

# **Análise da distribuição e correlação espacial de variáveis dendrométricas de um plantio florestal com uso da Geoestatística**

Camile Söthe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
camile.sothe@dsr.inpe.br

**Resumo.** O método geoestatístico, diferentemente da estatística clássica, permite avaliar melhor as estruturas de dependência espacial entre diversas variáveis. O objetivo do trabalho foi verificar a distribuição e correlação espacial das variáveis dendrométricas altura e diâmetro a altura do peito (DAP), e a cota altimétrica, de um plantio florestal não-manejado de Eucalipto, aplicando o método geoestatístico krigeagem ordinária. Pretendeu ainda a comparação deste método com o método determinístico baseado na interpolação pela média ponderada pelo inverso do quadrado da distância. Os resultados obtidos através dos semivariogramas mostraram o comportamento anisotrópico das variáveis, porém impossibilidade de se conseguir um bom ajuste direcional para a variável DAP. Isso pode ser atribuído à heterogeneidade do plantio florestal estudado, devido a fatores como a falta de manejo, acentuado efeito de borda e presença de outras espécies, que influenciam no maior ou menor crescimento das árvores em DAP. O melhor ajuste ocorreu para a variável altitude, o que reflete a continuidade espacial do relevo. Verificou-se que existe uma correlação positiva entre as variáveis altura e DAP, coeficiente de correlação linear de 0,633, porém nenhuma relação entre essas variáveis com a cota altimétrica. Na validação dos resultados verificou-se que a interpolação pela krigeagem ordinária alcançou melhores resultados que a média ponderada para a variável altura, porém, para o DAP, este último obteve melhores resultados. Pode-se concluir que o conhecimento da continuidade e correlação espacial de variáveis dendrométricas nas análises de inventário permite inferir sobre o povoamento florestal e, desta forma, podendo ser utilizados para o planejamento do manejo florestal.

**Palavras-chave:** Krigeagem; Interpolação; Variáveis Dendrométricas.

## **1. Introdução**

Uma das características de um plantio florestal é a sua aparente homogeneidade se comparados a fragmentos florestais nativos. No entanto, mesmo que não tão evidentes, ocorrem variações significativas ao longo de um plantio florestal devido a vários fatores como o solo, topografia, altimetria, efeitos de borda, idade, variações na prática silvicultural de plantio, dentre outros. No efeito de borda, as árvores situadas nas extremidades do povoamento tendem a apresentar um diâmetro maior, visto que estas têm mais espaço para se desenvolver. Outro fator que se pode considerar é a idade do povoamento, sendo que povoamentos jovens tendem a ter um maior crescimento em altura do que em diâmetro. Dessa forma, o conhecimento dessas variações é importante para agregar maior precisão em atividades de inventário e manejo florestal.

Segundo Mello (2004), os métodos tradicionais usados para análise de inventários florestais utilizam uma medida de tendência central (média), obtida de uma amostra (conjunto de parcelas), e uma medida de dispersão (variância) para descrever um determinado fenômeno. No entanto, esses métodos não levam em consideração as possíveis correlações entre as observações vizinhas, não explorando 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. Isso é de fundamental importância para o inventário, o manejo e o planejamento florestal (BOGNOLA et al., 2008).

Na geoestatística, o estimador krigeagem abrange um conjunto de métodos de estimação, sendo o mais usual a krigeagem ordinária (MAUNE et al., 2001). A diferença entre a

krigeagem e outros métodos de interpolação está na maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso da interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias (IQD), os pesos são definidos segundo esta alternativa através da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigeagem, o procedimento é semelhante ao da interpolação por média ponderada, exceto que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigeagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (MATOS, 2005).

No âmbito florestal, o uso de recursos como a interpolação, não somente está associado à geração de mapas, mas também ao planejamento da colheita, implantação e condução de povoamentos florestais. Amostrando-se apenas uma parcela dos indivíduos florestais, tais métodos permitem inferir sobre os dados dendrométricos dos demais indivíduos do povoamento florestal. Desta forma, podem auxiliar no planejamento da condução do povoamento florestal, além de economizar nos custos financeiros e humanos envolvidos em inventários florestais completos.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar, através da geoestatística, a distribuição e correlação espacial das variáveis dendrométricas DAP (diâmetro a altura do peito), altura e altimetria de árvores de um plantio florestal com a espécie exótica eucalipto e verificar a correlação espacial entre elas; a obtenção de mapas representativos com a distribuição espacial das variáveis e a comparação entre os resultados gerados pela interpolação geoestatística com o método determinístico pela média ponderada pelo IQD. Com isso, pretendeu-se analisar o potencial dos procedimentos realizados como ferramentas de apoio ao planejamento florestal.

## 2. Material e Métodos

O estudo foi realizado em um povoamento equiâneo misto de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. de 0,65 ha, localizado junto ao Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, campus da Universidade do Estado de Santa Catarina, situado nas coordenadas geodésicas médias 27°48'58"S e 50°19'34"O, e altitude média de 940m (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, com temperatura média de 14,3 °C.

Foram mensuradas 150 árvores de *Eucalyptus* sp., estas georreferenciadas com Estação Total a partir de uma base geodésica de apoio vinculada ao Datum horizontal SAD'69. Mediram-se os atributos de DAP e altura das árvores com auxílio da suta e clinômetro, respectivamente, e a altitude com o GPS.

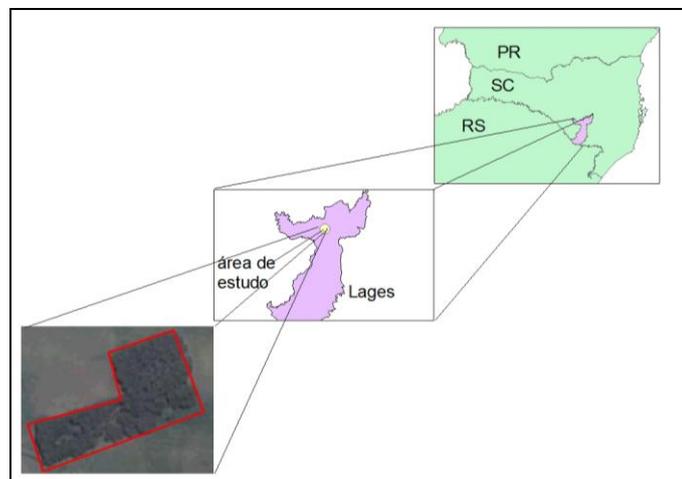
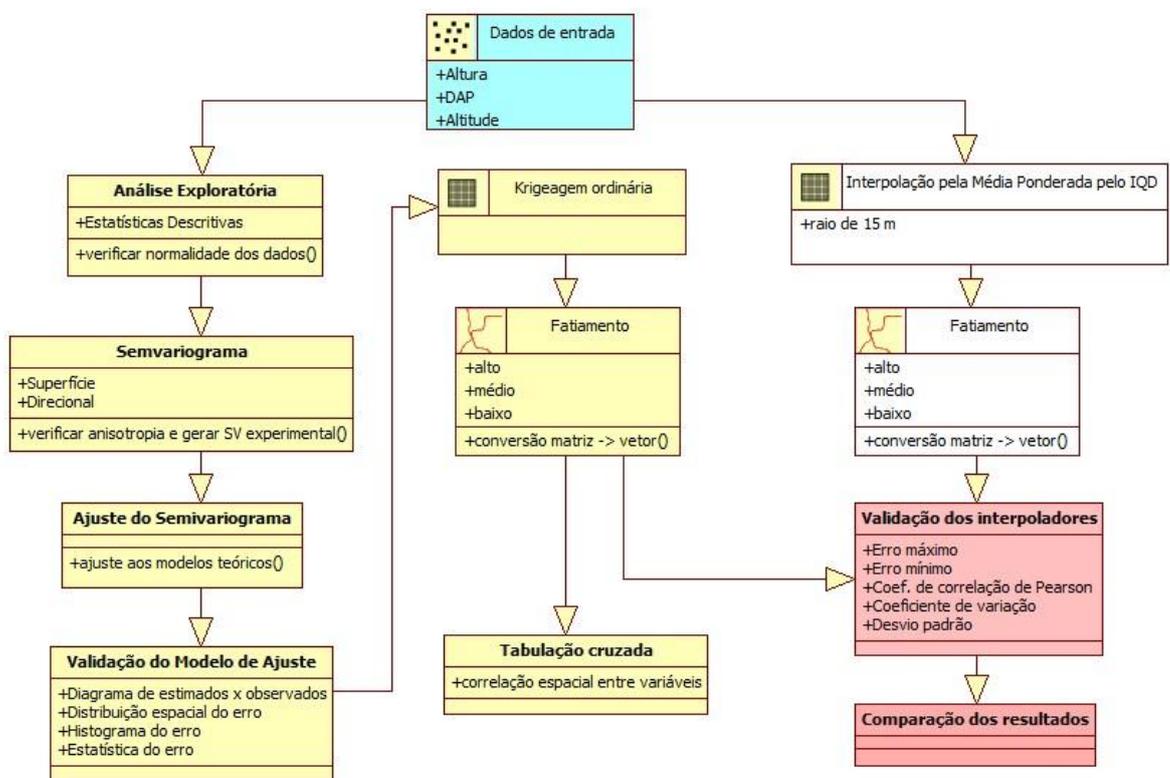


Figura 1. Localização da área de estudo.

A metodologia do trabalho encontra-se ilustrada na Figura 2. Primeiramente as amostras georreferenciadas foram editadas em arquivos *.spr* do tipo POINT3D e importadas no SPRING na categoria MNT, escala 1:1000. Editou-se um arquivo para cada atributo medido que, após importado, foi armazenado em um plano de informação (PI) próprio. A análise exploratória dos dados foi executada para verificar a normalidade dos mesmos. Após esta etapa, geraram-se os semivariogramas experimentais. Primeiramente, geraram-se semivariogramas de superfície para verificar o comportamento das variáveis que pode ser isotrópico (igual em todas as direções) ou anisotrópico (neste caso, o fenômeno ou variável apresenta eixos de maior e menor continuidade espacial conforme a direção). No primeiro caso, a determinação experimental do semivariograma depende apenas da distância entre as amostras. No segundo caso, a determinação do semivariograma depende tanto da distância entre as amostras como da direção relativa entre elas. Depois dessa etapa, foram gerados os semivariogramas experimentais direcionais, variando-se os parâmetros para alcançar a melhor estrutura possível.



**Figura 2.** Fluxograma com a metodologia do estudo.

Depois de gerados os semivariogramas experimentais, procedeu-se a escolha do modelo teórico de ajuste dos semivariogramas. Para isso observou-se, dentre outros critérios, o valor de Akaike e efeito pepita ( $C_0$ ), que devem ser os menores possíveis. O efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Também se buscaram modelos com maior contribuição ( $C_1$ ), parâmetro que relaciona a dependência espacial, ou seja, quanto do modelo é utilizado para descrever o comportamento do dado. De acordo com Vieira et al. (1998), quanto menor a proporção do efeito pepita em relação ao patamar ( $C_1+C_0$ ), maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor a variância da estimativa e, portanto, maior a confiança que se pode ter nas estimativas.

Na etapa seguinte, executou-se a interpolação por krigeagem ordinária para cada PI, com grade resolução 1x1. Definiu-se o valor mínimo de pontos de 4 e máximo de 16 no elipsoide de busca da krigeagem ordinária.

Em seguida executou-se o fatiamento da grade gerada na krigeagem segundo as classes indicadas na Tabela 1. A operação de fatiamento consiste em obter um campo temático a partir de um campo numérico, de modo de que cada ponto da área de estudo fique associado a um valor indicado, sob a forma de um conjunto de classes temáticas, os intervalos de valores registrados a partir de uma grade numérica (CORDEIRO, BARBOSA e CÂMARA, 2002). As amostras numéricas de cada variável foram classificadas nas classes baixo, médio e alto. Logo após, fez-se a conversão do PI do fatiamento de matriz para vetor, de forma a se obter uma representação por classes do resultado gerado. Os mapas finais com o fatiamento das classes foram confeccionados no aplicativo SCARTA, vinculado ao SPRING.

**Tabela 1.** Valores das classes dos atributos estipuladas no fatiamento para gerar os mapas temáticos.

Atributos	Classes		
	Baixo	Médio	Alto
Altura (m)	18,2-23,8	23,8-29	>29
DAP (cm)	16-43	43-70	>70
Altitude (m)	901-905	905-909	>909

Na etapa seguinte foi realizada a técnica de tabulação cruzada entre os mapas temáticos de cada variável. Essa operação objetivou quantificar as intersecções entre as classes de dois PIs correspondentes ao fatiamento de cada variável.

Além desses métodos, utilizou-se o diagrama de dispersão para analisar o confronto entre os dois produtos. Esse diagrama é uma representação gráfica para dados bivariados, em que cada par de dados é representado por um ponto de coordenadas, num sistema de eixos coordenados. Ele descreve o relacionamento entre duas variáveis, isto é, entre dois conjuntos de dados ou de duas distribuições. Para verificar se existe relação entre duas variáveis e o grau de associação destas, calculou-se o coeficiente de correlação linear ( $r$ ). É quantificado em uma escala adimensional, que em cada valor absoluto vai de zero à unidade, ou seja, que corresponde a um intervalo de -1 a +1. O grau de inter-relacionamento entre duas variáveis varia com o módulo do coeficiente, assim quanto maior o módulo do coeficiente, mais intensa é a associação linear entre as duas variáveis. Se o coeficiente de correlação linear for +1, a associação é positiva perfeita (as duas variáveis crescem juntas), por outro lado, se for -1, é negativa perfeita (enquanto uma variável cresce a outra diminui) e por fim se for igual a 0 (zero), não há associação entre as duas variáveis.

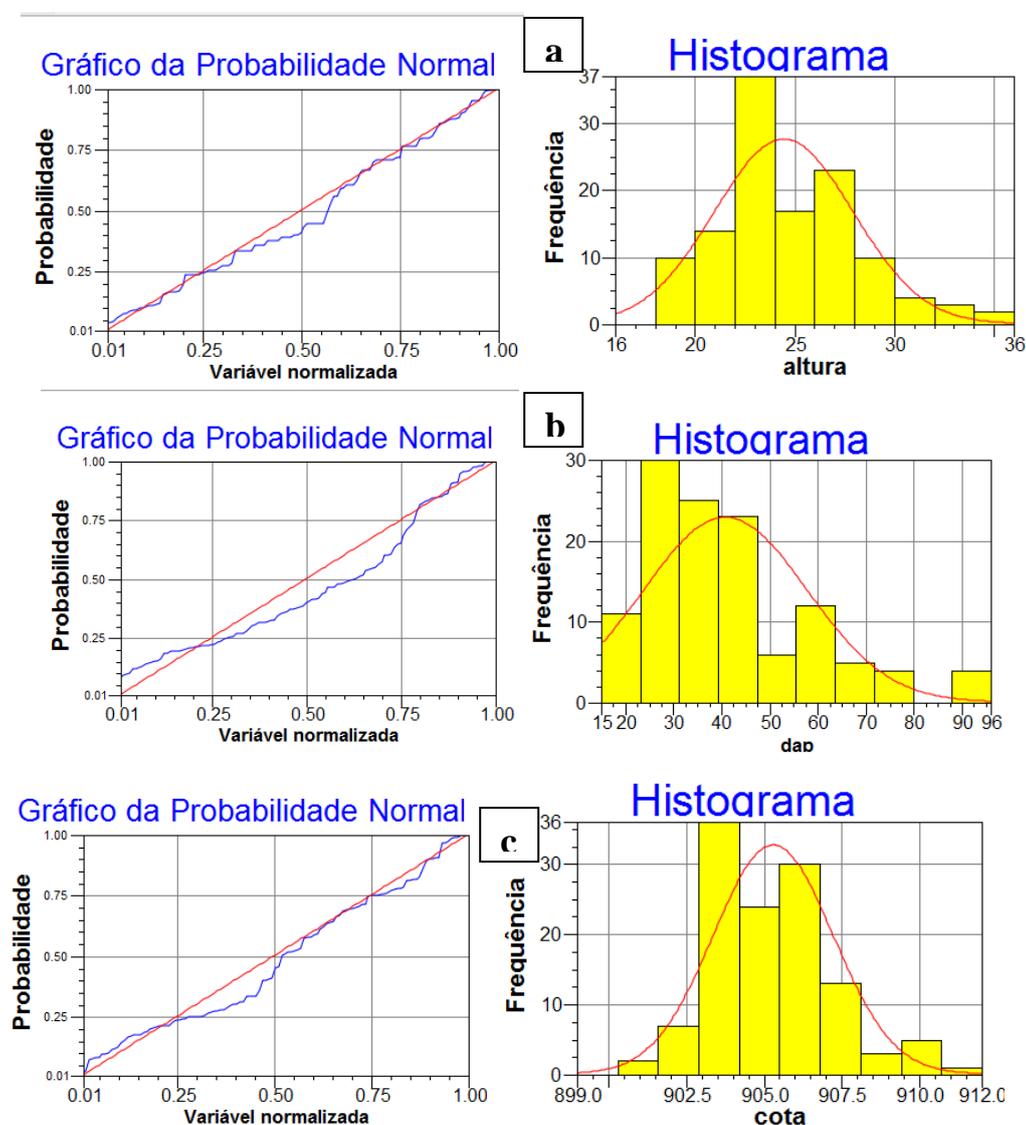
Por fim, para fins de comparação com o método probabilístico da krigeagem, executou-se a interpolação dos dados pelo método determinístico média ponderada pelo inverso do quadrado da distância (IQD). Esta técnica pressupõe que coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes. Para predizer um valor para algum local não medido, o IQD usa os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta. Arbitrou-se um raio de 15 m, escolhido de acordo com o tamanho da área de estudo e distância entre as amostras, de forma que toda a área fosse interpolada. A potência do modelo escolhido foi 2 o tamanho do *pixel* 1x1. Após esse procedimento, executou-se o fatiamento das grades geradas por esse método de acordo com as classes da Tabela 1.

O desempenho dos interpoladores foi avaliado pela validação dos dados em comparação com 30 amostras separadas para teste, comparando os erros entre os valores estimados e observados.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Abordagem Geoestatística

Na análise exploratória, verificou-se que as amostras correspondentes aos três atributos apresentam distribuição próxima da normal (Figura 3). Na Tabela 2 nota-se que a variável DAP apresenta maior desvio padrão e maior coeficiente de variação, característica de amostras pontuais e com menor continuidade espacial. Verificou-se que, dentre as variáveis estudadas, o DAP das árvores é o que apresentou comportamento menos próximo da normalidade. Porém, pode-se observar que para as três variáveis, a média e a mediana são relativamente próximas. Quando o coeficiente de assimetria é mais próximo de zero indica que a distribuição é mais próxima da normalidade.

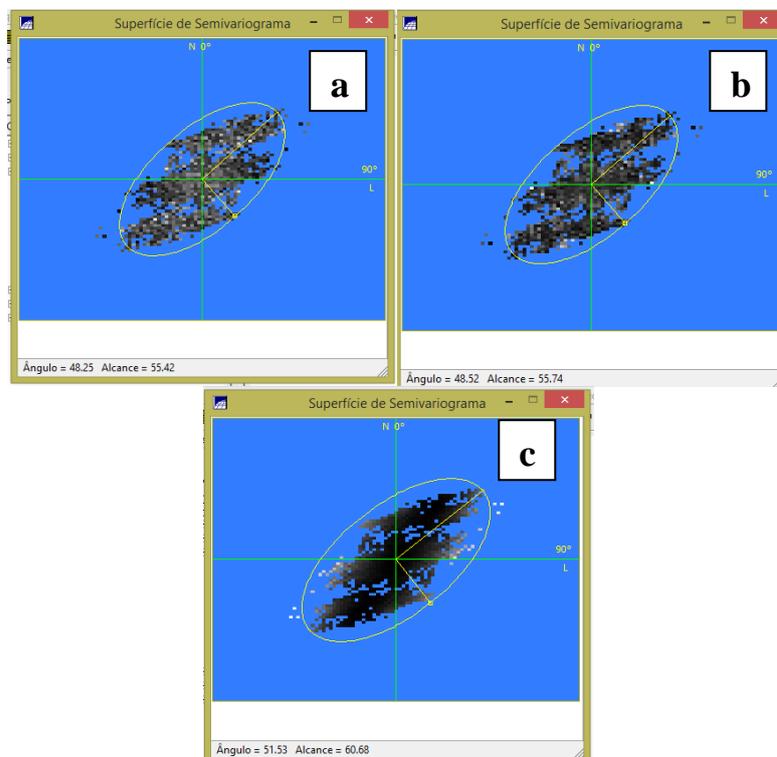


**Figura 3.** Gráficos de probabilidade normal e histogramas das variáveis (a) altura, (b) DAP e (c) altitude.

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas das variáveis estudadas.

Variável	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Coefficiente de assimetria
Altura	24,5	23,8	3,5	0,142	0,58
DAP	40,8	36,7	17,0	0,416	1,16
Altitude	905,3	905,1	1,9	0,002	0,7

Considerando a normalidade dos dados, prosseguiu-se com a análise geoestatística sem a necessidade da retirada de tendências. Os semivariogramas de superfície das variáveis, apresentados na Figura 4, mostram a anisotropia na direção de 48° devido ao formato do povoamento florestal estudado. Desta forma, geraram-se dois semivariogramas para cada variável, sendo um para o eixo de maior continuidade (48°) e um para o eixo de menor continuidade (138°).



**Figura 4.** Verificação dos eixos de anisotropia das variáveis com o semivariograma de superfície: (a) altura, (b) diâmetro e (c) altitude.

Para ajustar o semivariograma das variáveis altura e DAP, foi necessário reduzir o número de lags e incremento, ou seja, diminuir o raio de busca entre os pares de amostras para contabilizar menos pontos nos lags. Pelo fato de a área de estudo ser pequena e conter muitos pontos próximos e variáveis entre si, esta redução proporcionou um melhor ajuste do semivariograma. Para a variável altitude também se reduziu o incremento em comparação aos valores *default* do SPRING, porém, foi aumentado o número de lags por ser uma variável que possui menor variação entre os pares de pontos amostrais próximos (Tabela 3). Não se conseguiu um semivariograma com boa estrutura espacial ao se considerar as direções da variável DAP. Por esse motivo, foi necessário desconsiderar a direcionalidade para esta variável para prosseguir com as etapas seguintes.

**Tabela 3.** Parâmetros dos semivariogramas experimentais.

Variável	Parâmetros			Direção (graus)
	Lag	Incremento	Tolerância	
Altura	5	3	1,5	48/138
DAP	5	9,85	4,925	0
Altitude	12	3,5	1,75	48/138

Para as variáveis altura e altitude foi necessário modelar a anisotropia, etapa que consiste em unir os dois modelos definidos num único modelo consistente, o qual descreva a variabilidade espacial do fenômeno em qualquer direção. Primeiramente dividiram-se os semivariogramas em faixas convenientes. Após este procedimento, a anisotropia combinada foi decomposta graficamente, e obteve-se um modelo combinado. A definição desse modelo combinado foi feita manualmente e implementada no SPRING.

A Tabela 4 e Figura 4 mostram o resultado do ajuste dos semivariogramas experimentais para cada variável estudada de acordo com os eixos de maior e menor continuidade. Percebe-se que para as variáveis das árvores altura e DAP, o modelo esférico foi que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais, enquanto que para a altitude foi o modelo gaussiano. De um modo geral, a variável que apresentou os melhores ajustes dos modelos teóricos foi a que teve o menor CV, ou seja, a altitude. Isso mostra que quanto maior a variabilidade espacial do fenômeno, maior a dificuldade em se encontrar um modelo teórico de ajuste ou de representação.

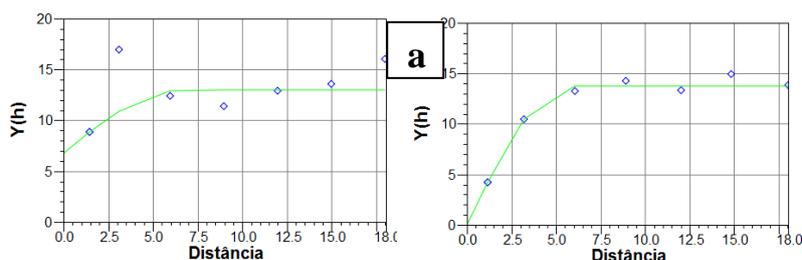
Para as variáveis DAP e altura na direção de 48°, o modelo de ajuste dos semivariogramas apresentou grande percentual de efeito pepita em relação à contribuição dos modelos. Isso pode ter ocorrido devido à variação entre as amostras, o que as torna independentes uma das outras no espaço. Tal comportamento em parte pode ser atribuído à falta de manejo do povoamento florestal e heterogeneidade do mesmo, visto que as árvores de eucalipto estão distribuídas em meio a árvores da espécie pinus, além de estarem sujeitas ao efeito de borda e presença de clareiras no interior do plantio. Esses fatores estão relacionados ao maior ou menor espaçamento para as árvores se desenvolverem.

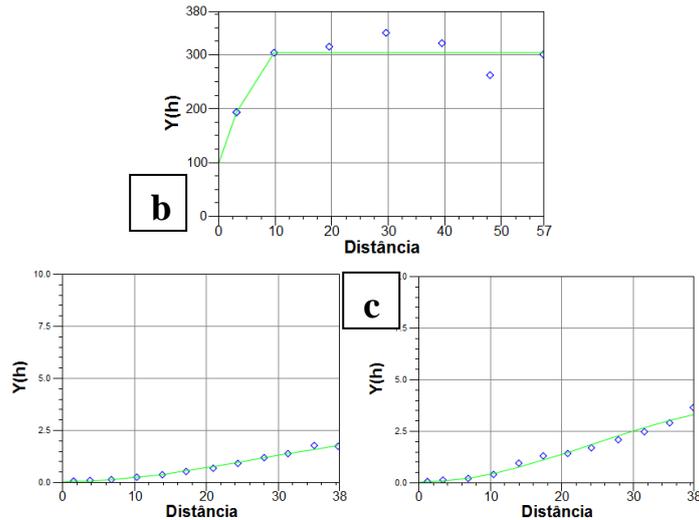
**Tabela 4.** Resultado do ajuste dos semivariogramas experimentais aos modelos teóricos.

Variável	Modelo	Direção							
		48°				138°			
		Akaike	C0	C1	Alcance	Akaike	C0	C1	Alcance
Altura	Esférico	-24,5	6,2	6,7	6,6	-44,5	0	13,8	5,5
DAP*	Esférico	-35	93,6	208	10,1				
Altitude	Gaussiano	-44,5	0	2,6	63,4	-39,3	0	4,5	57,8

Legenda: C0= efeito pepita; C1= contribuição.

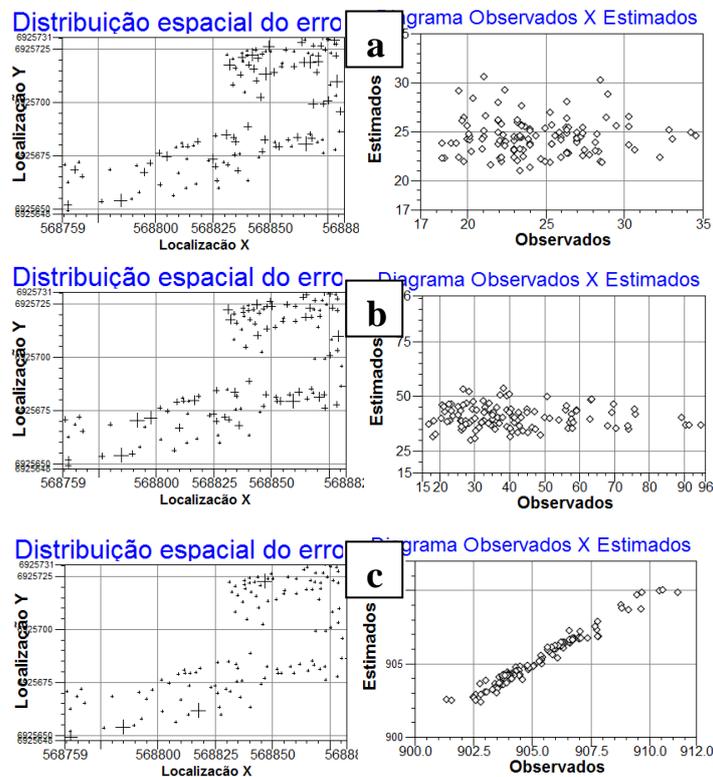
\*Sem direcionalidade (0°)





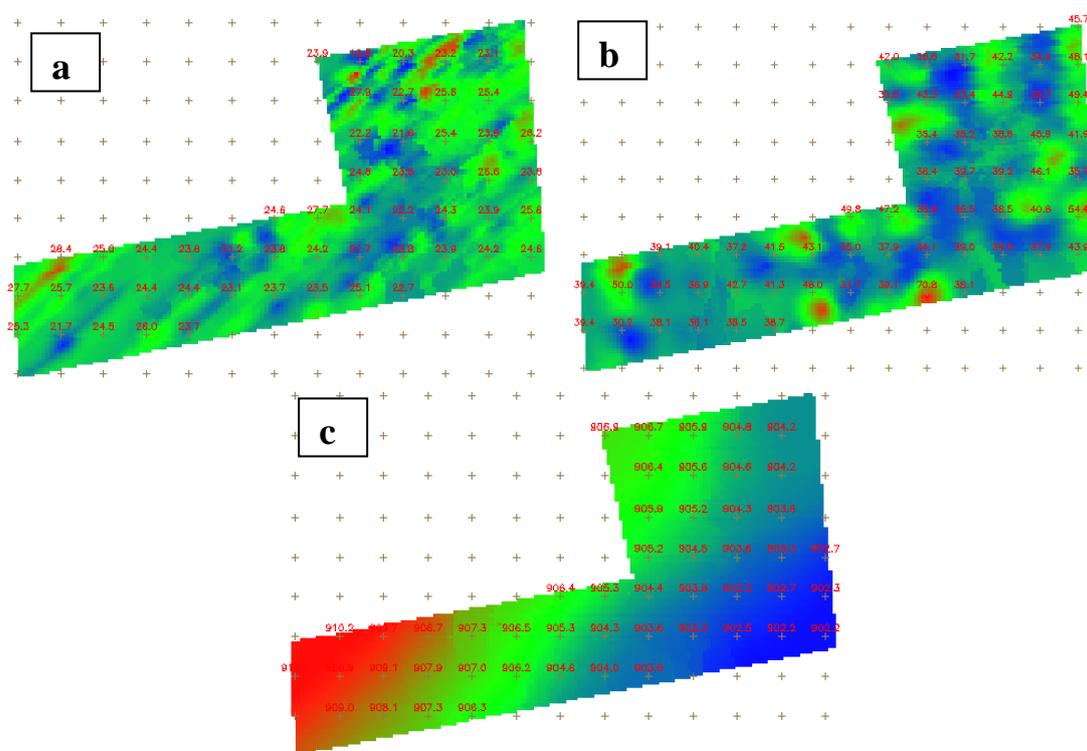
**Figura 4.** Resultado do ajuste dos semivariogramas aos modelos teóricos: (a) altura, (b) DAP e (c) altitude, de acordo com os eixos de maior (esquerda) e menor continuidade (direita).

Na etapa seguinte, executou-se a validação dos modelos de ajuste. Dois dos critérios para verificar os modelos é a distribuição espacial do erro e o diagrama observados x estimados (Figura 5). Percebeu-se que a altitude teve o melhor ajuste do modelo, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,98, indicando que o modelo foi fiel às amostras de campo. A altura obteve o pior ajuste, com coeficiente de correlação de 0,33, e o DAP de 0,36. Observa-se que nas variáveis dendrométricas altura e DAP, os maiores erros ocorreram nos locais mais discrepantes da amostragem em relação à média, principalmente nas bordas do povoamento, em que as árvores do povoamento possuem mais espaço para se desenvolver, se distinguindo das demais.



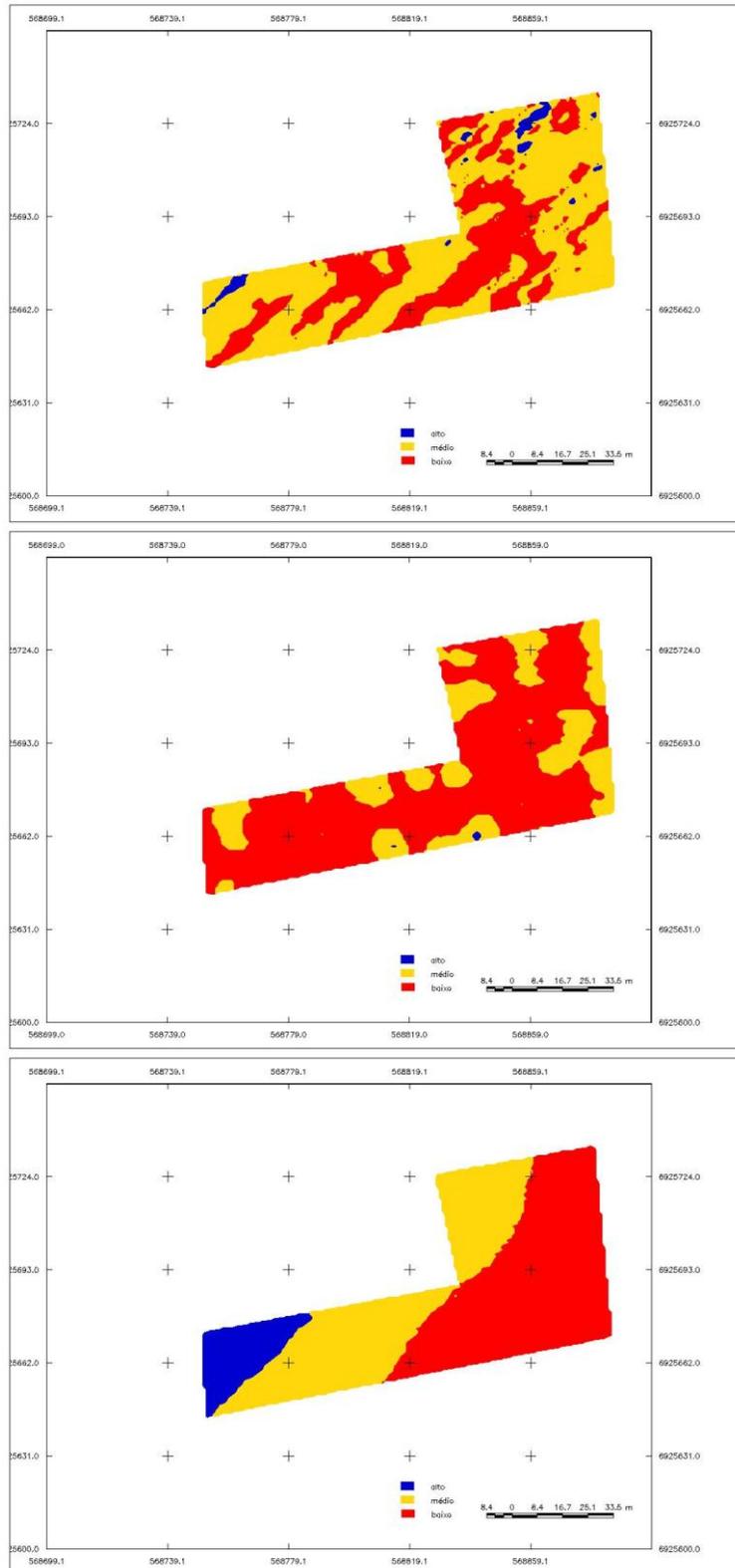
**Figura 5.** Avaliação do modelo de ajuste: Distribuição espacial do Erro e Diagrama Observados x Estimados: (a) altura, (b) DAP e (c) altitude.

Após validados os modelos de ajuste, executou-se a krigagem, sendo os resultados mostrados na Figura 6. Percebe-se que, por ter sido considerada a anisotropia dos alvos nos modelos de altura e altitude, a krigagem gerada mostra certa continuidade na direção de 48°. Observando-se o resultado da interpolação, percebe-se que os maiores valores de altura e DAP das árvores ocorrem nas bordas do povoamento florestal, o que é esperado, pelo fato dessas árvores terem maior espaço para se desenvolver se comparado com aquelas situadas no interior do povoamento. A krigagem gerada para a variável altitude mostrou-se coerente com o relevo local do terreno, que apresenta declividade na direção oeste-leste. Percebe-se que essa é a variável com maior continuidade e correlação espacial. Também foi verificado o outro produto da krigagem, que é o mapa da variância. Nele, constatou-se que as maiores variâncias ocorreram nos locais não amostrados, com exceção da variância da altimetria, que permaneceu constante.



**Figura 6.** Resultado da krigagem das variáveis (a) altura, (b) DAP e (c) altitude, sendo que a cor azul indica valores mais baixos, verde valores médios e vermelho valores altos.

A Figura 7 mostra o resultado do fatiamento da grade gerada na krigagem conforme as classes preestabelecidas de na Tabela 1.



**Figura 7.** Mapas gerados a partir do fatiamento da grade gerada na krigagem para as variáveis: altura, DAP e altitude.

### 3.2 Correlação espacial entre as variáveis

Os resultados das tabulações cruzada entre os PIs de cada variável gerados a partir do fatiamento da krigagem podem ser verificados nas Tabelas 5, 6 e 7. Para as variáveis altitude e altura, a maior sobreposição ocorreu quando a altitude é baixa, em que a altura das

árvores é média. Na comparação entre altura e DAP, ocorreu sobreposição entre as classes baixo e médio, mostrando haver certa correlação entre essas duas variáveis. Isso é esperado, já que árvores baixas tendem a ter DAP menor e árvores médias ou altas, maior DAP. Quase nenhuma sobreposição ocorreu na classe “alto” pelo fato da krigeagem não gerado valores de DAP que se encaixasse nessa classe. Isso pode ter ocorrido pelo fato da amostragem ter poucas árvores com DAP considerado alto, mais uma vez, característica pela falta de manejo do povoamento e pelo fato de não ter se conseguido um bom modelo de ajuste para esta variável. Para as variáveis DAP e altitude, a maior sobreposição ocorreu em baixas altitudes, árvores com DAP baixos.

**Tabela 5.** Resultado da tabulação cruzada (em *pixels*) entre as variáveis altitude e altura.

Altitude/Altura(m)	Baixo	Médio	Alto	Total
	< 23,8	23,8-29	>29	
<b>Baixo &lt;905</b>	1438	1987	42	3467
<b>Médio 905-909</b>	1326	1785	67	3178
<b>Alto &gt;909</b>	119	611	57	787
<b>Total</b>	2883	4383	166	7432

$r=0,022$

**Tabela 6.** Resultado da tabulação cruzada (em *pixels*) entre as variáveis altura e DAP.

DAP(cm)/ Altura(m)	Baixo	Médio	Alto	Total
	< 23,8	23,8-29	>29	
<b>Baixo &lt;43</b>	2091	722	0	2803
<b>Médio 43-70</b>	2061	2386	9	4476
<b>Alto &gt;70</b>	1	152	0	153
<b>Total</b>	4163	3260	9	7432

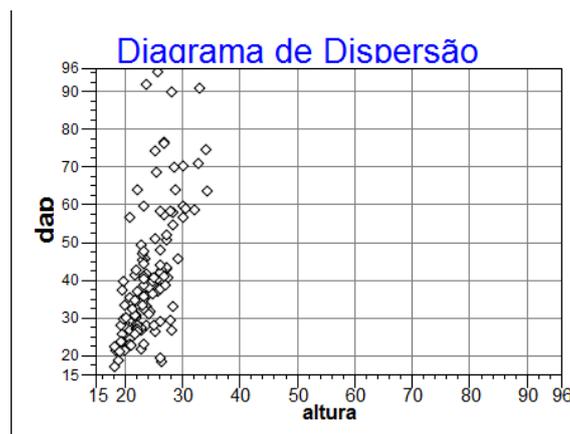
$r= 0,633$

**Tabela 7.** Resultado da tabulação cruzada (em *pixels*) entre as variáveis DAP e altitude.

DAP(cm)/Altitude(m)	Baixo	Médio	Alto	Total
	<905	905-909	>909	
<b>Baixo &lt;43</b>	2529	2467	550	5546
<b>Médio 43-70</b>	953	706	227	1886
<b>Alto &gt;70</b>	0	0	0	0
<b>Total</b>	3482	3173	777	7432

$r=0,057$

O coeficiente de correlação linear ( $r$ ) mostrou haver certa relação entre DAP e altura das árvores (Tabela 6). O diagrama da figura mostra haver uma associação positiva entre DAP e altura, pois, quando cresce o valor da abscissa, tende a crescer o da ordenada e vice-versa. Essa tendência está quantificada no coeficiente de correlação linear de 0,63. No entanto, o fato de ele ser inferior à unidade 1, indica que nem toda a variação de uma distribuição é concomitante com a da outra.



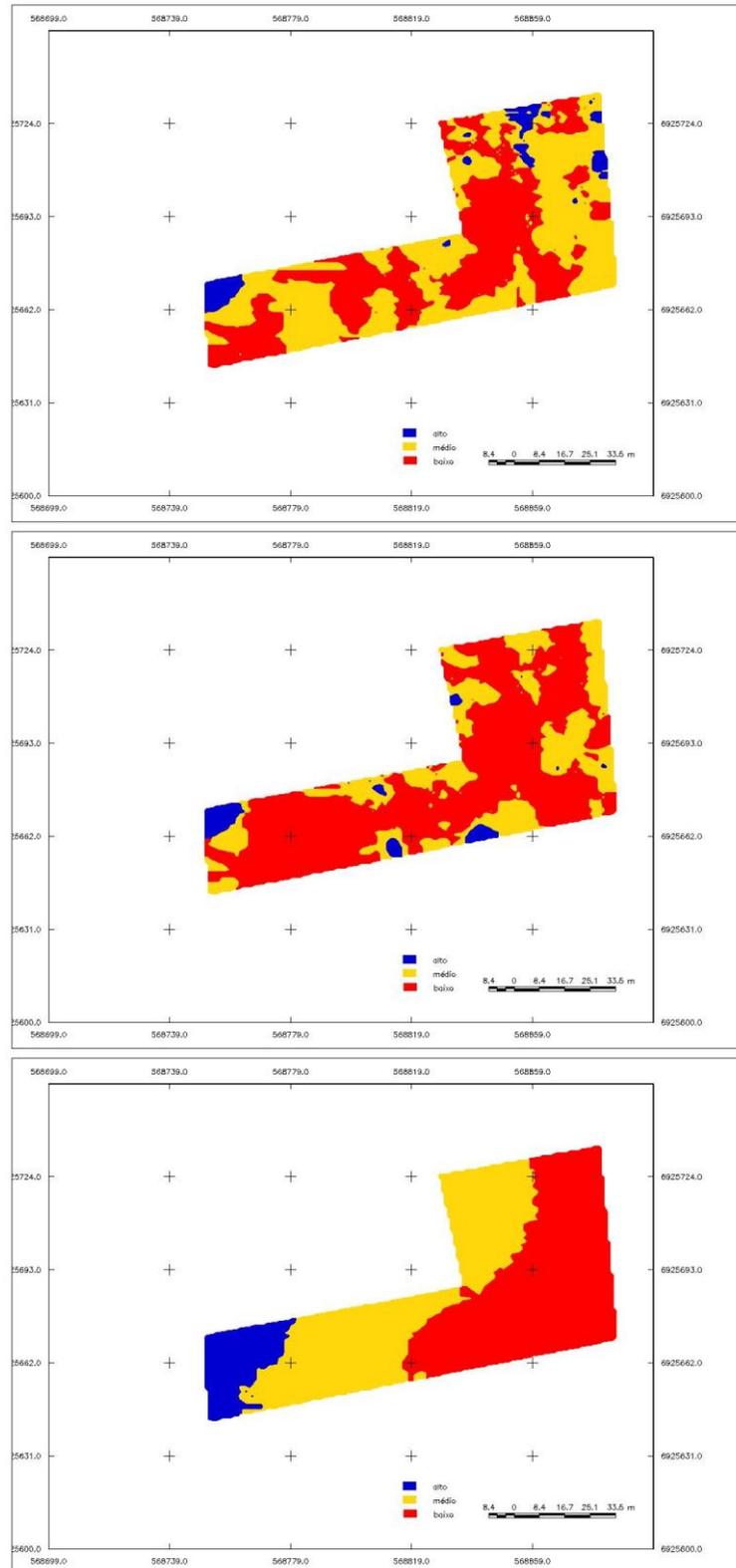
**Figura 8.** Diagrama de dispersão entre as variáveis altura e DAP das árvores.

Esperava-se uma correlação maior entre a altura e DAP, já que teoricamente uma variável tem relação com a outra pelo fato de o crescimento das árvores em DAP e altura serem constantes e proporcionais. Porém, vários são os fatores que podem ter influenciado nessa menor correlação, entre eles, a falta de manejo do povoamento, ou seja, ausência de poda e desbaste desde que o povoamento foi estabelecido na área. Outro fator é o efeito de borda, árvores situadas nas bordas do povoamento florestal têm maior espaço para o crescimento em diâmetro do que as árvores situadas no interior do povoamento, que competem por espaço com as demais. Por esse motivo, árvores do interior podem apresentar um maior crescimento em altura, sem conseguir manter a mesma proporção de crescimento em diâmetro. Destaca-se que esse efeito torna-se mais acentuado em plantios florestais de menor área, que é o caso do presente estudo.

Não foi encontrada correlação entre altitude/DAP, e altitude/altura, o que pode ser explicado pelo fato da área de estudo ser pequena e, conseqüentemente, com pouca variação de altitude. Alguns autores sugerem que cota altimétrica pode ter relação com a produtividade florestal. De acordo com Carmo et al. (1990), os terrenos mais planos do local, de menor cota altimétrica e com pedofoma côncava, favorecem a concentração e, ou, menor exportação de água e nutrientes do sistema, pois estão menos expostos à erosão e apresentam perfil mais profundo. Ortiz et al. (2004) aplicaram técnicas de estatística clássica, geoestatística e geoprocessamento no mapeamento da variabilidade espacial do potencial produtivo, representado pelo índice de sítio em um talhão com clones de *Eucalyptus grandis*, e analisaram sua relação com atributos do solo e do relevo. Todas as variáveis apresentaram dependência espacial. No geral, as áreas de maior potencial produtivo apresentaram menores teores de argila total e umidade, maiores teores de areia total e areia mais grossa; além de ocuparem posição menos elevada no relevo, ou melhor, cotas mais baixas. Courseuil e Madruga (1998), utilizando técnicas de álgebra de mapas e tabulação cruzada em um SIG, concluíram que, para a Floresta Nacional de Passo Fundo, RS, os sítios mais produtivos encontravam-se nos pontos mais altos do terreno e os menos produtivos nos pontos mais baixos.

### 3.3 Comparação entre a krigeagem e o método determinístico

Para fins de comparação com a krigeagem, também se gerou uma grade regular para cada variável pela média ponderada pelo IQD e, posteriormente, o fatiamento da grade conforme as classes estabelecidas na Tabela 1. Os resultados do fatiamento por este método são apresentados na Figura 9.



**Figura 9.** Mapas gerados a partir do fatiamento da grade gerada pela média ponderada pelo IQD para as variáveis: altura, DAP e altitude.

Percebem-se algumas diferenças entre os fatiamentos gerados a partir dos dois métodos (krigeagem e média ponderada pelo IQD) para cada variável. Para a variável DAP, por exemplo, visualiza-se que a média ponderada resultou em valores mais altos de DAP, enquanto a krigeagem quase só gerou valores situados entre as classes baixas e médias. Isso

pode ter ocorrido pelo fato de a krigagem ter característica de gerar transições mais graduais entre os valores amostrados, se comparado com a média ponderada, que, às vezes, tende a subestimar ou superestimar valores na interpolação. A variável altimetria foi a que teve resultados mais similares entre os dois métodos.

A Tabela 10 mostra o resultado da validação dos interpoladores feito com as amostras separadas inicialmente para esta finalidade. Percebe-se que para a variável altura a interpolação por krigagem teve melhor resultado que a média ponderada, apesar da diferença ser pequena. Para a altimetria, ambos os interpoladores obtiveram bons resultados, quase não diferindo entre si. Para a variável DAP, o interpolador por média ponderada obteve melhor resultado, com menor desvio padrão e melhor correlação de Pearson se comparados com a krigagem. Porém, os resultados da krigagem poderiam ser melhores se fosse obtido um melhor ajuste do semivariograma, o que não foi possível devido à distribuição independente e aleatória da variável no espaço. Para ambos os interpoladores, o DAP foi a variável com maior desvio padrão.

De acordo com Jakob e Young (2006), a média ponderada pelo IQD é um interpolador exato em que poucas decisões são tomadas acerca dos parâmetros do modelo. Este método pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície. Entretanto, não é realizada uma avaliação da predição de erros, que pode produzir um efeito “*bulls eyes*” ao redor da localização do dado, pequenas áreas que se diferenciam da suavização geral da variável (JAKOB e YOUNG, 2006). Já a krigagem é uma técnica vantajosa quando se trata de recursos naturais, em que dificilmente têm-se transições abruptas entre os valores de atributos, além de gerar um mapa de incerteza, permitindo uma inferência mais precisa sobre os dados. Porém, para a variável DAP, a média ponderada pelo IQD alcançou uma representação mais próxima às amostras do levantamento de campo. Isso pode ser percebido nos mapas temáticos dessa variável gerados pelos dois métodos, já que existem árvores com DAP enquadrados na categoria alto, não mostradas na interpolação pela krigagem.

**Tabela 11.** Resultado da validação dos interpoladores para cada variável.

Variável	Altura		DAP		Altitude	
	Krigagem	MP IQD	Krigagem	MP IQD	Krigagem	MP IQD
Desvio	2.48	2.53	12.64	9.32	0.33	0.24
Corr. Pearson	0.48	0.44	0.22	0.31	0.98	0.98
Erro mínimo	-5.99	-6.02	-37.07	-28.05	-1.03	-0.94
Erro máximo	5.13	5.95	20.54	18.45	0.93	0.82
Coef. curtose	7.03	6.69	3.61	4.55	4.62	5.67

De maneira geral, percebeu-se que a média ponderada pelo IQD tem a vantagem de ser um método mais rápido e simples de ser aplicado, porém a krigagem tem a vantagem de geralmente conseguir um maior grau de precisão, o que não foi observado no presente estudo para a variável DAP. Deve-se considerar ainda que métodos como a krigagem necessitam um maior grau de conhecimento do usuário para ser aplicada adequadamente, já que envolver várias etapas e parâmetros a serem observados. A escolha do melhor método dependerá das necessidades do usuário bem como do tipo de variável a ser tratada.

Cabe destacar outros autores que trabalharam com a krigagem no âmbito florestal. Leal, Miguel e Matricardi (2011), usaram a interpolação geoespacial com o objetivo de entender melhor a distribuição espacial e diferenciar unidades produtivas em volume (m<sup>3</sup>) num plantio de *Eucalyptus urophylla*, concluindo que o método de interpolação krigagem ordinária mostrou-se eficiente para estimar volume em unidades produtivas no povoamento florestal

estudado. Mello (2004) aplicou geoestatística ao inventário florestal, avaliando a estrutura de continuidade espacial de quatro características dendrométricas, os métodos de ajuste e seleção de modelos da função de semivariância, o comportamento dos intervalos de confiança clássico e geoestatístico e o potencial da krigeagem de bloco para a predição volumétrica por talhão num povoamento de *Eucalyptus grandis*. Ele verificou que as características dendrométricas mensuradas no inventário florestal apresentaram-se estruturadas espacialmente. Este resultado sugeriu que no processamento do inventário florestal deve-se considerar a componente espacial, ou seja, as parcelas não devem ser tratadas de forma independente. O autor concluiu que na presença de continuidade espacial, o uso do estimador geoestatístico (krigeagem), para estimativa do volume por talhão, é preferido por duas razões: proporciona estimativa da precisão sem viés e é de baixo custo quando comparado ao estimador clássico. Payn et al. (1999) estudaram o potencial de um SIG e de técnicas de análise espacial no monitoramento de variações na produtividade e na nutrição de florestas comerciais na Nova Zelândia, concluindo que a geoestatística foi válida para identificar, visualizar, calcular e interpretar tendências de crescimento da produtividade.

#### **4. Conclusão**

O trabalho permitiu verificar que o uso da geoestatística nas atividades florestais pode servir como apoio para a tomada de decisões, pois permite a confecção de mapas que expressam o comportamento espacial das variáveis e a partir disso determinar a magnitude da influência de uma variável sobre a outra e se ela existe ou não. A geoestatística como ferramenta de análise permitiu a geração de mapas de probabilidade, que demonstraram o grau de relação entre os dados mensurados.

A dificuldade em se conseguir bons semivariogramas experimentais para a variável dendrométrica DAP pode ser considerada uma evidência da falta de manejo no povoamento, já que, pelo fato de as árvores terem a mesma idade, supostamente teriam os diâmetros mais uniformes. Pela tabulação cruzada dos dados pode-se observar a taxa de sobreposição entre as variáveis, que denota, no caso de um plantio florestal, se existe uma relação direta entre DAP e altura do eucalipto. Apesar de existir uma correlação positiva entre as variáveis altura e DAP, esta ficou abaixo do esperado. Como citado anteriormente, isto pode ser reflexo da falta de manejo do povoamento florestal, além da presença de clareiras, espécies oportunistas e efeito de borda. Desta forma, espera-se que em povoamentos florestais com manejo adequado o uso da krigeagem possa ser mais efetivo.

Verificaram-se diferenças nos mapas de classes gerados a partir dos métodos probabilísticos (krigeagem) e determinísticos (média ponderada pelo IQD). Nos casos em que não se consegue um semivariograma e um modelo de ajuste adequado, o segundo método pode ser vantajoso por ser mais rápido e exigir menor conhecimento do usuário, como foi verificado para a variável DAP.

Este trabalho também ressaltou a importância de se ter um manejo florestal adequado, visto que geralmente o objetivo de um reflorestamento de Eucalipto é comercial, logo, se preza por uma uniformidade das variáveis dendrométricas, reduzindo custos e resíduos na hora do beneficiamento da madeira e consequentemente aumentando-se o rendimento.

#### **5. Referências Bibliográficas**

BOGNOLA, I. A. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, PR, v.38, n.2, p.373-385, 2008.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. A análise espacial de superfícies. Capítulo 3. In: **Análise espacial de dados geográficos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2002.

- CAMBARDELLA, C. A. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n.5, p. 1501-1511, 1994.
- CARMO, D.N.; RESENDE, M. & SILVA, T.C.A. Avaliação da aptidão das terras para eucalipto. In: BARROS, N.F.& NOVAIS, R.F., eds. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa. Folha de Viçosa, 1990. p.187-235.
- CORDEIRO, P. J.; BARBOSA, C. C. F.; CÂMARA, G. Álgebra de Campos e objetos. Capítulo 8. In: **Análise espacial de dados geográficos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2002.
- COURSEUIL, C. W.; MADRUGA, P. R. A. Modelagem numérica em mapa temático: sítios florestais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.28, n.4, p.691-694, 1998.
- JAKOB, A., A.; YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. Trabalho apresentado no XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambu – MG – Brasil, 2006.
- LEAL, F. A.; MIGUEL, E. O.; MATRICARDI, E. A. T. Mapeamento de unidades produtivas utilizando a interpolação geoespacial krigagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.7, n.13; p. 743-745, 2011.
- MATOS, A.C.O.C., 2005. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de Geodésia e Geofísica na América do Sul**. PhD thesis - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 355 p. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10102005-104155>. Acesso em 12 de jun. de 2016.
- MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 122 p. Dissertação (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ORTIZ, J.L.; VETTORAZZI. C.A.; DO COUTO, H.T.Z. et al. Silvicultura de precisão: relação entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba. Esalq/USP, 2004.
- PAYN, T.W.; HILL, R.B.; HÖCK, B.K.; SKINNER, M.F.; THORN, A.J.; RIJKSE, W.C. Potencial for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition, a New Zealand example. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.122, n.1/2, p.187-196, 1999.
- VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; MARIA, I.C. Uso de geoestatística no mapeamento de atributos de solo e planta. In: Congresso e feira para usuários de geoprocessamento da América Latina - GIS Brasil 98, 4., Curitiba, 1998. **Anais...** Curitiba, 1998. Disponível em CD-Rom.