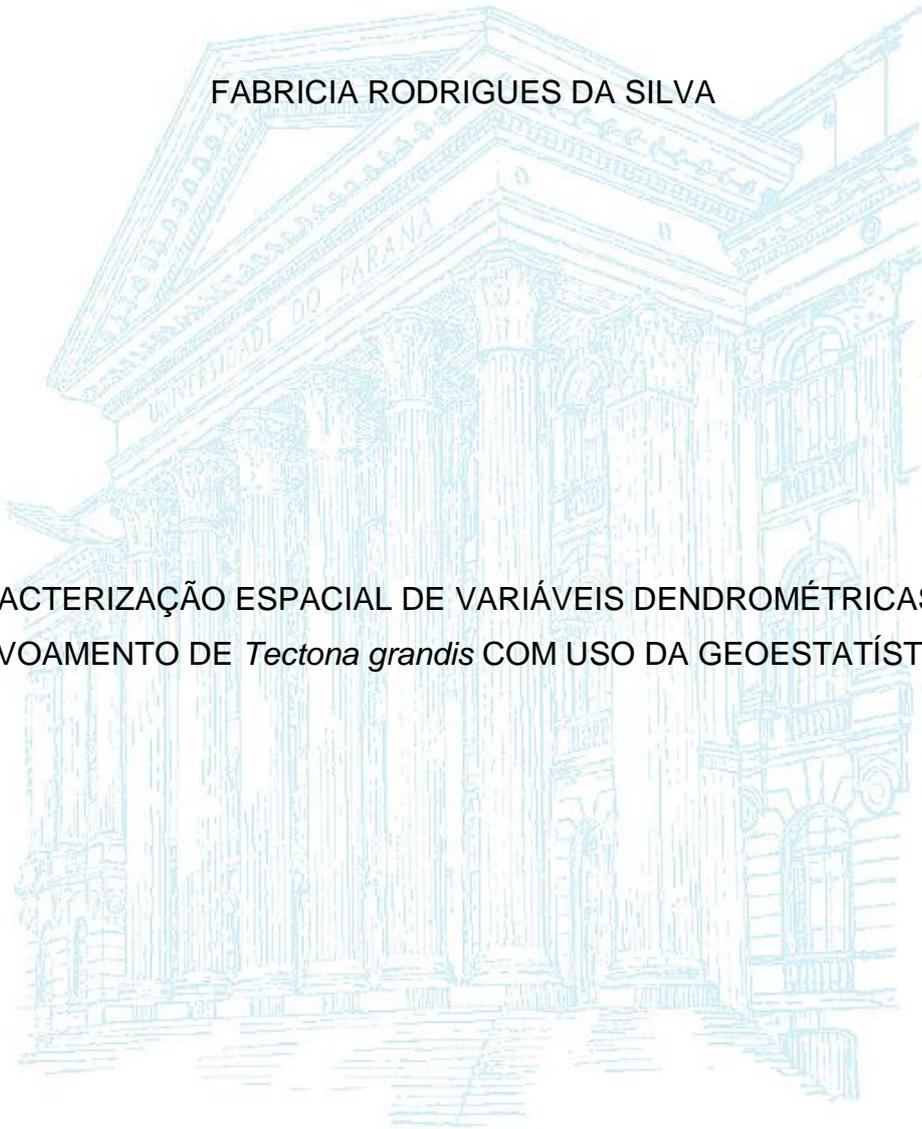


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABRICIA RODRIGUES DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM  
POVOAMENTO DE *Tectona grandis* COM USO DA GEOESTATÍSTICA



CURITIBA

2016

FABRICIA RODRIGUES DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM  
POVOAMENTO DE *Tectona grandis* COM USO DA GEOESTATÍSTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Manejo Florestal de Precisão do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de especialista.

Orientador: Dr. Júlio Cesar Wojciechowski

CURITIBA

2016

# CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis* COM USO DA GEOESTATÍSTICA

Fabricia Rodrigues da Silva<sup>1</sup>, Júlio Cesar Wojciechowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Florestal, mestre em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, fabriciarodri@hotmail.com.

<sup>2</sup>Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, juliocw@unemat.br

## RESUMO

Os estudos das estruturas espaciais das florestas são de grande importância na definição de estratos homogêneos desde as primeiras avaliações dos povoamentos, além de proporcionar o controle da variação espacial nos sucessivos inventários. Possibilitando, desta maneira, intervenções localizadas para obter o máximo rendimento de acordo com as potencialidades de um determinado sítio. Objetiva-se neste estudo aplicar e avaliar análises geoestatísticas para a modelagem da variabilidade espacial de características dendrométricas em um plantio de *Tectona grandis*. Os dados foram coletados em 748,17 hectares plantados com teca, no município de Alta Floresta, região norte do estado de Mato Grosso. Estes dados foram obtidos a partir das 73 parcelas permanentes instaladas na área. Em cada parcela foi coletada as coordenadas geográficas e os dados referentes a altura dominante e volume, os quais foram avaliadas espacialmente. Para modelar os padrões espaciais foi utilizada a análise geoestatística com o ajuste do semivariograma, através do modelo exponencial. Foram testados 4 métodos de ajustes, sendo, o métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o método de ajuste denominado de “a sentimento” e o método da Máxima Verossimilhança (MV). A interpolação e a espacialização foram realizadas pelo método da krigagem ordinária pontual. Segundo as técnicas de seleção avaliadas, o modelo exponencial e o método da Máxima Verossimilhança tiveram melhor desempenho, sendo eficiente para representar a variabilidade espacial dos dados de altura dominante e volume por hectare, sendo recomendado para estudos associados à aplicação da geoestatística em condições semelhantes.

Palavras-Chave: Silvicultura de precisão. Teca. Variabilidade espacial. Características dendrométricas.

# SPACE CHARACTERIZATION OF DENDROMETRIC VARIABLES OF *Tectona grandis* WITH USES OF GEOSTATISTICS

## ABSTRACT

The studies about spatial structures of the forests are very important to define homogeneous strata since the first evaluations of the stands, besides providing the control of the spatial variation in the successive inventories. In this way, it allows localized interventions to obtain the maximum yield according to the potentialities of a given site. The aim of this study was to apply and evaluate geostatistical analyzes for the modeling of the spatial variability of dendrometric characteristics in a *Tectona grandis* plantation. The data were collected on 748.17 hectares planted with teak, in Alta Floresta, located in the northern region of the state of Mato Grosso, Brazil. These data were obtained from the 73 permanent plots installed in the area. In each plot, the geographic coordinates and the data concerning the dominant height and volume were collected and evaluated spatially. To model the spatial patterns, the geostatistical analysis was used with the semivariogram adjustment through the exponential model. Four methods of adjustment were tested: Ordinary Least Squares (OLS), Weighted Least Squares (WLS), the so-called "a feeling" adjustment method and the Maximum Likelihood (ML) method. Interpolation and spatialization were performed by the ordinary point kriging method. According to the evaluated selection techniques, the exponential model and the maximum likelihood method performed better, being efficient to represent the spatial variability of the data of dominant height and volume per hectare, being recommended for studies associated with the application of geostatistics in similar conditions.

Keywords: Precision silviculture. Teak. Spatial variability. Dendrometric characteristics.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	6
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	6
1.1.1 Geoestatística.....	6
1.1.2 <i>Tectona grandis</i> .....	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.2.1 Geral.....	8
1.2.2 Específicos .....	8
1.3 JUSTIFICATIVA.....	8
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	9
2.1 LOCAL DE ESTUDO .....	9
2.2 METODOLOGIA .....	10
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	14
3.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS.....	14
3.2 MÉTODOS DE AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMAS .....	18
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	23
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	23
<b>Anexos (Códigos em R)</b> .....	27

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 1.1.1 Geoestatística

Com a crescente necessidade de informações dos plantios florestais, a utilização da geoestatística para a estimativa de uma variável em locais não amostrados e sua aplicação em mapeamentos é uma técnica moderna, com ótimos resultados e de baixo custo, pois utiliza a base de dados oriundo do inventário. Com os avanços tecnológicos da silvicultura de precisão, é possível mensurar e identificar as relações espaciais dos fatores que restringem a produção e a produtividade dos povoamentos florestais (GOMES et al., 2007).

A geoestatística, que tem como fundamento a teoria das variáveis regionalizadas (BORSSOI et al., 2011) que define a variável regionalizada como uma função espacial numérica de um fenômeno estruturado no espaço, tendo a semivariância como a sua medida estatística básica, por meio da qual é mensurada a estrutura espacial e as relações estatísticas existentes entre pontos amostrais separados por sucessivas distâncias (PELISSARI et al., 2014).

Segundo Wojciechowski et al. (2009), a geoestatística se mostra como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial dos atributos estudados, e não considerar a variabilidade espacial pode impedir que diferenças reais sejam levantadas, o que impossibilitaria um tratamento diferenciado de acordo com as exigências locais (BORSSOI et al., 2011).

Assim, por meio da geoestatística, são elaborados os mapas temáticos, oriundos de interpolações espaciais (KANEGAE JUNIOR et al., 2007). Além disso, esse estudo pode ser feito em áreas de quaisquer tamanhos, abrangendo diversas características dendrométricas (SPIAZZI et al., 2011). O conhecimento das variabilidades espacial e temporal dos fatores que afetam a produção e a produtividade dos povoamentos florestais permite realizar intervenções precisas, para obter o máximo rendimento de acordo com as potencialidades do solo e dos demais fatores ambientais locais (BRANDELERO et al., 2007).

### 1.1.2 *Tectona grandis*

A teca, pertencente à família Lamiaceae, é uma árvore pioneira, decídua, de grande porte e copa circular. Sob condições de crescimento, desenvolve tronco retilíneo, com altura superior a 25 m. Obtém melhor desempenho em locais com precipitação entre 1.270 e 2.540 mm, com estação seca definida, temperatura mínima entre 13 e 17 °C e máxima entre 39 e 43 °C. Desenvolve-se em diversos solos e formações geológicas, porém prefere solos drenados e profundos, com pH entre 6,5 e 7,5 (PANDEY e BROWN, 2000; KRISHNAPILLAY, 2000). É empregada em uma variedade de usos tradicionais e atuais, incluindo mobiliário, elementos estruturais, madeira, laminados e pisos. Essas propriedades mantêm a teca como uma das principais espécies de madeira tropical de alto valor neste século (CAMINO e MORALES, 2013).

O interesse do Brasil na Teca vem crescendo nas regiões Centro-Oeste e Norte do país (SCHUHLI e PALUDZYSZYN FILHO, 2010), sendo que os principais plantios encontram-se nos estados de Mato Grosso, Pará e Roraima, destacando-se o Mato Grosso como pioneiro nos plantios de Teca (OLIVEIRA, 2014). Atualmente, a espécie se destaca por ser considerada uma alternativa de elevado valor econômico para o suprimento sustentável das indústrias de base florestal (PELLISSARI et al., 2014b).

Chaves e Fonseca (1991) observaram que a teca tem um crescimento rápido na fase inicial, seguido por uma fase de crescimento médio, a partir da qual este tende a diminuir. Silva et al. (2014) observaram que esse é mais acelerado nos cinco anos iniciais da série quanto ao diâmetro e nos 3 primeiros anos relacionado à altura. Weaver (1993) descreve que o incremento médio anual da teca geralmente é relatado entre 10 e 25 m<sup>3</sup>/ha/ano.

No estado de Mato Grosso em praticamente todas as faixas de precipitação média anual observadas mostraram-se favoráveis ao desenvolvimento da teca, com incrementos médios anuais de até 25 m<sup>3</sup>/ha/ano em locais com precipitação média anual variando de 1.200 mm até 2.400 mm (SHIMIZU et al., 2007). Silva (2012) estudando o crescimento de teca em Alta Floresta - MT obteve para plantios de 10 anos incremento médio anual (IMA) de 27,38 m<sup>3</sup>/ha/ano, nas melhores classes.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Avaliar e aplicar análises geoestatísticas para a modelagem da variabilidade espacial de características dendrométricas em um plantio de *Tectona grandis* no município de Alta Floresta, estado de Mato Grosso, Brasil.

### 1.2.2 Específicos

- a. Modelar a variabilidade espacial da variável altura dominante;
- b. Modelar a variabilidade espacial da variável volume; e
- c. Gerar informação espacial com a finalidade de definir áreas de maior e menor produtividade do povoamento.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Os métodos tradicionais utilizados para a avaliação da produtividade das florestas, utilizam uma medida de tendência central, geralmente a média, além de uma medida de dispersão, como a variância, sem considerar as relações existentes entre as observações vizinhas (PELLISSARI et al., 2012a).

Segundo Mello (2004), eles não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais. Já os métodos geoestatísticos podem avaliar melhor as estruturas de dependência espacial entre as características dendrométricas de uma espécie e as variáveis do seu meio físico, ou seja, obter resultados que sejam capazes de explorar adequadamente as relações espaciais existentes entre os dados dendrométricos e o meio abiótico.

Questões relacionadas ao desbaste e a resposta ao crescimento oriunda destas práticas podem ser melhor visualizadas e otimizadas com auxílio da geoestatística. Portanto, o conhecimento espacial dessas variabilidades torna-se uma importante ferramenta para a eficiência do manejo florestal.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em um povoamento puro de teca, com 748,17 ha aos 13 anos de idade, na Fazenda IDC, localizada no município de Alta Floresta, região Norte do estado de Mato Grosso (Figura 1).

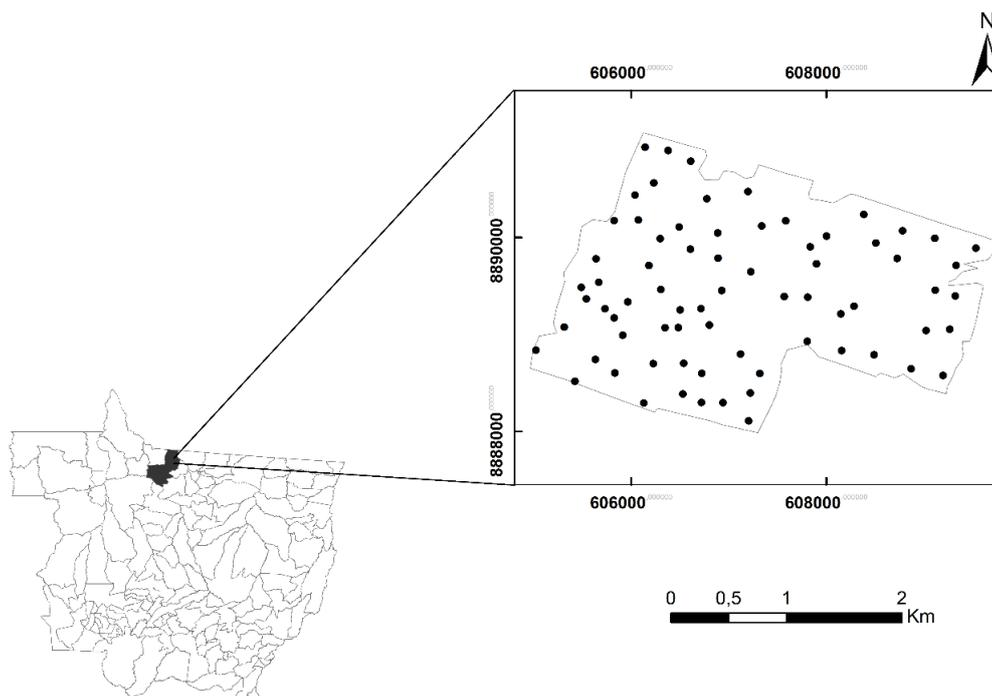


FIGURA 1 - Localização do Município de Alta Floresta – MT e detalhe da distribuição das unidades amostrais na área experimental.  
Fonte: Autor (2016)

O clima da região é do tipo Am tropical monçônico, segundo a classificação de Alvares et al. (2014), caracterizado por elevado índice pluviométrico no verão com médias às vezes superiores a 3.000 mm, e um inverno seco, predominando altas temperaturas. A propriedade fica inserida na bacia Rio Teles Pires que é o principal curso d'água da região.

As mudas originadas de sementes foram plantadas na forma de “stamp”. Para o plantio, o solo foi descompactado, arado e nivelado, não havendo adubação no preparo do solo ou durante a condução do povoamento. A manutenção de capinas e roçadas foi constante durante os três primeiros anos,

para eliminar a competição com outras espécies. As desramas ocorreram a partir do segundo ano após o plantio e os desbastes, do tipo seletivo, foram executados aos seis e aos onze anos, com a remoção média de 25%, do número de árvores por hectare.

Para a coleta dos dados, foram utilizadas como referência as 73 parcelas permanentes instaladas na área, com 900 m<sup>2</sup> cada, espaçamento de 3 m x 2,2 m. Em cada parcela foi coletada as coordenadas geográficas e seus respectivos dados de inventário, mediram-se o diâmetro a altura do peito (DAP) de todas as árvores e a altura total em linhas intercaladas. A altura dominante foi calculada conforme o conceito de Naslund, obtida pela média aritmética das alturas das árvores de uma unidade amostral qualquer, cujos diâmetros sejam superiores ao diâmetro médio aritmético ( $\bar{d}$ ) acrescido de 1,5 desvio padrão (s) (SCOLFORO e THIERSCH, 2004).

A estimativa do volume foi feita por meio da equação volumétrica, associada à equação hipsométrica, utilizada na estimação das alturas das demais plantas dentro da parcela.

O volume foi obtido a partir do modelo de Schumacher-Hall, onde a equação resultante do ajuste foi:

$$\ln(V_{cc}) = -9,042 + 1,8434\ln(dap) + 0,7247\ln(Ht) \text{ com } R^2_{aj}: 0,92 \text{ e } S_{yx}: 0,02.$$

Em que:  $V_{cc}$  = volume total com casca, em m<sup>3</sup>;  $dap$  = diâmetro a 1,30 m, em cm;  $Ht$  = altura total, em m; e  $\ln$  = logaritmo neperiano.

Os valores de altura total foram obtidos a partir da seguinte equação (modelo de Prodan):

$$H - 1,3 = (dap^2 / (-1,090 + 0,679 * dap^2 + 0,030 * dap^2)) \text{ } R^2_{aj}: 0,90 \text{ e } S_{yx}: 2,85.$$

Em que:  $H$  = altura total, em m;  $dap$  = diâmetro a 1,30 m, em cm.

## 2.2 METODOLOGIA

Foi realizado primeiramente a análise exploratória dos dados, com o objetivo de observar o comportamento dos mesmos. É importante por permitir que algumas pressuposições geoestatísticas possam ser atendidas, especialmente a não tendenciosidade. Esta análise inicial é constituída da determinação de medidas de posição (média e mediana), medidas de dispersão (desvio padrão e

coeficiente de variação) e avaliação da normalidade, por meio do histograma de frequência e verificação de dados discrepantes, utilizando-se o gráfico box plot das informações das variáveis em estudo.

Para modelar os padrões espaciais foi utilizada a análise geoestatística com o ajuste do semivariograma, a qual utiliza uma função numérica denominada semivariância, para avaliar a dependência espacial de uma característica em função da distância entre pontos amostrados (ANDRIOTTI, 2003), sendo assim, quanto mais próximos estão dois pontos, menor a probabilidade de variância entre os valores (ASSUMPÇÃO et al., 2007). Os valores de semivariância são encontrados pela seguinte fórmula:

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

Onde:

$y(h)$  = semivariância da variável  $Z(X_i)$ ;  $h$  = distância; e  $N(h)$  = o número de pares de pontos medidos  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separados por uma distância  $h$ .

O semivariograma é composto pelo efeito pepita ( $\tau^2$ ), que corresponde ao valor da semivariância para as menores distâncias e indica a variação ao acaso ou erraticidade na porção inicial do semivariograma; o patamar ( $\tau^2 + \sigma^2$ ), que representa a estabilização dos valores do semivariograma aproximadamente igual à variância dos dados; a contribuição ( $\sigma^2$ ), que é dada pela diferença entre o patamar ( $\tau^2 + \sigma^2$ ) e o efeito pepita ( $\tau^2$ ) e; o alcance ( $\phi$ ), que é definido pela distância onde o semivariograma alcança o patamar e indica o limite onde as unidades amostrais estão correlacionadas entre si (VIEIRA, 2000). Com os dados de semivariância foram gerados gráficos denominados semivariogramas, que demonstram com maior clareza a dependência de um atributo em função da distância entre dois pontos (GUIMARÃES, 2004).

No presente estudo ajustou-se o modelo Exponencial, por meio da expressão:

$$\rho(?) = \tau^2 + \sigma^2(1 - e^{-h/\phi}) \quad (2)$$

Onde:

$\rho(?)$  = semivariância da variável de interesse;  $\tau^2$  = efeito pepita;  $\tau^2 + \sigma^2$  = patamar;  $\phi$  = alcance;  $h$  = distância entre os pares de pontos; e  $e$  = exponencial.

O ajuste do modelo espacial exponencial ao semivariograma é desenvolvido por métodos matemáticos, estimando-se os parâmetros. Neste trabalho foram testados os métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o método de ajuste denominado de “a sentimento” e o método da Máxima Verossimilhança (MV).

No método de ajuste “a sentimento”, escolhe-se um modelo que será sobreposto aos pontos estimados, e a partir de uma nuvem de pontos obtém-se a estimativa dos parâmetros do semivariograma, por meio de uma avaliação visual. O processo deve ser repetido até que se obtenha um modelo adequado. Quanto ao do mínimos quadrados ordinários, o ajuste também é efetuado com base nos pontos do semivariograma experimental, e consiste em obter os valores dos parâmetros de um modelo que minimizam a soma do quadrado da diferença entre os valores observados e os estimados. Já nos ponderados, utiliza-se a mesma lógica do MQO, a diferença é que dividimos pelo número de pares de pontos em cada distância, que é uma tentativa de ponderar a semivariância em função do número de pares de pontos que gerou cada ponto no semivariograma. O método de máxima verossimilhança tem sido uma técnica de estimação utilizada com maior frequência, o ajuste por este método ocorre a partir dos dados, e não mais utilizando o gráfico do semivariograma empírico. A ideia central do método é: para um determinado conjunto de dados observados, qual é o melhor conjunto de parâmetros que maximiza a função de verossimilhança.

Após o ajuste do modelo, foi obtido o grau de dependência espacial (GD), expresso pela razão percentual entre o efeito pepita ( $\tau^2$ ) e o patamar ( $\tau^2 + \sigma^2$ ), que representa a porção da variabilidade espacial devida ao acaso. A classificação adotada é a seguinte: GD < 25% (grau de dependência fraco), entre 25 e 75% (moderado) e > 75% (forte), conforme Cambardella et al. (1994). Considerou-se também que os valores para o erro médio reduzido (EMR) devem estar o mais próximo de zero possível.

O ajuste foi avaliado com base no maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e na validação cruzada, a qual consisti em estimar o valor de cada unidade amostrada, por meio do semivariograma ajustado, e plotar os valores observados em função dos estimados.

A interpolação e a espacialização foram realizadas pelo método da krigagem ordinária pontual, que utiliza médias locais ou tendências locais estimadas a partir dos elementos amostrais vizinhos, dessa forma, os pontos próximos da posição a ser interpolada têm maiores pesos que os mais distantes, e ainda, as distâncias consideradas não são somente entre o ponto a ser predito e os vizinhos, mas também entre os vizinhos (SILVA JÚNIOR, 2001). As análises estatísticas, exploratórias e geoestatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional R Core Team (2016) com apoio dos pacotes GeoR (RIBEIRO JUNIOR e DIGGLE, 2001), sendo os mapas temáticos exportados e confeccionados com o software ArcGis versão 10.2 (DEMERRIT e ESRI, 2013).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Após obter a altura média das árvores dominantes e o volume por hectare, foi realizada a análise estatística descritiva dos dados, os quais são apresentados na Tabela 1, e posteriormente foram avaliadas espacialmente.

TABELA 1 - Análise estatística descritiva da altura dominante e volume, aos treze anos de idade, Alta Floresta - MT.

Medidas de posição e dispersão	Altura dominante (m)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)
Mínimo	12,36	29,88
Média	17,01	119,61
Mediana	17,21	115,70
Máximo	20,46	201,81
Desvio padrão	1,54	41,10
Coefficiente de variação (%)	9,10	34,36

Fonte: Autor (2016)

Nota-se pelos valores dos coeficientes de variação (Tabela 1) que a altura dominante ( $H_{dom}$ ) é mais homogênea que o volume do povoamento ( $V$ ), uma vez que sua variabilidade está associada ao somatório dos volumes individuais e esses, por sua vez, resultantes da combinação de variáveis dendrométricas (diâmetro a 1,3 m do solo, a altura e a forma), já a altura dominante é uma variável pouco afetada pelas interferências no povoamento. O mesmo comportamento se observa ao analisar o desvio padrão.

Na Figura 2 observa-se o comportamento da distribuição e simetria do conjunto de dados em relação aos valores médios da altura dominante (A) e do volume por hectare (B). O gráfico “box-plot” permitiu verificar a presença de dados candidatos a “outliers” ou discrepantes. Contudo, neste estudo não foram removidos outliers que ocorreram na variável altura, por se tratarem de valores válidos de alturas dominantes, os quais foram analisados também sobre a ótica da distribuição espacial nos eixos x e y, bem como seu histograma, são valores que refletem a estrutura da floresta em questão, onde parcelas localizadas em sítios menos produtivos apresentaram crescimento menor e, conseqüentemente,

valores menores das características avaliadas. Por outro lado, aquelas situadas em locais mais produtivos apresentaram maior crescimento das variáveis mensuradas. Assim, as diferenças marcantes de crescimento entre parcelas fizeram aparecer valores que pudessem ser vistos como discrepantes.

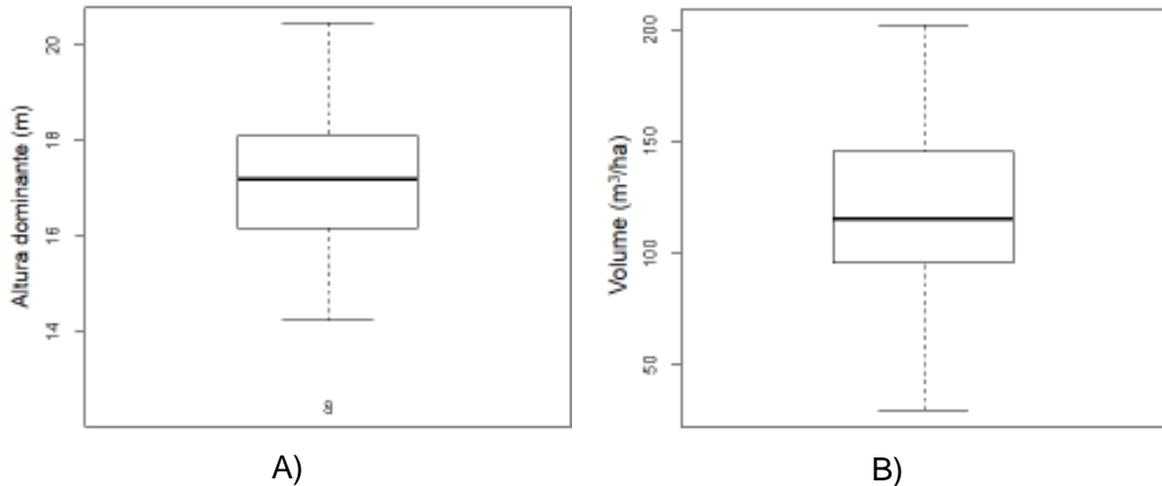


FIGURA 2 - Gráficos box-plot da dispersão da altura dominante (m) e do volume (m<sup>3</sup>/ha).  
Fonte: Autor (2016)

Na Figura 3 e 4 pode-se verificar os principais gráficos a serem observados numa análise exploratória de dados. Inicialmente (Figuras 3A e 4A), observam-se regiões semelhantes das parcelas representadas pelos símbolos. Nas letras (b) e (c) estão apresentados os gráficos que mostram o comportamento das variáveis regionalizadas (altura dominante e volume por hectare) em relação a direção da coordenadas “x” e “y”. Observa-se que o comportamento da variável volume ocorreu de maneira mais homogênea, quando comparada com a variável altura dominante. Verificou-se a inexistência de tendência nos valores de volume por hectare nestas duas direções. Esta é uma característica importante em estudo geoestatísticos, pois na presença de tendência não há estacionaridade, o que comprometeria a Hipótese Estacionária de 1ª Ordem, inviabilizando a aplicação das técnicas geoestatísticas (DIGGLE e RIBEIRO JÚNIOR, 2007).

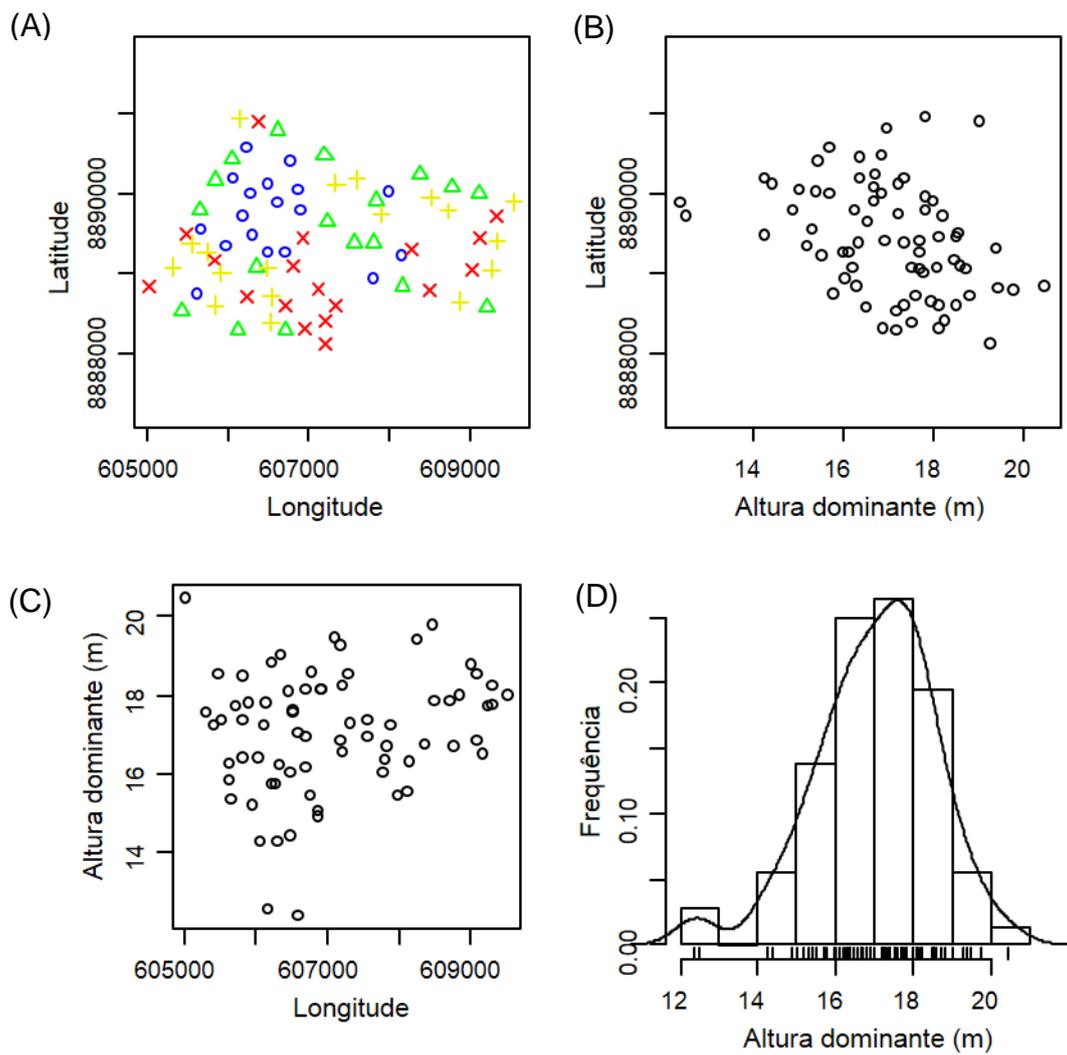


FIGURA 3 - Gráficos exploratórios da altura dominante; (A) Parcelas subdivididas em quartis; (B) relação da altura dominante com a latitude; (C) relação da altura dominante com a longitude; e (D) histograma de frequência.  
 Fonte: Autor (2016)

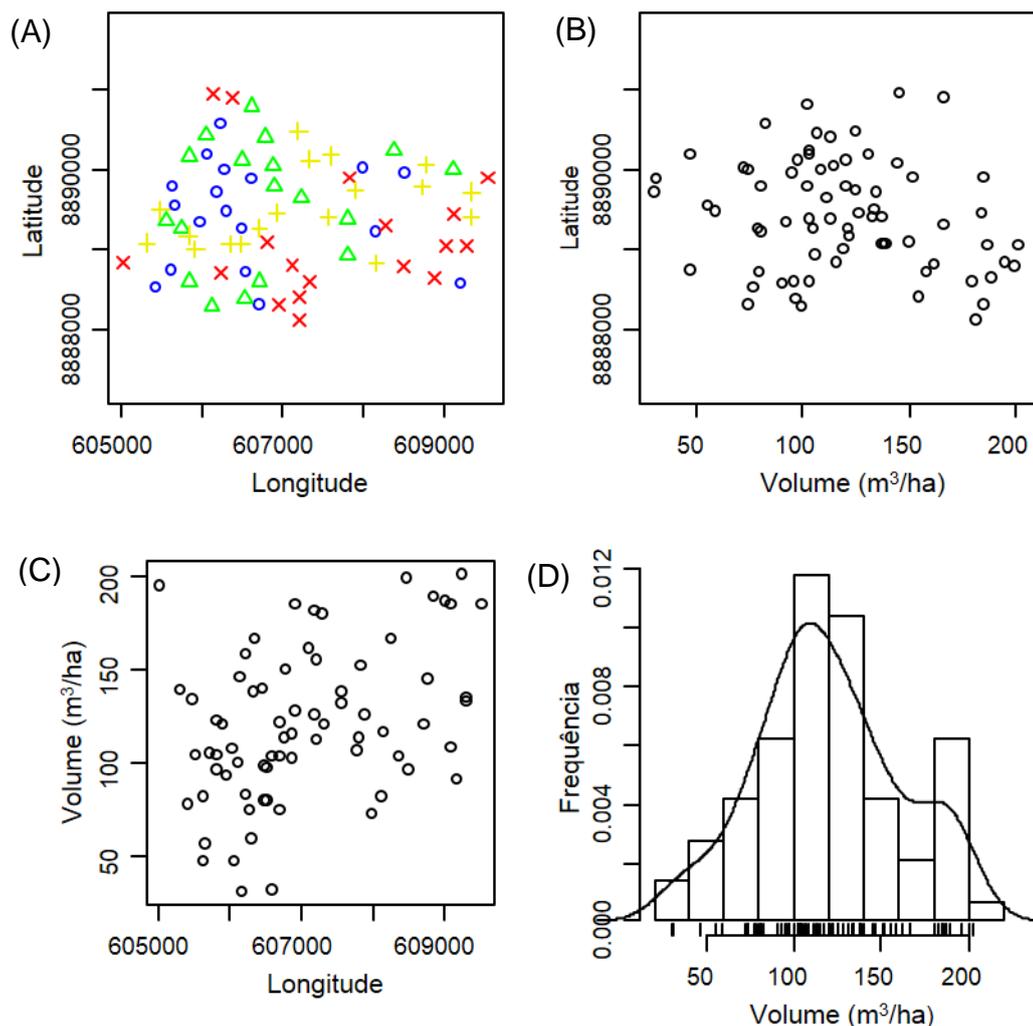


FIGURA 4 - Gráficos exploratórios do volume por hectare; (A) Parcelas subdivididas em quartis; (B) relação do volume com a latitude; (C) relação do volume com a longitude; e (D) histograma de frequência.

Fonte: Autor (2016)

Quanto ao histograma, letra (d) das Figuras 3 e 4, observou-se que as variáveis em estudo, desconsiderando a relevância de uma possível estrutura de dependência espacial tem distribuição normal, sendo confirmado pela estatística do teste “W” de Shapiro-Wilk, o qual revelou que a variável altura dominante e volume apresentou distribuição normal na área experimental, obtendo valores de  $W= 0,9751$  e  $W= 0,9795$ , respectivamente, ao nível de significância  $\alpha = 5\%$ .

As maiores densidades para a altura dominante foram encontrados entre as classes de 16 a 18m, já para o volume por hectare foram entrados nas classes de 100 e 120 (m³/ha).

### 3.2 MÉTODOS DE AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMAS

A análise variográfica mostrou que as características estudadas apresentaram-se estruturadas espacialmente, com semivariância com comportamento modelável. O comportamento do modelo de semivariograma exponencial ajustado pelos métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o método de ajuste denominado de “a sentimento” e o método da Máxima Verossimilhança (MV) pode ser analisado por meio do grau de dependência espacial (GD), erro médio, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela validação cruzada. Na Tabela 2, apresentam-se as estimativas dos semivariogramas ajustados.

TABELA 2 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados pelo modelo Exponencial para altura dominante e volume da teca, nas idade de 13 anos, em Alta Floresta-MT.

Método de Ajuste	$\sigma^2$	$\phi$ (m)	$\tau^2$	$\tau^2 + \sigma^2$	EMR	GD (%)	$R^2$	Validação cruzada		
								a	b	$R^2$
Altura dominante (m)										
“a sentimento”	2,36	718,37	0,67	3,03	0,25	77	0,71	1,05	0,94	0,24
MQO	2,63	441,50	0,18	2,81	0,18	93	0,49	2,15	0,88	0,25
MQP	2,81	412,62	0,0	2,81	0,13	100	0,46	2,20	0,87	0,24
MV	2,04	573,55	0,38	2,42	0,26	84	0,61	1,68	0,90	0,32
Volume ( $m^3/ha$ )										
“a sentimento”	1340,19	805,44	452,77	1792,96	0,37	74	0,93	11,29	0,93	0,20
MQO	984,30	1116,21	854,50	1838,80	0,26	53	0,92	12,29	0,92	0,19
MQP	990,68	931,97	790,50	1781,18	0,27	55	0,93	16,00	0,89	0,17
MV	1332,7	476,4	384,5	1717,2	0,33	77	0,89	22,84	0,83	0,15

Onde:  $\sigma^2$  = variância espacial;  $\Phi$  = alcance;  $\tau^2$  = efeito pepita;  $\tau^2 + \sigma^2$  = patamar; EMR = erro médio reduzido; GD = grau de dependência espacial;  $R^2$  = coeficiente de determinação; a = coeficiente linear e b = coeficiente angular.

Fonte: Autor (2016)

Os ajustes dos semivariogramas mostraram que tanto para a altura dominante ( $H_{dom}$ ) da teca como para o volume por hectare apresentaram dependência espacial e predominância de melhor ajuste pelo método da Máxima Verossimilhança. As variáveis dendrométricas analisadas apresentaram grau de dependência espacial (GD%) maior que 75% (método da Máxima Verossimilhança), podendo ser classificadas como características de dependência espacial forte. Isso mostra que as estimativas com o modelo exponencial, considerando a componente espacial, trará boas estimativas de representação dos dados interpolados da variável no espaço.

Quanto ao efeito pepita ( $\tau^2$ ) foram verificados baixos valores para a variável altura dominante, o que indica satisfatoriedade dos ajustes dos semivariogramas, exceto quando se utilizou o método dos Mínimos Quadrados Ponderados, esse comportamento se repete quando se analisa os resultados do volume por hectare, sendo que os menores valores do erro na porção inicial do semivariograma foram obtidos utilizando o método da Máxima Verossimilhança.

O alcance ( $\phi$ ) apresentou valores diferentes para a altura dominante e o volume da teca. Para a volume obteve-se o mínimo de 476,4 m e o máximo de 1116,21 m. Quando se analisa a altura dominante, essa variação aumenta com valores entre 412,62 e 718,37 m, onde a maior distância foi encontrada ao se utilizar o método de ajuste “a sentimento”.

A distância mínima entre as parcelas foi de 444 m e a máxima de 555 m, calculada pela distância euclidiana, sendo encontrado neste estudo um alcance de 573,55 m para a variável altura dominante e de 476,4 m para o volume, acima do valor da distância mínima entre as unidades amostrais, o que é desejável para estudos geoestatísticos e geração de mapas de interpolação. Esse parâmetro reflete diretamente o grau de continuidade espacial da característica avaliada. Quanto maior for o alcance, mais estruturado espacialmente será a variável regionalizada. O parâmetro alcance relaciona-se de forma inversa com o efeito pepita. Quanto maior o efeito pepita, menor o alcance, ou seja, há muita variação ao acaso no processo; logo, a semelhança entre as parcelas diminui à medida que aumenta a distância entre elas (SOARES, 2000).

Em relação ao erro médio reduzido (EMR) encontrou-se valores menores para o volume em m<sup>3</sup> por hectare (0,13 a 0,26), para a altura dominante obteve-se erros variando de 0,26 a 0,37 m.

Os valores dos coeficientes de regressão ( $R^2$ ) dos semivariogramas foram acima de 0,89 para o volume, isto demonstra a obtenção de ajustes apropriados dos semivariogramas para as estimativas do volume em locais não amostrados. O mesmo não ocorre para a altura dominante, obtendo valores que variam de 0,46 a 0,71 m.

Nas Figuras 5 e 6 estão apresentados os semivariogramas e as linhas referentes aos métodos de ajustes testados pelo modelo exponencial.

Analisando o desempenho geral dos métodos de ajuste dos semivariogramas para a altura dominante fica evidente a superioridade do método da Máxima Verossimilhança. Enquanto que o método dos Mínimos Quadrados Ponderados apresentou grande quantidade do efeito pepita (Figura 5).

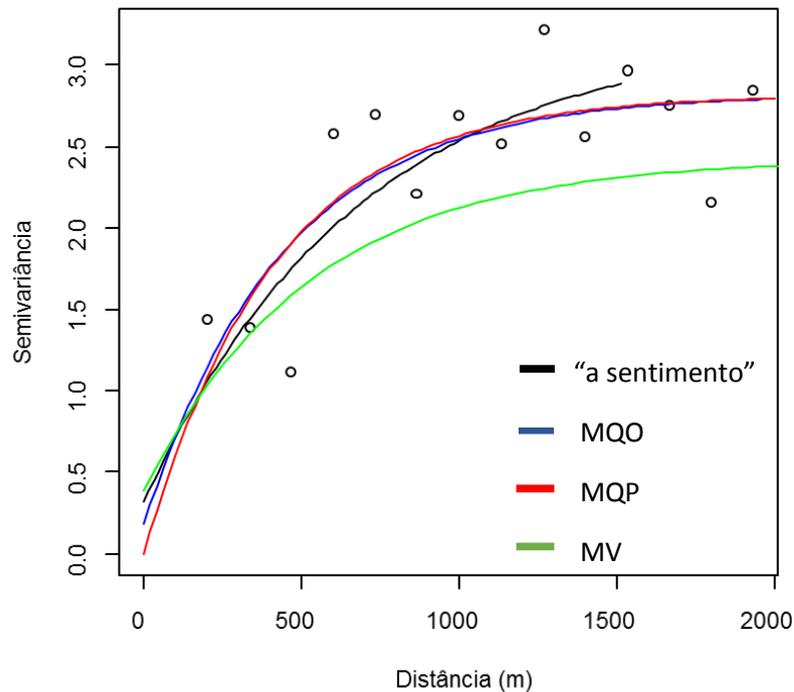


FIGURA 5 - Modelos ajustados ao semivariograma para altura dominante conforme os Métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o método de ajuste “a sentimento” e o método da Máxima Verossimilhança (MV).  
Fonte: Autor (2016)

Quando se analisa o desempenho geral dos métodos de ajuste dos semivariogramas para o volume as linhas dos quatro métodos se distinguem. Sendo que, o método dos Mínimos Quadrados Ordinários e Mínimos Quadrados Ponderados apresentaram uma maior quantidade do efeito pepita, não sendo indicado para o ajuste neste conjunto de dados (Figura 6).

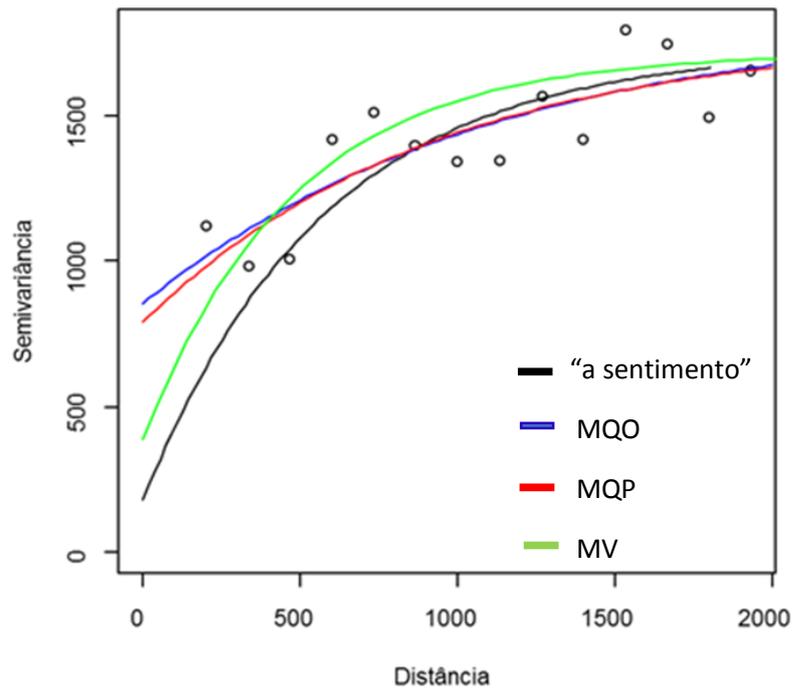


FIGURA 6 - Modelos ajustados ao semivariograma para o volume por hectare conforme os Métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o método de ajuste “a sentimento” e o método da Máxima Verossimilhança (MV).  
 Fonte: Autor (2016)

Segundo Mello et al. (2005) a seleção de um modelo em qualquer método, analisando apenas o comportamento dos gráficos pode ser questionável. A seleção do modelo correto, que representa adequadamente as semivariâncias, principalmente nas pequenas distâncias, é altamente desejável no processo de krigagem (NIELSEN e WENDROTH, 2003).

Analisando o comportamento dos métodos, verificou-se superioridade no Método da Máxima Verossimilhança, devido aos bons ajustes encontrados, como grau de dependência espacial e coeficiente de determinação. Este resultado, de certa forma era esperado, uma vez que o princípio do método consiste em maximizar o melhor conjunto de parâmetros dentre os possíveis, para uma dada base de dados, convergindo com o encontrado por muitos autores sobre o mesmo tema.

Após a obtenção dos ajustes e constatada a dependência espacial entre as amostras, procedeu-se a interpolação, por meio da krigagem ordinária pontual, para a confecção da distribuição espacial do volume e da altura dominante da teca, na idade de 13 anos, em Alta Floresta, Mato Grosso, baseado no ajuste do modelo exponencial pelo método de máxima verossimilhança (Figura 7).

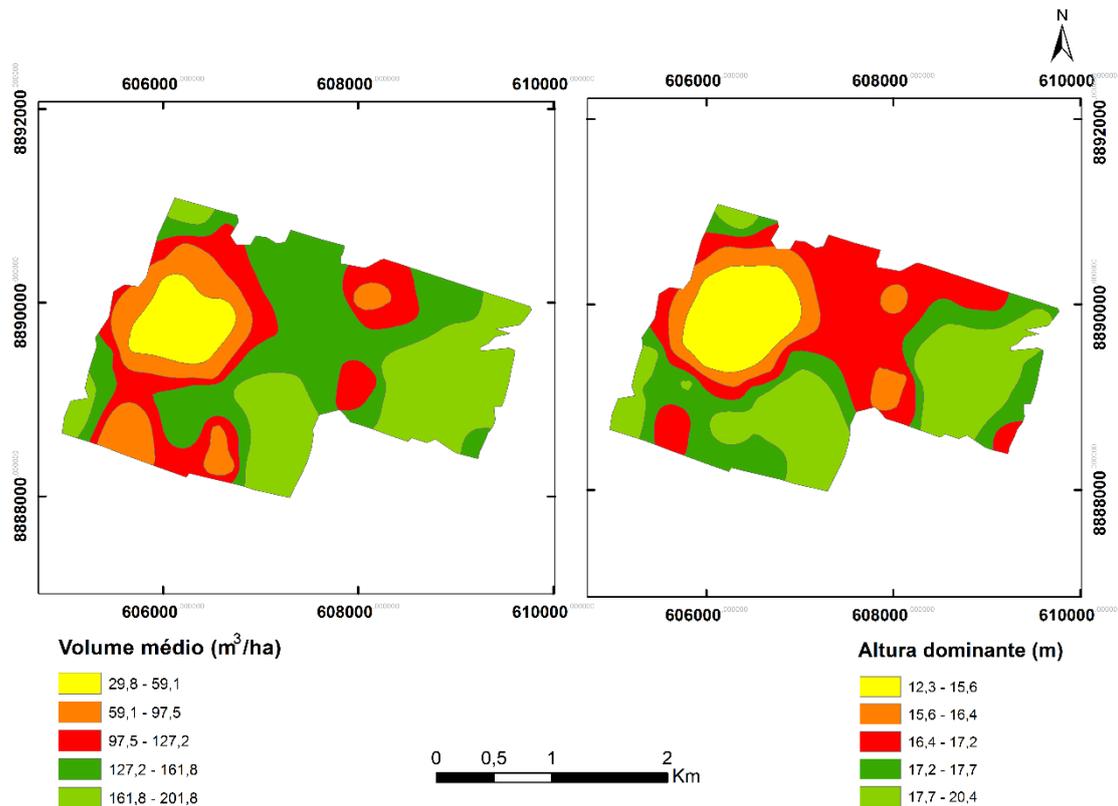


FIGURA 7 - Mapas temáticos da distribuição espacial do volume por hectare e da altura dominante para *Tectona grandis*.  
Fonte: Autor (2016)

Os resultados obtidos se assemelham aos encontrados por Silva (2012) ao realizar a classificação da produtividade para o plantio estudado, encontrando limites para altura dominante de 11,8 a 19,12 m. A semelhança na distribuição espacial do volume por hectare da teca (Figura 7) e da altura dominante ratificaram os ajustes geoestatísticos satisfatórios, possibilitando individualizar locais específicos, que podem sofrer intervenção e serem regulados de maneira específica, visando resposta locais que resultem no aumento na qualidade da produção.

Dessa forma, pode-se indicar para os sítios mais produtivos desbaste seletivo e menos intensivo visando a produção de toras longas, em atendimento ao mercado internacional, bem como, para os sítios de produtividade inferior, desbastes com a finalidade de melhorar a produção do local, com aproveitamento das toras curtas para diversos produtos como bloco e painéis.

#### 4. CONCLUSÕES

O modelo exponencial de semivariograma foi eficiente para modelar a variabilidade espacial dos dados de altura dominante e volume por hectare do povoamento de *Tectona grandis* em Alta Floresta - MT, destacando o método da Máxima Verossimilhança, sendo recomendado para estudos associados à aplicação da geoestatística no área florestal.

A krigagem ordinária mostrou-se eficaz para estratificar a altura dominante e o volume em unidades produtivas no povoamento florestal em estudo. Este fato foi constatado com a pequena diferença entre a classificação da produtividade advindos do inventário, indicando sítios de maior ou menor produtividade, permitindo que esta ferramenta seja utilizada com confiança nos dados da predição dessas variáveis.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Metorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6. p. 711-728. 2014.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.

ASSUMPÇÃO, R. A. B.; URIBE-OPAZO, M. A.; GODOY, E.; JOHANN, J. A. Uso da krigagem indicadora na avaliação da probabilidade da produtividade de soja segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 165-171, 2007.

BORSSOI, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; GALEA, M. Técnicas de diagnóstico de influência local na análise espacial da produtividade da soja. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 376–387, 2011.

BRANDELERO, C.; ANTUNES, M. U. F.; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento florestal. **Ambiência**, v. 3, n. 2, p. 269–281, 2007.

CAMINO, R.; MORALES, J. P. Las plantaciones de teca em América Latina: mitos y realidades. **CATIE - Informe Técnico**, n. 397, 2013, 392 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil

properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CHAVES, E.; FONSECA, W. Teca (*Tectona grandis* L.F.) árbol de uso múltiple em América Central. Turrialba, **CATIE - Informe Técnico**, n. 179, 1991. 47 p.

DEMERRITT, M.; ESRI. Build Mapping Applications Faster than Ever with ArcGIS 10.2 Runtime, in <<http://www.esri.com/esri/news/releases/13-4qtr/build-mapping-applications-faster-than-ever-with-arcgis-10>>.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., 2000, Caxambú. **Resumos...**Caxambú: Associação Brasileira de Estatística, 2000, 192 p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 78 p.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 435–443, 2007.

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.

KRISHNAPILLAY, B. Silviculture and management of teak plantations. **Unasyuva**, v. 51, n. 201, p. 14-21, 2000.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 1, p. 25-37, 2005.

NIELSEN, D. R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: sampling fields soils and their vegetation**. Cremlingen-Destedt: Catena Verlag, 2003. 398 p.

OLIVEIRA, B. R. **Determinação do volume de cerne produzido em árvores de *Tectona grandis* L. f. em Mato Grosso**. 2014. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT.

PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasyuva**, Roma, v. 51, n. 201, 3-13, 2000.

PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R.; SANTOS, V. S dos. Modelagem geoestatística da dinâmica espacial da altura dominante de *Tectona grandis* L. f. (teca). **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 1249–1260, 2012.

PELISSARI, A. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CALDEIRA, S. F.; MACHADO, S. A. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca em períodos pré-desbaste seletivo. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, p. 430-444, 2014.

R Core Team (2016). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: A package for geostatistical analysis. **R - News**, 2001.

SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 217 - 230, 2010.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. UFLA/FAEPE, Lavras, 2004. 285 p.

SHIMIZU, J. Y.; KLEIN, H.; OLIVEIRA, J. R. V. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso**. Cuiabá: Central de Texto, 2007. 63 p.

SILVA, F. R. **Crescimento e Produção de *Tectona grandis* L. f. em um plantio no município de Alta Floresta, Mato Grosso**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá MT.

SILVA, F. R.; SILVA, V. S. M.; MIRANDA, S. O. Crescimento de *Tectona grandis* em uma plantação no município de Alta Floresta, Mato Grosso. **Floresta**, v. 44, n. 4, p. 577-588, 2014.

SILVA JÚNIOR, R. L. de. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade**. 2001. 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SOARES, A. G. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: **ISTPress**, 2000. 186 p.

SPIAZZI, F. R.; BORGES, S. C.; SOTHE, C. NETO, S. L. R. Avaliação da estrutura espacial de um povoamento de *Pinus* sp. com o uso de SIG e da geoestatística. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 1773-1777, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBSR, 2011, INPE.

VIEIRA, S. R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 01-54, 2000.

WEAVER, P. L. **Tectona grandis L. f. Teak**. New Orleans: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1993. 18 p.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; PIRES, C. A. F.; MADRUGA, P. R. A.; KILCA, R. V.; BRUN, E. J.; SILVA, C. R. S.; VACCARO, S.; RONDON NETO, R. M. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de Floresta Estacional Decidual. **Ciência Florestal**, v.19, p.383-391, 2009.

## Anexos (Códigos em R)

```
## Rotinas do pacote geoR usados na análise dos dados.
## Autoria: Dr. José Marcio de Mello
## Modificado por: Fabricia Rodrigues da Silva
#####

## Gerar um objeto (dados) data.frame ##
- dados=read.table("dadosTCC.txt",header=T,dec=",")

## Carregando pacote ##
- library(geoR)

## Análise Exploratória ##
-dados=read.geodata("dadosTCC.txt",header=T,dec=",",coords.col=7:8,
data.col=5)
- summary(dados)
- shapiro.test(dados$data)
- var(dados$data)
- apply(dados$coords,2,range)
- boxplot(dados$data)
- hist(dados$data,xlab="Classe de valores",ylab="Frequência",main=NULL,
prob=T)
- plot(dados)

## Construção do semivariograma ##
- variog=variog(dados,uvec=12,max.dist=200,pairs.min=20)
- plot(variog)

## Ajuste de modelos ao variograma empírico ou experimental ##
# A sentimento #
- mod1=eyefit(variog)
```

```

- lines(mod1,col="red")
# Mínimos Quadrados Ordinários #
- mod2=variofit(variog,ini=c(1200,1000),nug=600,wei="equal")
- lines(mod2,col="yellow")
# Mínimos Quadrados Ponderados #
- mod3=variofit(variog,ini=c(1200,1000),nug=600)
- lines(mod3,col="black")
# Método da máxima verossimilhança #
- mod4=likfit(dados,ini=c(1200,1000),nugget=600)
- lines(mod5,col="pink")
# Validação cruzada #
- valida.mod1=xvalid(dados,model=mod1)
- Realizar para todos os modelos!
# Calcular o erro #
- EMR1=sum(valida.mod1$std.error)
- Realizar para todos os modelos!
# Calcular o desvio padrão #
- desvio1=sqrt((sum((valida.mod1$std.error)^2))/72)
- Realizar para todos os modelos!

# # Krigagem # #
- limite=read.table("limiteTCC.txt",header=T)
- loc=expand.grid(seq(605022,609536,l=200),seq(8888108,8890932,l=200))
- plot(loc)
- lines(limite,col="red")
- kc=krige.conv(dados,loc=loc,border=limite,krige=krige.control(obj=mod4))
- mapa1=image(kc,loc=loc,border=limite,val=kc$predict,col=gray(seq(1,0.1,l=12)))
- mapa1=image(kc,loc=loc,border=limite,val=kc$predict)
- legend.krige(c(605022,609536),c(8888108,8890932),cex.leg=0.7,
val=kc$predict,off=0.8)

```