



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS**

**FRANCISCO DE ASSIS COSTA FERREIRA**

**GEOESTATÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO  
E NO PLANEJAMENTO DA MECANIZAÇÃO FLORESTAL A PARTIR DE  
IMAGENS SRTM E ASTER**

**CRUZ DAS ALMAS – BA**

**2015**

FRANCISCO DE ASSIS COSTA FERREIRA

**GEOESTATÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO  
E NO PLANEJAMENTO DA MECANIZAÇÃO FLORESTAL A PARTIR DE  
IMAGENS SRTM E ASTER**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, pelo discente Francisco de Assis Costa Ferreira, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal, sob a orientação do Prof. Elton da Silva Leite.

CRUZ DAS ALMAS – BA

2015

FRANCISCO DE ASSIS COSTA FERREIRA

**GEOESTATÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO  
E NO PLANEJAMENTO DA MECANIZAÇÃO FLORESTAL A PARTIR DE  
IMAGENS SRTM E ASTER**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, pelo discente Francisco de Assis Costa Ferreira, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal, sob a orientação do Prof. Elton da Silva Leite.

Trabalho de conclusão de curso aprovado em 30/04/2015



---

Prof. Dr. Elton da Silva Leite  
Orientador  
CCAAB/UFRB



---

Prof. Dr. Everton Luís Poelking  
Membro Titular  
CCAAB/UFRB



---

Prof. Dr. Deoclides Ricardo de Souza  
Membro Titular  
CCAAB/UFRB

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me concedido força, saúde e sabedoria para concluir o curso de Engenharia Florestal.

Aos meus pais, Valdeci e Ana, pelo amor, carinho, dedicação e esforços sem medida para possibilitar a realização deste sonho.

A minha Irmã Lane, por ajudar sempre que possível.

A Géssica Vanessa, pelo carinho, amor, atenção e contribuição no decorrer dessa caminhada.

Ao meu orientador Elton da Silva Leite, pelos ensinamentos, orientações, oportunidades concedidas e por sua amizade. Obrigado!

A todos os professores do curso de Engenharia Florestal da UFRB, principalmente os professores Roberto Galindo, Everton Poelking, Rozimar Campos e Deoclides Souza, que contribuíram de forma especial para a minha formação.

A todos amigos da turma 2010.1 de Engenharia Florestal.

## RESUMO

Os modelos digitais de elevação (MDEs) são fundamentais na determinação do planejamento da mecanização florestal. Objetivou-se avaliar a geoestatística na otimização de modelos digitais de elevação e no planejamento da mecanização florestal a partir de imagens SRTM e ASTER. No mapeamento de uso do solo determinou-se as áreas de preservação permanente, reserva legal e exploração florestal. Os MDEs avaliados foram derivados de imagens SRTM com 30 e 90 m de resolução espacial (RE) e ASTER com RE de 30 m, por meio da análise geoestatística obteve-se os modelos krigados, sendo: SRTM 30m krigado, SRTM 90m krigado e ASTER krigado. O MDE de referência foi extraído a partir da interpolação de curvas de nível equidistantes 10 metros na escala 1:25.000 obtidas por levantamento planialtimétrico com GPS geodésico. Foram gerados mapas com 3 classes de declividade utilizadas na mecanização florestal dos MDEs avaliados. Os MDEs originais e krigados foram avaliados pela análise descritiva, raiz quadrada do erro médio quadrático da elevação (RMSE), avaliação visual e numérica. Os resultados revelaram que o RMSE não foi suficiente para avaliar a precisão dos modelos para determinação do planejamento da mecanização florestal. As análises comprovaram que a utilização da geoestatística permitiu otimizar os MDEs gratuitos, com destaque ao SRTM 30m, apresentando potencial para ser utilizado no planejamento da mecanização florestal.

Palavras Chave: semivariograma, krigagem ordinária, planejamento florestal.

## ABSTRACT

Digital elevation models (DEMs) are critical in determining the planning of forest mechanization. The objective was to evaluate the geostatistics in optimizing digital elevation models and planning of forest mechanization from SRTM and ASTER images. In land use mapping was determined the areas of permanent preservation, legal reserve and logging. The derivatives were evaluated DEMs SRTM images 30 and 90 m spatial resolution (ER) and Aster RE 30 m by means of geostatistical analysis gave the krigados models, namely: krigado SRTM 30m, 90m SRTM krigado and Aster krigado. The reference MDE was extracted from the interpolation equidistant contour lines 10 meters in 1: 25.000 obtained by planialtimetric survey with geodetic GPS. Maps were generated with three slope classes used in forest mechanization of assessed MOUs. The original MOUs and krigados were evaluated by descriptive analysis, square root of the mean squared elevation error (RMSE), visual and numerical evaluation. The results showed that the RMSE was not sufficient to assess the models' accuracy to determine the planning of forest mechanization. The analyzes showed that the use of geostatistics allowed optimize free MOUs, highlighting the SRTM 30 m, with potential to be used in the planning of forest mechanization.

Keywords: semivariogram, ordinary kriging, forest planning.

## 1 INTRODUÇÃO

Para se obter um planejamento florestal, é necessário determinar informações da área a ser planejada. Por esse motivo, os modelos digitais de elevação (MDE) tem extrema importância, pois representam de maneira simples e de fácil entendimento a topografia do terreno (ASPIAZÚ et al., 1990).

Os estudos relacionados aos MDE são fundamentais para subsidiar importantes variáveis ambientais, como a declividade do terreno, orientação de vertentes, determinação de áreas propícias de exploração (FUCKNER et al., 2009), além de auxiliar no planejamento operacional.

Os MDEs podem ser originados por vários processos, dentre eles, os que demandam altos custos financeiros, como os levantamentos planialtimétricos por meio de receptores GPS, ou obtidos de forma gratuita, como as imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) (MELGAÇO et al., 2005).

As imagens gratuitas podem contribuir para o planejamento da mecanização florestal, contudo, torna-se necessário avaliar a precisão, potencialidades e limitações dessas bases, especialmente para criação de mapas de declividade.

Gerstenecker et al. (2005) afirmaram que a precisão de MDE derivados de sensores remotos é muito dependente da declividade do terreno, obtendo pior qualidade para áreas mais inclinadas. Ajustes para esses modelos podem ser realizados a partir da geoestatística.

A geoestatística minimiza as possibilidades de erros na espacialização dos dados, aumentando a precisão dos resultados, permitindo compreender e modelar a variabilidade espacial (VIEIRA, 2000). Essa técnica permite estimar valores de pontos não conhecidos por meio da análise de semivariograma e interpolação por meio da krigagem, possibilitando otimizar modelos digitais de elevação.

Grego et al. (2013) utilizou análise geoestatística para otimizar MDE do sensor ASTER, e os resultados evidenciaram que o uso dessa técnica expressou melhores formas do relevo, por ter embasamento estatístico. Tal avaliação pode auxiliar na escolha do MDE mais adequado para estimar o planejamento da mecanização florestal.

A mecanização florestal demanda o uso de máquinas responsáveis por realizar operações de preparo do solo, manutenção, tratamentos silviculturais e colheita e transporte florestal (LIMA & LEITE, 2014). Por ser uma atividade que demanda muitos recursos financeiros, as atividades ligadas a mecanização florestal necessitam ser planejadas

critérios, levando em consideração os fatores que interferem na produtividade, como a declividade do terreno.

Leite et al. (2014) comprovaram que a produtividade das máquinas da colheita florestal são afetadas por a declividade do terreno, quanto maior a declividade menor a produtividade, podendo inviabilizar a mecanização florestal. Dessa forma, é necessário delineamento preciso do MDE.

De forma geral, a comparação entre MDE acessíveis gratuitamente, que permitam derivar de informações sobre a altitude, é de extrema relevância, permitindo conhecer potencialidades e restrições (LANDAU e GUIMARÃES, 2011), além de planejar, reduzir custos e otimizar as operações mecanizadas no maciço florestal. Diante desse cenário, objetivou-se com este trabalho avaliar a geostatística na otimização de modelos digitais de elevação e no planejamento da mecanização florestal a partir de imagens SRTM e ASTER.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está situada no município de Sardoá (Figura 1), localizado no estado de Minas Gerais, na macrorregião Rio Doce, distante 289 quilômetros da capital Belo Horizonte.

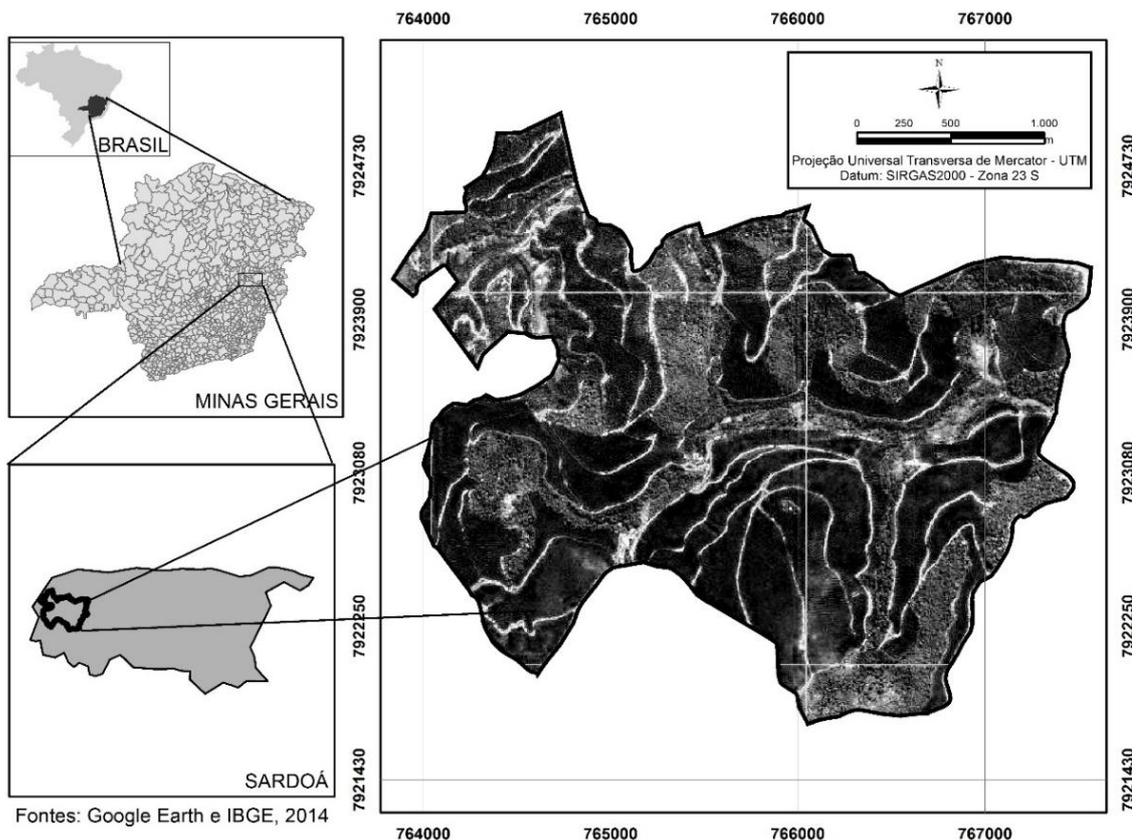


Figura 1: Localização e imagem da área de estudo

Por meio de GPS geodésico da marca *Trimble*, modelo *Pathfinder ProXRT* determinou-se as nascentes, rios e córregos e o perímetro da área de estudo. Através de imagens de satélite gratuitas do *software Google Earth* (GOOGLE, 2015) e do SIG *ArcGIS* versão 10.2 (ESRI, 2015a), determinou-se a área total, área de exploração, áreas de preservação permanente (APP), estradas e reserva legal, com finalidade de servir de base para análises dos modelos digitais de elevação.

As áreas de preservação permanente (APP) foram delimitadas de acordo com o código florestal vigente, considerou-se APP de cursos d'água com borda da calha do leito regular inferior a 10 metros com faixa de preservação de 30 metros, em torno de nascentes com área de raio mínimo de 50 metros a partir do seu centro, e encostas com declividade acima de 45° (BRASIL, 2015). As demais APP contidas no código florestal foram desconsideradas. A reserva legal foi determinada considerando área mínima de 20 % da propriedade (BRASIL, 2015).

O MDE de referência foi extraído a partir da interpolação de curvas de nível equidistantes 10 metros na escala 1:25.000 obtida por levantamento planialtimétrico com GPS geodésico, utilizou-se a ferramenta “*topo to raster*” do SIG *ArcGIS* 10.2 para realizar o processamento, gerando o “MDE padrão” com 10 metros de resolução espacial.

Os MDEs avaliados SRTM e ASTER foram obtidos gratuitamente em sites especializados e foram processados pela geoestatística. A Tabela 1 apresenta a base de dados utilizada neste estudo.

Tabela 1. Aquisição e origem dos MDEs avaliados no estudo

Identificação	Aquisição	Origem/cena
MDE padrão	Curvas de nível	Levantamento planialtimétrico
SRTM 30m	Interferometria	S19-W043
SRTM 30m krigado	Geoestatística	S19-W043
ASTER	Esteroscopia	S19-W043
ASTER krigado	Geoestatística	S19-W043
SRTM 90m	Interferometria	SE-23-Z-B
SRTM 90m krigado	Geoestatística	SE-23-Z-B

Os MDEs SRTM utilizados apresentavam resolução espacial (RE) de 30 e 90 m (USGS, 2015; EMBRAPA, 2015) obtidos por interferometria, técnica que consiste em determinar a

altitude da superfície terrestre a partir da diferença de fase entre reflexões de um mesmo sinal de radar captado por dois receptores distantes um do outro (RABUS et al., 2003). Destacando que os MDEs com RE de 30 metros foram disponibilizados para o Brasil no ano de 2015 (ESRI, 2015b), anterior a este período, os dados disponibilizados apresentavam RE de 90 m devido a reamostragem dos dados originais (Figura 2) realizada pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) (GROHMANN et al., 2008).

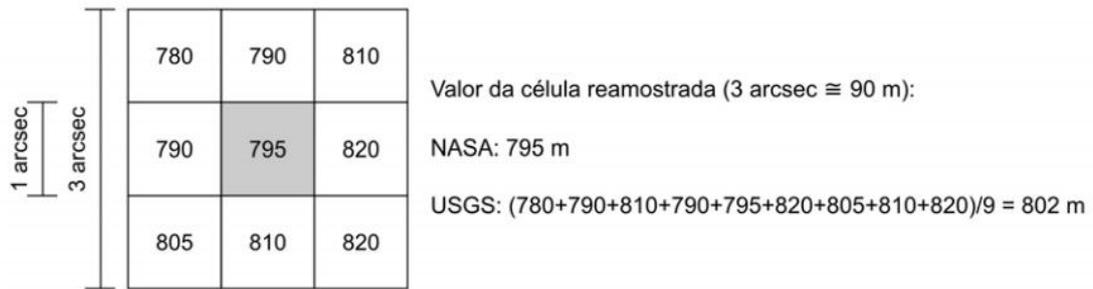


Figura 2. Métodos de reamostragem dos dados SRTM utilizados pela NASA para geração dos modelos com resolução espacial de 90 metros.

Além dos MDEs Provenientes dos imagens SRTM, utilizou-se MDE do sensor ASTER com resolução espacial de 30 metros (ASTER, 2015), obtido por estereoscopia, técnica que consiste na extração de informações de duas imagens de um mesmo local, adquiridas em ângulos diferentes (MELGAÇO et al., 2005).

Para determinação dos MDEs krigados, os pixels das imagens originais foram convertidos em pontos do sistema de coordenadas planas UTM, DATUM SIRGAS 2000 e recortados de acordo com perímetro da área para realização da análise do semivariograma no *Software* especializado GS+ (ROBERTSON, 1998).

A interpolação foi realizada por meio da Krigagem ordinária, gerando os MDES krigados das imagens SRTM 30m, SRTM 90m e ASTER, ambos com pixels de 10 m por meio do *software ArcGIS* versão 10.2 (ESRI, 2015a).

As semivariâncias foram estimadas em razão da distância entre os pontos, sendo encontradas por meio da equação 1.

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} * \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que:  $Y(h)$  é a semivariância em função da distância  $h$ ;  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações;  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ .

O Semivariograma foi utilizado para modelar a estrutura de variabilidade da altitude ( $z$ ) analisado e ajustado de acordo com o melhor modelo matemático, com base nos parâmetros: patamar, alcance, efeito pepita, índice de dependência espacial (IDE) e coeficiente de determinação (VIEIRA, 2000).

Para análise da dependência espacial, foi calculado o IDE, classificado de acordo com a metodologia de Zimback (2001): a dependência espacial fraca para valores  $\leq 25\%$ ; entre 25% e 75%, moderada e  $\geq 75\%$  dependência forte.

Uma das formas de avaliação da qualidade dos modelos digitais de elevação foi por meio da análise estatística descritiva, referente aos valores mínimos, máximos, médias e raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) dos pontos da área. O cálculo do RMSE foi obtido conforme a equação 2 (CHAGAS et al., 2010). A amostragem foi obtida por meio de malha de pontos equidistante 100 metros dos MDEs, delimitados em ambiente SIG (Figura 2).

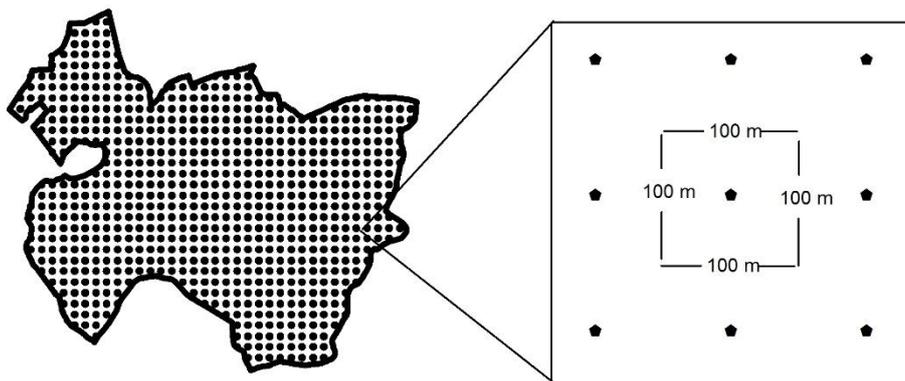


Figura 2: Representação da amostragem realizada nos MDEs

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i^2)}{n}} \quad (2)$$

em que:  $D$  = diferença de elevação entre os MDEs avaliados e o MDE padrão;  $n$  = número de pontos da amostragem realizada.

O planejamento da mecanização florestal foi constituído por classes de declividade que podem restringir as operações mecanizadas no setor florestal, realizou-se revisão de literatura de artigos científicos que utilizaram máquinas agrícolas e florestais nas operações de preparo de solo e colheita florestal para determinação das classes de declividade (LEITE et al., 2013, 2014; LIMA et al., 2004; LIMA & LEITE, 2014; PEREIRA et al., 2012). Desta forma, a

declividade foi dividida em 3 classes (Tabela 2). Utilizou-se o SIG *ArcGIS* 10.2 para determinação dos mapas e quantificação das áreas das classes de declividade.

Tabela 2. Operações florestais de acordo com as classes de declividade

Classes de declividade	Preparo de solo e Plantio	Colheita Florestal	
		Corte	Extração
0 a 15°	Preparo de solo mecanizado e Plantio mecanizado	Sistema mecanizado para máquinas adaptadas (tratores agrícolas, máquinas de esteiras) e máquinas específicas de corte	Sistema mecanizado para máquinas adaptadas (tratores agrícolas, máquinas de esteiras) e máquinas específicas de extração
15 a 25°	Preparo de solo semimecanizado e plantio manual	Máquinas específicas de corte ( <i>harvester, feller-buncher</i> )	Máquinas específicas de extração ( <i>forwarder, skidder, track skidder, clambunk</i> )
25 a 45°	Preparo de solo semimecanizado ou manual e plantio manual	Semimecanizado (motoserra)	Sistema de cabos (guincho arrastador, cabos aéreos, guindastes)

Realizou-se uma comparação visual entre os modelos testados e o MDE padrão para detectar a presença de áreas discrepantes que podem interferir na mecanização florestal, além de quantificar as áreas por classe de mecanização, este parâmetro permite avaliar em aspectos gerais dos modelos mais similares com o MDE de referência.

Outra avaliação foi realizada por meio de interseções de informações das áreas dos modelos testados e do MDE de referência, permitindo determinar com precisão as áreas em comum entre os modelos testados e o MDE padrão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta o mapa de uso do solo obtido por meio do levantamento planialtimétrico e processamentos utilizando o SIG ArcGIS 10.2.

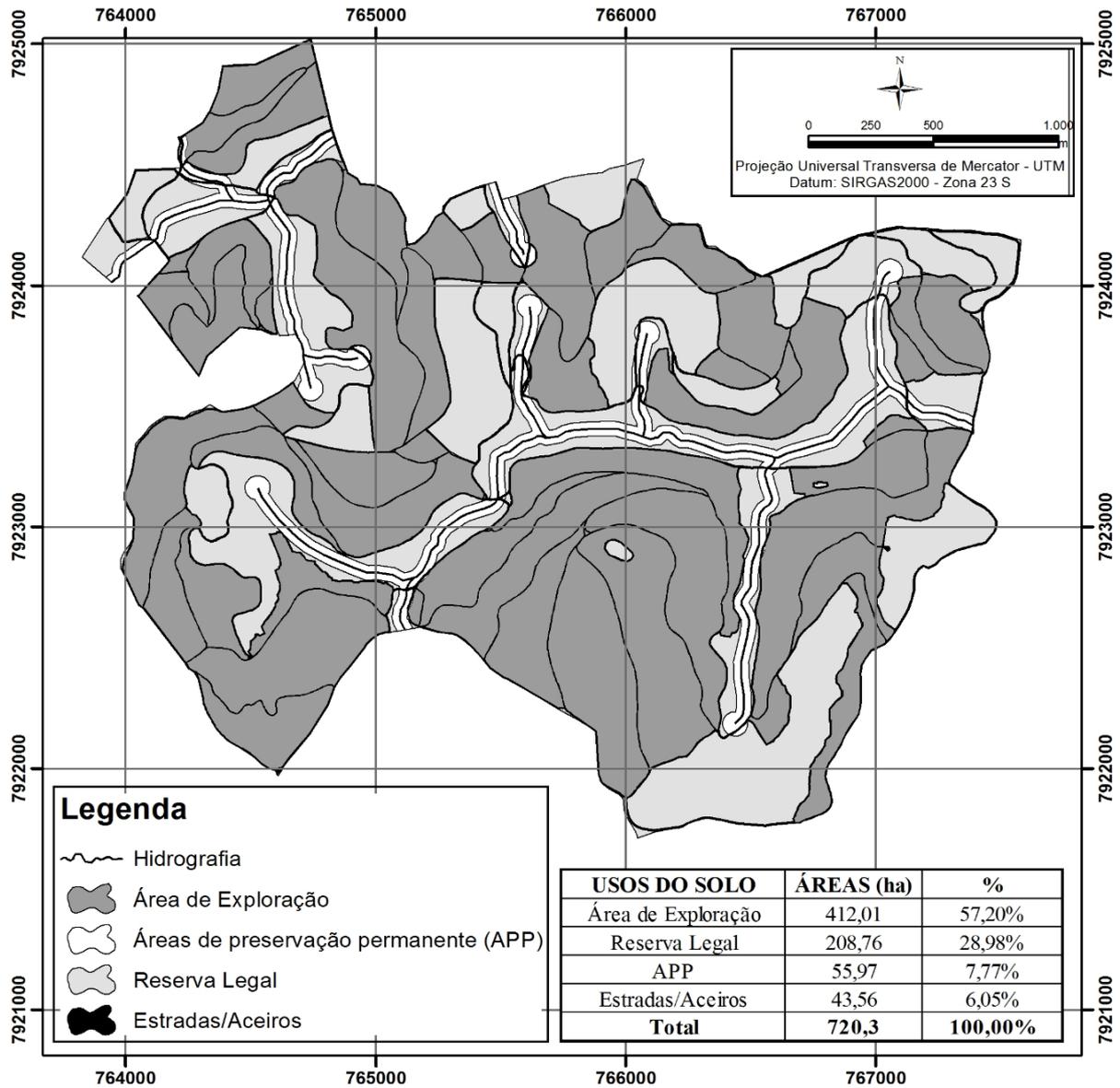


Figura 3. Usos do solo da área em estudo

A área total apresentou (720,30 ha), sendo: área destinada a exploração florestal (412,01 ha), estradas e aceiros (43,56 ha), reserva legal (208,76 ha) e áreas de preservação permanente (55,97 ha).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na análise geostatística para determinação dos MDEs krigados das imagens imagens SRTM e ASTER.

Tabela 3. Parâmetros analisados no semivariograma

MDE	Modelo ajustado	Patamar (Co+C)	Alcance	Efeito pepita (Co)	IDE (C/Co+C)	Classificação	R <sup>2</sup> *
SRTM 30m	Esférico	2595	915	1	99,96%	Forte	96,04%
ASTER	Esférico	2793	944	1	99,96%	Forte	97,86%
SRTM 90m	Esférico	2371	825	1	99,96%	Forte	95,74%

\*R<sup>2</sup>=coeficiente de determinação

De acordo com a Tabela 3, foi possível verificar forte dependência espacial da altitude em todos os MDEs avaliados, sendo o modelo esférico de melhor ajuste. O estudo corrobora com o trabalho realizado por Noetzold et al. (2014), avaliando a variabilidade espacial da altitude obtida por GNSS, ASTER e SRTM. Vieira (2000) afirma que o modelo esférico é o modelo que melhor representa os atributos do solo, como a altimetria.

Por meio do semivariograma esférico, observou-se alcance de 915 m para SRTM 30m, 944 m para ASTER e 825 m para SRTM 90m. Kanegae Junior et al. (2007) afirmam que esse parâmetro reflete diretamente o grau de continuidade espacial da característica avaliada, sendo que quanto maior for o alcance, mais estruturado espacialmente será a variável regionalizada e mais precisa será a krigagem.

O índice de dependência espacial (IDE) de todos os modelos foram iguais, indicando forte dependência espacial (ZIMBACK, 2001).

Na Figura 5 estão apresentados o MDE padrão, o MDE das imagens originais, e os MDEs krigados a partir das imagens ASTER e SRTM.

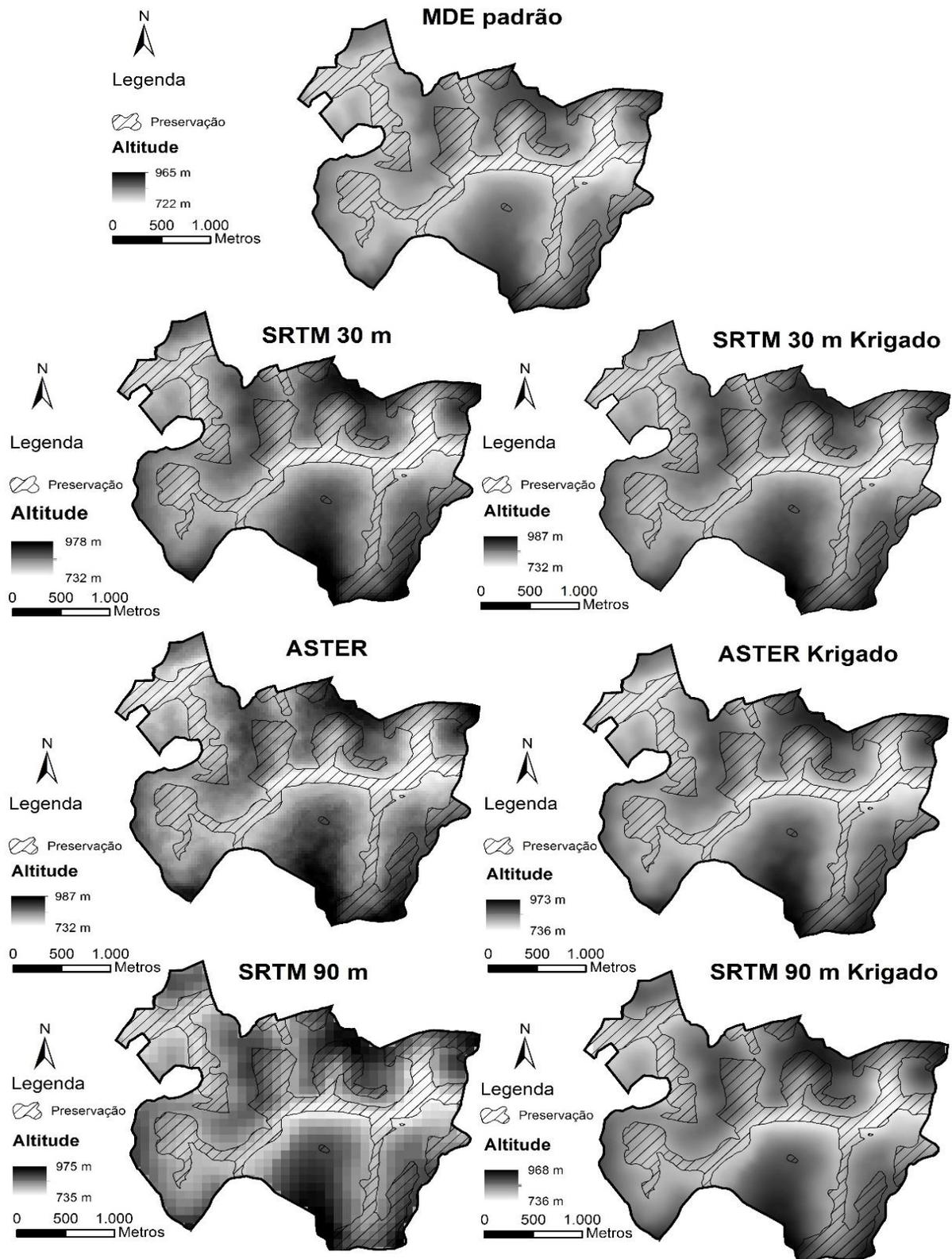


Figura 5: MDEs de carta topográfica e imagens SRTM e ASTER.

MDE padrão= MDE por interpolação de curvas de nível, resolução espacial (RE) 10 metros (m); SRTM 30m= MDE por interferometria, RE 30 m; SRTM 30m krigado= MDE por geoestatística, RE 10 m; ASTER= MDE por estereoscopia, RE 30 m; ASTER krigado= MDE por geoestatística, RE 10 m; SRTM 90m= MDE por interferometria, RE 10 m; SRTM 90m= MDE por geoestatística, RE 10 m. Preservação = área de preservação permanente e reserva legal.

Os resultados apresentados na Figura 5 demonstram melhorias nos modelos digitais de elevação que foram submetidos a krigagem, além apresentar suavização e maior resolução espacial dos MDEs de SRTM 30m krigado, ASTER krigado e SRTM 90m krigado.

As informações da Tabela 4 apresentam os resultados da análise descritiva dos MDEs, observa-se diferenças entre os modelos SRTM e ASTER originais e krigados. No geral, os resultados encontrados no critério RMSE tiveram pequenas diferenças em relação as imagens adquiridas por sensoriamento remoto e após o processo de krigagem. Esta diferença pode ser atribuída a forma de aquisição dos dados das imagens, pois a interferometria e estereoscopia pode utilizar a vegetação arbórea como parâmetro para determinar a altitude.

Tabela 4. Análise descritiva dos MDEs obtidos pelo levantamento planialtimétrico e imagens SRTM e ASTER.

MDEs	Valor Mínimo (m)	Valor Máximo (m)	Valor Médio (m)	RMSE*
MDE padrão	724	954	819	-
SRTM 30m	734	969	839	21
SRTM 30m Krigado	735	971	838	21
ASTER	735	966	834	18
ASTER Krigado	737	959	833	17
SRTM 90m	736	959	836	23
SRTM 90m Krigado	736	957	837	24

\*RMSE = cálculo da raiz quadrada do erro médio quadrático.

Tomazoni et al. (2011) demonstraram resultados semelhantes ao avaliar MDE a partir de imagens ASTER e SRTM a Tabela 4, os autores destacaram que a vegetação influencia na altitude dos modelos, justificando as discrepâncias com o levantamento planialtimétrico.

O MDE ASTER krigado apresentou menor valor de RMSE, evidenciando melhorias com emprego da geoestatística. Os MDE SRTM 90m e SRTM 90m krigado apresentaram valores elevados em comparação a base ASTER e SRTM 30m. Esses resultados podem ser atribuídos a menor resolução espacial do modelo original SRTM 90 m.

Este resultado difere do encontrado por Chagas et al. (2010), avaliando MDE ASTER e SRTM para derivar atributos topográficos em mapeamento de solos, os autores observaram melhor ajuste para o SRTM 90m, esta diferença para a imagem ASTER pode ser atribuída forma de captação dos dados. O MDE SRTM 30m krigado apresentou RMSE mais elevado em comparação com o ASTER Krigado, demonstrando resultados inferiores para essa avaliação.

O RMSE apresentou pouca relevância para a avaliação dos modelos testados, corroborando com Chagas et al. (2010), os autores destacaram que o RMSE não deve ser utilizado isoladamente para estimar a qualidade de MDEs. Desta forma, para contribuir na avaliação dos modelos, a Figura 6 apresenta os mapas de declividade em função das classes utilizadas nas operações mecanizadas. No geral, verificam-se aproximações visuais entre os MDEs krigados e o MDE padrão.

Os resultados são semelhantes ao estudo realizado por Guedes et al. (2011), após utilizar a interpolação por Krigagem, os modelos apresentaram tendência à suavização do relevo, representando melhorias na área.

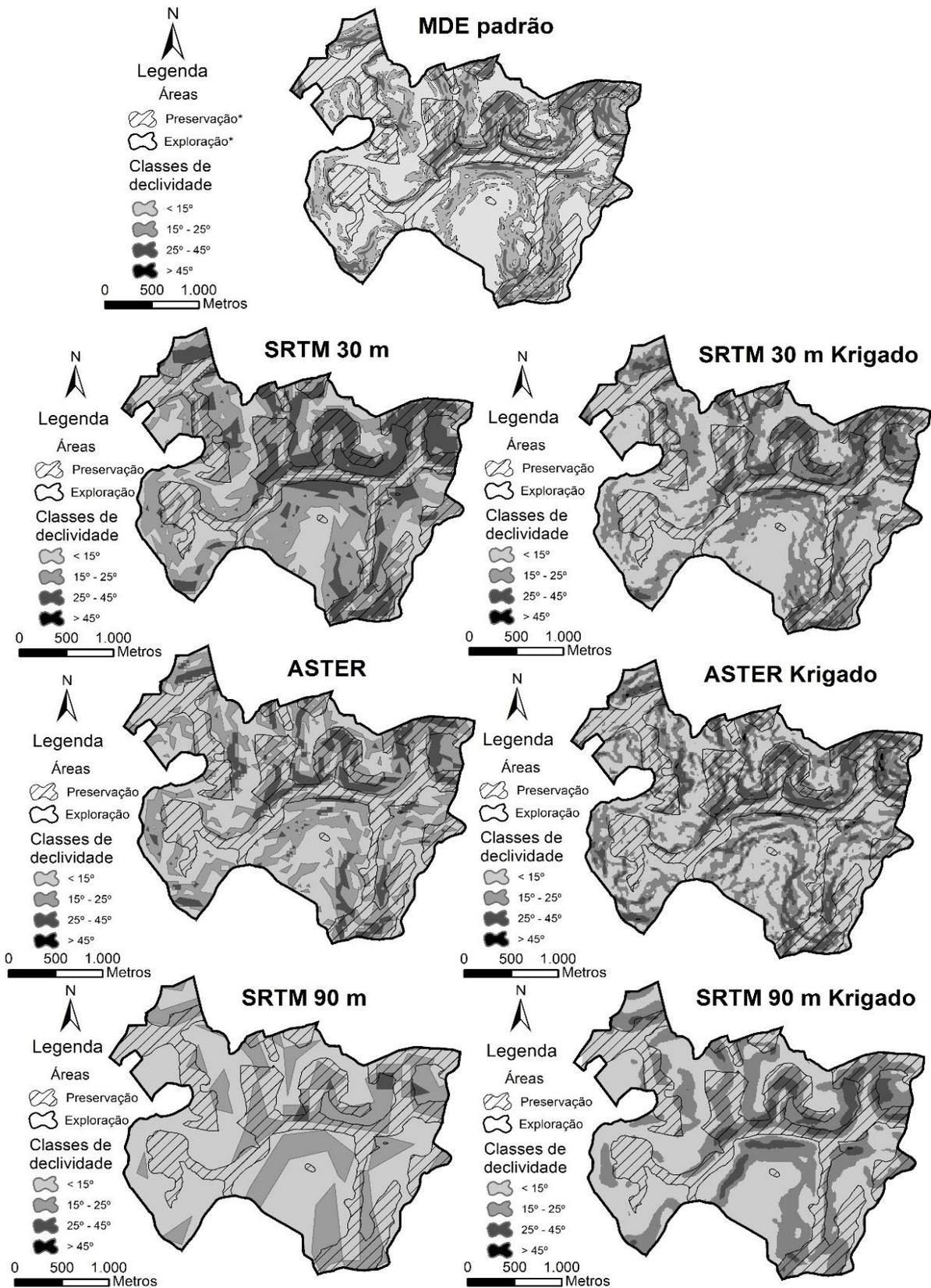


Figura 6: Análise de declividade dos MDEs em relação a faixas de mecanização florestal. MDE padrão= MDE por interpolação de curvas de nível, resolução espacial (RE) 10 metros (m); SRTM 30m= MDE por interferometria, RE 30 m; SRTM 30m krigado= MDE por geoestatística, RE 10 m; ASTER = MDE por estereoscopia, RE 30 m; ASTER krigado= MDE por geoestatística, RE 10 m; SRTM 90m= MDE por interferometria, RE 10 m; SRTM 90m= MDE por geoestatística, RE 10 m; Preservação = área de preservação permanente e reserva legal.

Em relação aos MDEs SRTM, o modelo SRTM 30m krigado apresentou maiores semelhanças com o MDE padrão. Esse resultado pode ser atribuído a maior resolução espacial do modelo original e forma de captação dos dados, apesar dos modelos SRTM 30m e SRTM 90m serem provenientes do mesmo sensor.

O processo de krigagem por meio da geoestatística resultou em melhorias dos MDEs, pois suavizou as maiores discrepâncias que podem ser atribuída a vegetação das imagens. Outro fato refere-se a melhoria da resolução espacial pela krigagem, pois estima pontos não conhecidos com base em pontos conhecidos (VIEIRA, 2000). Esse resultado corrobora com o estudo de Iwashita et al. (2009), que avaliaram o uso da interpolação de dados SRTM de 90 metros para 30 metros e concluíram que houve suavização das feições após o processo de krigagem ordinária. Grego et al. (2013) complementa que a utilização da análise geoestatística pode otimizar MDE por ter embasamento estatístico.

Os resultados visuais obtidos do MDE ASTER krigado se assemelharam ao MDE padrão, apresentando pequenas diferenças, este fato pode explicado pela maneira de aquisição das imagens originais, imageamento por estereoscopia e baixa presença de nuvens. Entretanto apresentou maior fragmentação das classes de declividade, fato que pode comprometer o planejamento da mecanização florestal.

Grego et al. (2013) utilizou análise geoestatística para otimizar o MDE do sensor ASTER, evidenciando que o uso dessa técnica pode expressar melhores formas da superfície.

De forma geral, os resultados dos modelos otimizados via geoestatística foram superiores em relação aos modelos originais adquiridos. O MDE SRTM 90m krigado apresentou grandes melhorias e apresentou aproximação visual com o MDE padrão, melhorando significativamente em relação ao modelo original da imagem.

A Tabela 5 apresenta a análise das áreas das classes de declividade dos MDEs. Os resultados da quantificação das áreas dos modelos krigados foram semelhantes a análise visual, evidenciando melhora nos modelos originais das imagens, sendo que os MDEs SRTM 30m krigado e ASTER krigado foram os mais indicados para realizar planejamento da mecanização florestal, indicando potencial para otimizar as operações, reduzindo os recursos financeiros, materiais e humanos. Entretanto, os polígonos do MDE ASTER krigado apresentaram muitos fragmentos que não ocorreram no mapa proveniente das curvas de nível, este fato pode influenciar nas operações mecanizadas.

O SRTM 90m e SRTM 90m krigado apresentaram áreas generalizadas e agrupadas, características de mapas que não necessitam de alto nível de detalhamento, diferente dos mapas utilizados em planejamentos de operações florestais, onde é necessário conhecer o relevo de

forma precisa, especialmente, a declividade. Entretanto, pode ser utilizado no macroplanejamento das áreas de exploração florestal, pois possibilita visão geral da área em pequenas escalas.

Tabela 5. Análise das áreas das classes de declividade dos modelos digitais de elevação.

MDEs	Áreas por classe de mecanização (ha)				Porcentagem (%)			
	0 - 15°	15 - 25°	25 - 45°	Total	0 - 15°	15 - 25°	25 - 45°	Total
MDE padrão	226,51	136,15	49,35	412,01	54,98	33,05	11,98	100,00
SRTM 30m	144,31	188,17	79,53	412,01	34,90	45,80	19,40	100,00
SRTM 30m krigado	223,92	154,71	33,32	412,01	54,40	37,60	8,10	100,00
ASTER	207,28	155,94	48,79	412,01	50,30	37,80	11,80	100,00
ASTER krigado	195,69	149,24	63,03	412,01	47,50	36,20	16,20	100,00
SRTM 90m	284,23	123,33	4,45	412,01	69,00	29,90	1,10	100,00
SRTM 90 krigado	240,7	147,32	23,99	412,01	58,50	35,90	5,60	100,00
MDEs	Áreas (ha) em sobreposição entre os MDE testados e o MDE padrão				Porcentagem (%)			
	0 - 15°	15 - 25°	25 - 45°	Total	0 - 15°	15 - 25°	25 - 45°	Total
MDE padrão	226,51	136,15	49,35	412,01	54,98	33,05	11,98	100,00
SRTM 30m	128,16	82,76	33,19	244,11	31,11	20,09	13,60	64,79
SRTM 30m krigado	175,80	77,94	16,75	270,49	42,67	18,92	4,07	65,65
ASTER	157,83	70,40	18,83	247,06	38,31	17,09	4,57	59,97
ASTER krigado	143,81	60,71	21,09	225,61	34,90	14,74	5,12	54,76
SRTM 90m	173,00	61,00	2,50	236,50	41,99	14,81	0,61	57,40
SRTM 90m krigado	174,54	68,70	9,87	253,11	42,36	16,67	2,40	61,43

Na análise da sobreposição das classes de declividade (Tabela 5), os modelos exibiram resultados discrepantes em comparação as classes derivadas da carta topográfica, esse efeito pode atribuído a forma obtenção dessas informações, considerando que as interseções só levam em consideração as áreas que apresentam a mesma classe de declividade nas mesmas coordenadas.

Os resultados visuais apresentaram melhoras significativas, Iwashita et al. (2011) afirmaram que os mapas podem apresentar melhoras visuais, mas nem sempre pode ocorrer melhoria numérica. Esse parâmetro é levado em consideração no planejamento da mecanização florestal.

A mecanização florestal torna-se muito prejudicada em relevo acidentado devido à restrição de tráfego das máquinas, limitando os métodos semimecanizado e manual para essas áreas. Leite (2010) afirma que esses métodos apresentam baixa produtividade comparado com os métodos mecanizados. Pereira et al. 2012 avaliando a eficiência da subsolagem em função da declividade do terreno afirmaram que a profundidade da subsolagem diminui com o aumento

da declividade, corroborando com o estudo realizado por Leite et al. (2014) avaliando o desempenho do *Forwarder* na extração florestal, os autores afirmaram que quanto maior a declividade menor a produtividade. Portanto, quanto mais preciso for o MDE, melhor será o planejamento dessas operações, pois a declividade é uma variável fundamental nesta etapa.

## **5 CONCLUSÕES**

A análise descritiva da declividade permitiu avaliar o potencial dos diferentes modelos e que o RMSE não deve ser utilizado isoladamente para estimar a qualidade dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs).

A análise visual dos mapas permitiram distinguir diferenças entre os MDEs que não foram observadas nos resultados da análise numérica de altimetria e declividade, se tornando um importante parâmetro para utilizar no planejamento da mecanização florestal.

A análise geoestatística melhorou a qualidade das imagens a partir de base de dados SRTM e ASTER, podendo contribuir com a redução de recursos do planejamento da mecanização florestal, pois levantamentos topográficos demandam equipamentos, tempo e custos, que podem ser substituídos pelo processamentos de base de dados obtidos gratuitamente.

O MDE SRTM 30m krigado apresentou melhores resultados, podendo ser utilizado para derivar atributos empregados no planejamento da mecanização florestal.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPIAZÚ, C.; ALVES, L.M.; VALENTE, O.F. Modelos digitais de terrenos conceituação e importância. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 21, p.27-36, 1990.

ASTER. Disponível em: <<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp>>. Acesso em 15 fev. 2015.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Código Florestal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, de 25 maio de 2012.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E.; ROCHA, M.F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N.C. de. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2 p.218-226, 2010.

EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Brasil em Relevo**. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/mg/se-23-z-b.htm>>. Acesso em 12 mar. 2015.

ESRI. **ArcGis explorer website**. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/explorer/index.html>>. Acesso em 14 fev. 2015a.

ESRI. **South America & Western Europe SRTM 30 m in Esri World Elevation Services**. Disponível em: <<http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2015/02/06/south-america-western-europe-srtm-30-m-in-esri-world-elevation-services>>. Acesso em 12 mar. 2015b.

FUCKNER, M.A.; FLORENZANO, T.G.; MORAES, E.C. Avaliação altimétrica de modelos digitais de elevação extraídos de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** INPE, 2009, p. 683-690.

GERSTENECKER, C.; LÄUFER, G.; STEINECK, D.; TIEDE, C.; WROBEL, B. Validation of digital elevation models around Merapi Volcano Java, Indonesia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.5, p. 863-876, 2005.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em 15 fev. 2015.

GREGO, C. R.; LONG, R. M.; VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VEDOVATO, L. B.; OLIVEIRA, B. P.; LEIVAS, J. F.; VICTÓRIA, D. C. Otimização de modelo digital de elevação - ASTER utilizando análise geostatística. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 1237-1243.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. APLICAÇÕES DOS MODELOS DE ELEVÇÃO SRTM EM GEOMORFOLOGIA. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v.2 n.2. p.73-78. 2008.

GUEDES, H. A. S.; CAPOBIANGO, G. V.; MARTINS, V. S.; SILVA, D. D. Análise da precisão entre os métodos de interpolação Krigagem Ordinária e Topo to Raster na geração de modelos digitais de elevação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais...** SBSR, 2011. p. 4239-4239.

IWASHITA, F., & DE SOUZA FILHO, C. R. Avaliação da interpolação de dados SRTM-90 m através de dados SRTM-30 m do território americano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...** INPE, p. 3927-3934.

KANEGAE JUNIOR, H.; MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; AVALIAÇÃO DA CONTINUIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS EM DIFERENTES IDADES DE POVOAMENTOS CLONAIS DE *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, v.31, n.5, p.859-866, 2007

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Análise Comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2011. p. 4003-4010.

LEITE, E. S. **Desenvolvimento de planos de colheita florestal de precisão utilizando tecnologias de geoprocessamento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2010.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem técnica e de custos do *Harvester* no corte de madeira de eucalipto no sistema de toras curtas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 205-215, jun. 2013.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. MODELAGEM DO DESEMPENHO DA EXTRAÇÃO DE MADEIRA PELO "FORWARDER". **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 879-887, 2014.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P.; **Mecanização**: In: MACHADO, C. Cardoso (Org.) Colheita florestal. 3ª edição. Viçosa, MG: Editora UFV, 2014. Cap.2, p.46 – 74.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C. Estimativa das estabilidades longitudinal e transversal de tratores florestais utilizados na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 839-844, 2004.

MELGAÇO, L. M.; SOUZA FILHO, C. R.; STEINMEYER, M. Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 1215-1220.

NOETZOLD, R.; ALVES, M. C.; GALLON, R. A.; OLIVEIRA, M. J. P. A. Variabilidade espacial da altitude elipsoidal determinada por GNSS, ASTER GDEM e SRTM. **Revista Brasileira de Geomática**, v.2, n. 2, p.69-76, 2014.

PEREIRA, P. P.; FIEDLER, N. C.; LIMA, J. S. S.; GUIMARÃES, P. P.; MÔRA, R.; EFICIÊNCIA DA SUBSOLAGEM NA PROFUNDIDADE DE PREPARO DO SOLO EM

FUNÇÃO DA DECLIVIDADE DO TERRENO. **Revista Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 607-612, 2012

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, R.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p.241-262, 2003.

ROBERTSON, G.P. **GS: Geostatistics for the environmental sciences (version 5.1 for windows)**. Gamma Design Software, 152p 1998.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES E.; GOMES, T. C.; SILVA, T. G da. Uso de modelo digital de elevação gerado a partir do ASTER GDEM e SRTM para caracterização de rede de drenagem do município Renascença no Sudoeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.4 n.2. p.365-376. 2011.

USGS. **Earth Explorer**. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 05 abr. 2015.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. Botucatu, 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. 2001.