SF 23/24 (Rio de Janeiro/Vitória): geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro/RJ: DNPM, 780 p., 1983.
9. EHLERS, M. & WELCH, R. Stereocorrelation of Landsat TM images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 9, p. 1231-1237, 1987.
10. FLORENZANO, T.G. & CSORDAS, S.M. **Mapa geomorfológico da Região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos/SP: INPE, 15 p., 1993.
11. GALO, M. & CAMARGO, P. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC, 1, 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis/SC: Universidade Federal de Santa Catarina, p. 41-48, 1994.
12. GILES P.T. & FRANKLIN S.E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, v. 21, n. 3-4, p. 251-264, 1998.
13. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala: 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981.
14. LOHANI, B. & MASON, D.C. Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 56, n. 2, p. 100-120, 2001.
15. MERCHANT, D.C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 42, 1982, Denver/CO, USA. **Proceedings...** p. 222-231, 1982.
16. OLIVEIRA, C.G. & PARADELLA, W.R. Evaluating the quality of Digital Elevation Models from ASTER stereoscopy for topographic mapping in the Brazilian Amazon Region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** (Annals of the Brazilian Academy of Sciences), v. 81, n. 2, p. 217-225, 2009.
17. PCI GEOMATICS. **Geomatica OrthoEngine**, v. 10.0.3 user guide. Ontário, Canada: Richmond Hill, 2006.
18. ROSS, J.L.S. & MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: HUMANITAS/IPT/FAPESP, 1997.
19. SMITH, M.J.; ROSE, J.; BOOTH, S. Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: An evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality. **Geomorphology**, v. 76, n. 1-2, p. 148-165, 2006.
20. TOUTIN, T. Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 06, p. 1097-1125, 2001.
21. TOUTIN, T. Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 10, p. 2241-2247, 2002.
22. TOUTIN, T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004. (a)
23. TOUTIN, T. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 10, p. 2121-2129, 2004. (b)
24. TOUTIN, T. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 3, p. 170-181, 2006.

25. TOUTIN, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 7, p. 1855-1875, 2008.
26. TOUTIN, T. & GRAY, L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, n. 01, p. 13-33, 2000.
27. VERDADE, F.C. & HUNGRIA, L.S. Estudo genético de bacia orgânica do Vale do Paraíba. **Bragantia**, v. 25, n. 16, p. 189-202, 1966.
28. VERSTAPPEN, H.T. & ZUIDAM, R.A. VAN. **The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards**. Enschede, Holanda: ITC, 89 p., 1991.

*Manuscrito Recebido em: 21 de março de 2010  
Revisado e Aceito em: 6 de agosto de 2010*