

**UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

DISSERTAÇÃO

**Geoestatística aplicada à mensuração e manejo de povoamentos de
eucalipto**

Danilo Henrique dos Santos Ataíde

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

**GEOESTATÍSTICA APLICADA À MENSURAÇÃO E MANEJO DE
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

DANILO HENRIQUE DOS SANTOS ATAÍDE

Sob a orientação do professor
Emanuel José Gomes de Araújo

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2019

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A862g Ataíde, Danilo Henrique dos Santos, 1989-
Geoestatística aplicada à mensuração e manejo de
povoamentos de eucalipto / Danilo Henrique dos Santos
Ataíde. - 2019.
106 f.: il.

Orientador: Emanuel José Gomes de Araújo.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2019.

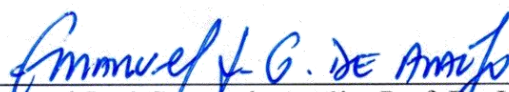
1. Processo de amostragem . 2. Inventário
Florestal. 3. Dependência Espacial. 4. Capacidade
Produtiva. 5. Crescimento e Produção. I. Araújo,
Emanuel José Gomes de, 1984-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III.
Título.

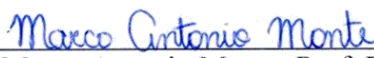
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

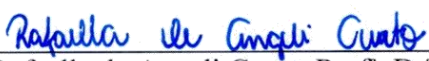
DANILO HENRIQUE DOS SANTOS ATAÍDE

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2019.


Emanuel José Gomes de Araújo. Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)


Marco Antonio Monte. Prof. Dr. UFRRJ


Rafaella de Angeli Curto. Prof^a. Dr^a. UFMT

Aos meus pais, Dásio e Neusa.
Às minhas irmãs e irmão.
Ao meu amor, Glaycianne.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela dádiva da vida e por tudo aquilo que criou. Todos os caminhos trilhados até esse momento foram abençoados por Ele;

Ao Professor Emanuel José Gomes de Araújo pelos ensinamentos, amizade e confiança depositada em mim. A sua excelente orientação permitiu um crescimento substancial na minha formação. Agradeço ainda, pela dedicação e profissionalismo exemplar com a docência e a produção de conhecimento científico de qualidade;

Aos professores Marco Antonio Monte e Rafaella de Angeli Curto pela participação na banca de defesa e contribuições pertinentes e que permitiram aumentar a qualidade do trabalho;

À toda a minha família, em especial, aos meus pais Dásio e Neusa, por todo suporte e ensinamentos. São e sempre serão os principais mentores dessa jornada. Aos meus irmãos Lucas, Bruna, Hélen, Victória e Isabella por todo carinho e apoio oferecidos;

Ao porto seguro e mulher da minha vida, Anne Santos, pelo seu carinho, parceria, dedicação e amor;

Aos meus amigos do Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal: Felipe, Laís, Pedro, Stephany, Vinícius, Julyanna, Julia e Lucas;

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF) e ao Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal (LAMFLOR) pela oportunidade de aprendizado e infraestrutura disponibilizados;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida;

À todos os meus amigos de graduação e pós-graduação;

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Valores médios e desvios das simulações de amostragem, dos parâmetros e estatísticas de ajuste do modelo de semivariância esférico e índice de dependência espacial para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (HD), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N). 13
- Tabela 2.** Estatística descritiva dos inventários florestais, obtida a partir de estimativas espaciais, na variação das combinações de processo e intensidade amostral para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (Hd), volume de madeira (V) e número de árvore por hectare (N) em povoamento de eucalipto..... 19
- Tabela 3.** Exatidão Global dos mapas temáticos das variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (Hd), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N), na variação das intensidades amostrais pelos processos amostrais, em relação ao mapa de referência de uma unidade amostral para cada 1,6 hectares. 28
- Tabela 4.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto, nas intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 41
- Tabela 5.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável área basal (G) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 42
- Tabela 6.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável altura total (Ht) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 43
- Tabela 7.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 44
- Tabela 8.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 45
- Tabela 9.** Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável índice de sítio (S) em povoamento de eucalipto, nas idades de 24; 36; 48; 60; 72 e 84 meses, espacializada pela krigagem ordinária (KO) e cokrigagem ordinária (S – DAP; S - Ht). 67

Tabela 10. Parâmetros e qualidade do ajuste do modelo de Clutter na projeção de volume e área basal em povoamentos de eucalipto, utilizando a variável independente índice de sítio obtida pelos métodos da Curva-Guia, krigagem ordinária e cokrigagem ordinária.	68
Tabela 11. Precisão e exatidão dos valores observados e estimados pelos diferentes métodos, e entre os valores obtidos em cada método nas unidades amostrais destinadas a validação dos dados.	69
Tabela 12. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	74
Tabela 13. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	75
Tabela 14. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	76
Tabela 15. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	77
Tabela 16. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	78
Tabela 17. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.	79
Tabela 18. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	80
Tabela 19. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	81
Tabela 20. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	82
Tabela 21. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	83
Tabela 22. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	84

Tabela 23. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.	85
Tabela 24. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	86
Tabela 25. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	87
Tabela 26. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	88
Tabela 27. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	89
Tabela 28. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	90
Tabela 29. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.....	91

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização geográfica da área e das unidades amostrais, no município de Bocaiúva - MG. 7
- Figura 2.** Etapas principais da avaliação das intensidades e processos amostrais..... 8
- Figura 3.** Erro médio reduzido (ER), obtidos a partir da validação cruzada das 30 simulações (ACS e AC) e 10 a 15 simulações (AS), para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo médio (DAP), área basal média (G), altura total média (Ht), altura média das árvores dominantes média (Hd), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N), variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3 e 1,8 hectares por unidade amostral 17
- Figura 4.** Espacialização do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral. 22
- Figura 5.** Espacialização área basal (G) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral. 23
- Figura 6.** Espacialização da altura total (Ht) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral. 24
- Figura 7.** Espacialização da altura média das árvores dominantes (Hd) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral..... 25
- Figura 8.** Espacialização do volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral. 26
- Figura 9.** Espacialização do número de indivíduos por hectare (N) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral..... 27
- Figura 10.** Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das unidades amostrais no povoamento clonal de eucalipto, município de Abaeté, MG. 36
- Figura 11.** Espacialização do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos. 47

Figura 12. Espacialização da área basal (G) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.	48
Figura 13. Espacialização da altura total (HT) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.	49
Figura 14. Espacialização da altura média das árvores dominantes (HD) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (AS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.	50
Figura 15. Espacialização do volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.	51
Figura 16. Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das unidades de amostra nos plantios clonais de eucalipto, município de Bocaiúva, Minas Gerais.	60
Figura 17. Distribuição dos resíduos normalizados (A) e limites inferiores e superiores das classes de sítio obtidos pelo método da curva guia com o modelo de Schumacher (B) nos povoamentos de eucalipto localizados em Bocaiúva, MG.	65
Figura 18. Gráfico de validação dos valores observados de volume futuro (V_2) em relação aos valores estimados pelo modelo de Clutter utilizando a variável índice de sítio obtida pela curva guia (A) e corrigidos pela krigagem ordinária (B), cokrigagem ordinária (var. secundária: DAP) (C), cokrigagem ordinária (var. secundária: HT) (D).....	69

SUMÁRIO

RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
Capítulo 1 - Processos e intensidades amostrais na análise geostatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto.....	4
RESUMO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	7
2.1. Caracterização da Área de Estudo	7
2.2. Banco de Dados	7
2.3. Processos e Intensidades Amostrais	8
2.4. Análise Geoestatística	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4. CONCLUSÕES	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
Capítulo 2 - Dependência espacial de variáveis dendrométricas em função da idade em povoamentos de eucalipto	33
RESUMO	33
ABSTRACT	34
1. INTRODUÇÃO	35
2. MATERIAL E MÉTODOS	36
2.1. Caracterização da Área de Estudo	36
2.2. Banco de Dados	36
2.3. Análise Geoestatística	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4. CONCLUSÕES	53
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
Capítulo 3 - Geoestatística na classificação de sítios e modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto	57
RESUMO	57
ABSTRACT	58
1. INTRODUÇÃO	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1. Caracterização da Área de Estudo	60
2.2. Banco de Dados	61
2.3. Modelagem da Capacidade Produtiva	61
2.4. Modelagem do Crescimento e Produção	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4. CONCLUSÕES	70
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
CONCLUSÕES GERAIS	73

APÊNDICE A – Resultados da análise de dependência espacial referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem casual simples, nas diferentes intensidades amostrais.....	74
APÊNDICE B – Resultados da análise de dependência espacial referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem sistemática, nas diferentes intensidades amostrais.....	80
APÊNDICE C – Resultados da análise de dependência espacial, referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem em conglomerados, nas diferentes intensidades amostrais.	86

RESUMO

ATAÍDE, Danilo Henrique dos Santos. **Geoestatística aplicada à mensuração e manejo de povoamentos de eucalipto**. 2019. 106f Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de variáveis dendrométricas no tempo, visando o manejo de povoamentos de eucalipto. Os dados foram obtidos em povoamentos localizados nos municípios de Bocaiuva e Abaeté, Minas Gerais, a partir de inventário florestal contínuo. Foram avaliadas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, área basal, altura total, altura média das árvores dominantes, volume de madeira e número de árvores por hectare, nos processos de amostragem casual simples, sistemática e conglomerados, em diferentes intensidades amostrais. A estrutura de dependência espacial das variáveis, bem como precisão e exatidão das estimativas geoestatísticas, foram avaliadas em cada combinação de processo e intensidade amostral. Nestas combinações, foram construídos o intervalo de confiança para a média espacial. O comportamento da dependência espacial das variáveis analisadas foi avaliado ao longo do tempo, em três idades consecutivas. Em cada idade foram testadas três intensidades amostrais e sua influência na detecção da dependência espacial. Para os estudos de capacidade produtiva e prognose do volume de madeira utilizando variável geoestatística, aplicou-se o método da Curva-Guia na obtenção da variável índice de sítio, seguido da espacialização das estimativas pela krigagem ordinária e cokrigagem ordinária, utilizando como variáveis secundárias o diâmetro a 1,30 m do solo e a altura total. O modelo de Clutter foi ajustado a partir das estimativas de sítio geradas em cada metodologia. O desempenho de cada método na projeção do volume de madeira foi avaliado por meio de regressão linear e do coeficiente de correlação linear de *Pearson*. Conclui-se que os processos e intensidades amostrais influenciam na exatidão e precisão de inventários florestais utilizando abordagem geoestatística. A intensidade de uma unidade amostral em cada 16,4 hectares permite estimativas exatas da média populacional, por meio de estimador geoestatístico, em todas as variáveis. Contudo, para a espacialização consistente das variáveis, recomenda-se uma intensidade de uma unidade amostral para cada 6,5 hectares, independente do processo amostral utilizado. Verifica-se que o comportamento da dependência espacial das variáveis em estudo não foi afetado pelo aumento da idade do povoamento. As variáveis diâmetro a 1,30 do solo, área basal, altura total, altura média das árvores dominantes e volume de madeira apresentaram estrutura de dependência espacial predominantemente forte em todas as idades e intensidades amostrais avaliadas, sendo recomendada a análise geoestatística em inventário florestal contínuo, considerando no mínimo uma unidade amostral a cada 16,4 hectares. A correção do índice de sítio pela krigagem e cokrigagem ordinária não propicia alterações significativas no ajuste do modelo de Clutter. Outras formas de melhorar o ajuste deste modelo, utilizando a forte componente espacial apresentada pela altura média das árvores dominantes, devem ser investigadas.

Palavras-chave: Processo de amostragem. Inventário florestal. Dependência espacial. Capacidade produtiva. Crescimento e produção.

ABSTRACT

ATAÍDE, Danilo Henrique dos Santos. **Geostatistics applied to the measurement and management of eucalyptus stands**. 2019. 106f Dissertation (Master in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

The general objective of this work was to evaluate the sampling processes and intensities in the geostatistical analysis of dendrometric variables in time, aiming at the management of eucalyptus stands. The data were obtained from stands located in Bocaiuva and Abaeté, Minas Gerais, from continuous forest inventory. The variables diameter were 1.30 m from the soil, basal area, total height, mean height of dominant trees, wood volume and number of trees per hectare, in the random, systematic and conglomerates sampling process, in different sampling intensities. The spatial dependence structure of the variables, as well as the accuracy of the geostatistical estimates, were evaluated in each combination of process and sample intensity. In these combinations, the confidence interval for the spatial mean was constructed. The spatial dependence behavior of the analyzed variables was evaluated over time, in three consecutive ages. At each age, three sample intensities and their influence on the detection of spatial dependence were tested. For the studies of productive capacity and prognosis of the volume of wood using geostatistical variable, the Guidance Curve method was applied to obtain the variable site, followed by the spatialisation of the estimates by ordinary kriging and ordinary cokriging, using as secondary variable diameter 1,30 m from the ground and total height, respectively. The Clutter model was adjusted from the site estimates generated in each methodology. The performance of each method in the projection of the wood volume was evaluated by means of linear regression and the Pearson linear correlation coefficient. It is concluded that the sampling processes and intensities affect the accuracy and precision of forest inventories using a geostatistical approach. The intensity of one sample unit in each 16.4 hectares allows exact estimates of the population mean, by means of a geostatistical estimator, in all variables. However, for consistent spatialization of variables, is recommended an intensity of one sample unit for every 6.5 hectares, regardless of the sampling process used. It is verified that the behavior of the spatial dependence of the variables under study was not affected by the increase of the population age. The variables diameter at 1.30 of the soil, basal area, total height, mean height of dominant trees and wood volume had a predominantly strong spatial dependence structure at all ages and sample intensities evaluated, being recommended the geostatistical analysis in a continuous forest inventory, considering a sampling unit for each 16.4 hectares. Correction of site index by kriging and ordinary cokriging does not lead to significant changes in the fit of the Clutter model. Other ways of improving the fit of this model, using the strong spatial component presented by the mean height of dominant trees, should be investigated.

Keywords: Sampling process. Forest inventory. Spatial dependence. Site productivity. Growth and yield.

INTRODUÇÃO GERAL

O inventário florestal é fundamentado na teoria da amostragem (COCHRAN, 1977) e, por meio dele, é possível obter as variáveis dendrométricas em povoamentos de eucalipto (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997), com a finalidade de subsidiar a tomada de decisão no manejo florestal. Em povoamentos de eucalipto é comum assumir que existe homogeneidade da variável de interesse, principalmente quando se trata de um mesmo clone, mesma idade e espaçamento (MELLO et al., 2005). Porém, variações significativas podem ser encontradas, ocasionadas por fatores edafoclimáticos, pela interação genótipo/ambiente e práticas silviculturais adotadas ao longo do crescimento do povoamento (MELLO et al., 2005; PELISSARI et al., 2014). Estas variações podem influenciar no comportamento espacial de variáveis dendrométricas, sendo relevante considerar no inventário e manejo florestal, a estrutura de dependência espacial quando presente, permitindo informações mais precisas, sem viés e com baixo custo associado (MELLO et al., 2005).

A estrutura de dependência espacial de uma variável pode ser obtida por meio da geoestatística, que permite descrever e modelar as variações espaciais existentes em povoamentos florestais, pois busca caracterizar a correlação espacial entre os valores de uma variável regionalizada em uma dada direção e distância (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Constatada a presença de padrões espaciais dessas variáveis, é possível prever valores em locais onde não foi realizada amostragem por meio de interpoladores geoestatísticos, como por exemplo, a krigagem (LANDIM, 2006).

Considerar a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas entre unidades amostrais, por meio de análises geoestatísticas, permite redução da intensidade amostral associada ao aumento da precisão e exatidão das estimativas. Contudo, a eficiência da análise geoestatística na detecção da dependência espacial em inventários florestais também pode ser condicionada ao processo e intensidade da amostragem utilizadas em uma idade específica. Dessa forma, o processo de amostragem e a intensidade amostral devem, essencialmente, captar a estrutura de dependência da variável de interesse, com intensidade amostral mínima e redução de custos do inventário florestal (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997), mantendo ou melhorando a precisão e a exatidão das estimativas, com a finalidade de realizar um manejo adequado.

Por esta razão, o objetivo geral deste estudo foi analisar processos e intensidades amostrais para análise geoestatística de variáveis dendrométricas no tempo, visando o manejo de povoamentos de eucalipto. No Capítulo 1, intitulado “**Processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto**”, objetivou-se avaliar a precisão e exatidão de processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto.

No Capítulo 2, intitulado “**Dependência espacial de variáveis dendrométricas em função da idade em povoamentos de eucalipto**”, o objetivo foi avaliar a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas, ao longo do tempo, em diferentes intensidades amostrais em povoamentos de eucalipto. Por fim, o Capítulo 3, intitulado “**Geoestatística na classificação de sítios e modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto**”, teve como objetivo obter o índice de sítio utilizando os métodos geoestatísticos krigagem e cokrigagem, e avaliar o seu desempenho na modelagem do crescimento e produção com o modelo de Clutter.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 19–33, 2006.

MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 69, p. 25–37, 2005.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997.

PELISSARI, A. L. et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Textos, Oficina de, 2013.

CAPÍTULO I

Processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto

Processes and sample intensities in the geostatistical analysis of forest inventory in eucalyptus stand

RESUMO

O processo e a intensidade amostral utilizados em inventários florestais influenciam na exatidão e na precisão das estimativas obtidas, seja em análises clássicas ou espaciais. Na análise geoestatística, a amostragem deve captar a estrutura de dependência espacial da variável dendrométrica de interesse em um nível que permita acurácia das estimativas espaciais, com o menor esforço amostral. No entanto, não existe clareza de qual procedimento amostral reflete em estimativas acuradas de variáveis dendrométricas obtidas por meio da análise geoestatística. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a precisão e a exatidão de processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto. O estudo foi realizado em um povoamento de 377 hectares localizado no município de Bocaiúva, Minas Gerais. Em cada unidade amostral (200 m²), foram obtidas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, área basal, alturaleatória total, altura média das árvores dominantes, volume de madeira e número de árvores por hectare. Foram avaliados os processos de amostragem casual simples, sistemática e em conglomerados, variando as intensidades amostrais em uma unidade amostral por 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3 e 1,8 hectares. A intensidade de uma unidade amostral para cada 1,6 hectares foi utilizada como referência. O critério de informação de Akaike e Bayesiano, em conjunto com o erro médio reduzido, desvio padrão dos erros reduzidos e o índice de dependência espacial foram utilizados na avaliação dos semivariogramas teóricos. Para todas as variáveis e intensidades amostrais foram realizadas simulações para obtenção dos intervalos de confiança para a média espacial e o erro de amostragem relativo. A similaridade entre os mapas foi avaliada pela exatidão global. Os processos de amostragem casual simples, sistemática e em conglomerados, com intensidade de uma unidade amostral para cada 16,4 hectares, estimam com exatidão a média paramétrica por meio da krigagem ordinária. Para a espacialização das variáveis e produção de mapas acurados, a amostragem sistemática com uma unidade amostral em cada 6,5 hectares é a mais recomendada.

Palavras-chave: Krigagem ordinária. Amostragem. Precisão e exatidão.

ABSTRACT

The process and sample intensity used in forest inventories are factors that influence the accuracy of the dendrometric information obtained, whether in classical or spatial analyzes. In the geostatistical analysis, the sampling must capture the structure of spatial dependence of the dendrometric variable of interest at a level that allows the accuracy of the spatial estimates, with the least sample effort. However, there is no clarity of which sample procedure reflects in accurate estimates of dendrometric variables obtained through geostatistical analysis. Thus, the objective of this work was to evaluate the accuracy of processes and sample intensities in the geostatistical analysis of forest inventory in eucalyptus stands. The study was carried out in a stand of 377 hectares located in the municipality of Bocaiúva, Minas Gerais. In each sample unit (200 m²), the variables diameter at 1.30 m of soil, basal area, total height, mean height of dominant trees, wood volume and number of trees per hectare were obtained. The sampling procedures were random, systematic and in conglomerates, varying the sample intensities in a sampling unit by 16.4; 6.5; 5.4; 3.2; 2.3 and 1.8 hectares. The intensity of one sample unit for each 1.6 hectares was used as a reference. The Akaike and Bayesian information criteria, together with the reduced average error, standard deviation of the reduced errors and the spatial dependency index were used in the evaluation of the theoretical semivariograms. For all variables and sample intensities, simulations were performed to obtain the confidence intervals for the spatial mean and the relative sampling error. The similarity between the maps was evaluated by global accuracy. The random, systematic and conglomerate sampling processes, with intensity of one sampling unit for each 16.4 hectares, accurately estimate the parametric mean by ordinary kriging. For the spatialization of variables and the production of accurate maps, systematic sampling process with one sample unit per 6.5 hectares is the most recommended.

Keywords: Ordinary kriging. Sampling. Accuracy.

1. INTRODUÇÃO

O avanço das geotecnologias permitiu a utilização de novas abordagens no planejamento e análise de inventários florestais, como por exemplo, a geoestatística, que permite modelar a variabilidade espacial de uma variável de interesse para prever estimativas em locais não amostrados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A proeminência da geoestatística em relação a outros interpoladores espaciais está alicerçada no uso da estrutura de dependência espacial entre unidades amostrais (LANDIM, 2006), podendo refletir na redução da fração da população amostrada e em estimativas igualmente confiáveis quanto as obtidas pela estatística clássica (LUNDGREN et al., 2016).

Entretanto, não existe uma definição sobre os processos e intensidades amostrais utilizados na análise geoestatística de inventários florestais. Estes dependem das condições locais, além dos recursos disponíveis, sendo imprescindível investigar as variações que afetam a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas, em função dos processos e intensidades amostrais aplicáveis no inventário florestal.

Os estudos existentes na avaliação de procedimentos de amostragem apresentam resultados distintos nas estimativas obtidas para os mesmos processos amostrais adotados. Mello et al. (2005), avaliando os processos sistemático quadrado e sistemático desencontrado (a distância não é fixa entre as unidades amostrais), verificaram que o procedimento amostral não influenciou na caracterização da estrutura de dependência espacial do volume, diâmetro médio quadrático, área basal e altura das árvores dominantes de eucalipto. Por outro lado, Lundgren et al. (2016) avaliaram o desempenho da amostragem por grade sistemática, aleatória e aglomerada na espacialização do volume individual de madeira de eucalipto e verificaram que a amostragem aleatória apresentou desempenho superior em relação aos demais processos. Santos et al. (2011) verificaram que o padrão de distribuição das árvores próximo ao aleatório, influenciou negativamente na caracterização do grau de dependência espacial obtido na predição de volume. Na amostragem aleatória, o possível agrupamento das unidades amostrais durante a definição do arranjo amostral, pode influenciar na detecção da dependência espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Compreender o comportamento da amostragem em diferentes processos e intensidades amostrais pela análise geoestatística pode permitir o avanço da abordagem e, conseqüentemente, realizar inventários com menor esforço amostral e menores custos associados, sem perda da exatidão e precisão das estimativas. Desse modo, a aplicação da geoestatística nos processos amostrais tradicionalmente aplicados nos inventários florestais permite caracterizar o comportamento espacial das principais variáveis dendrométricas em função da distribuição das unidades amostrais na área.

Portanto, definimos a hipótese de que o processo e a intensidade amostral exercem influência na estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a precisão e exatidão de processos e intensidades amostrais na análise geoestatística de inventário florestal em povoamento de eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

Os dados deste estudo foram coletados em área com 377 hectares (14 talhões) de plantio clonal de eucalipto, no espaçamento 3 x 3 m e idades variando de 6,5 a 7,25 anos, localizado no município de Bocaiúva, Noroeste de Minas Gerais (Figura 1).

A altitude média da região é de 820 m, com predominância de solos do tipo Latossolo Vermelho Escuro Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (CALDEIRA et al., 2005). O clima é caracterizado por apresentar invernos secos e verões chuvosos, definido como tropical úmido de savana (tipo Aw) segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014). A temperatura e a precipitação média anual são de 24°C e 1.246 mm, respectivamente (CALDEIRA et al., 2005).

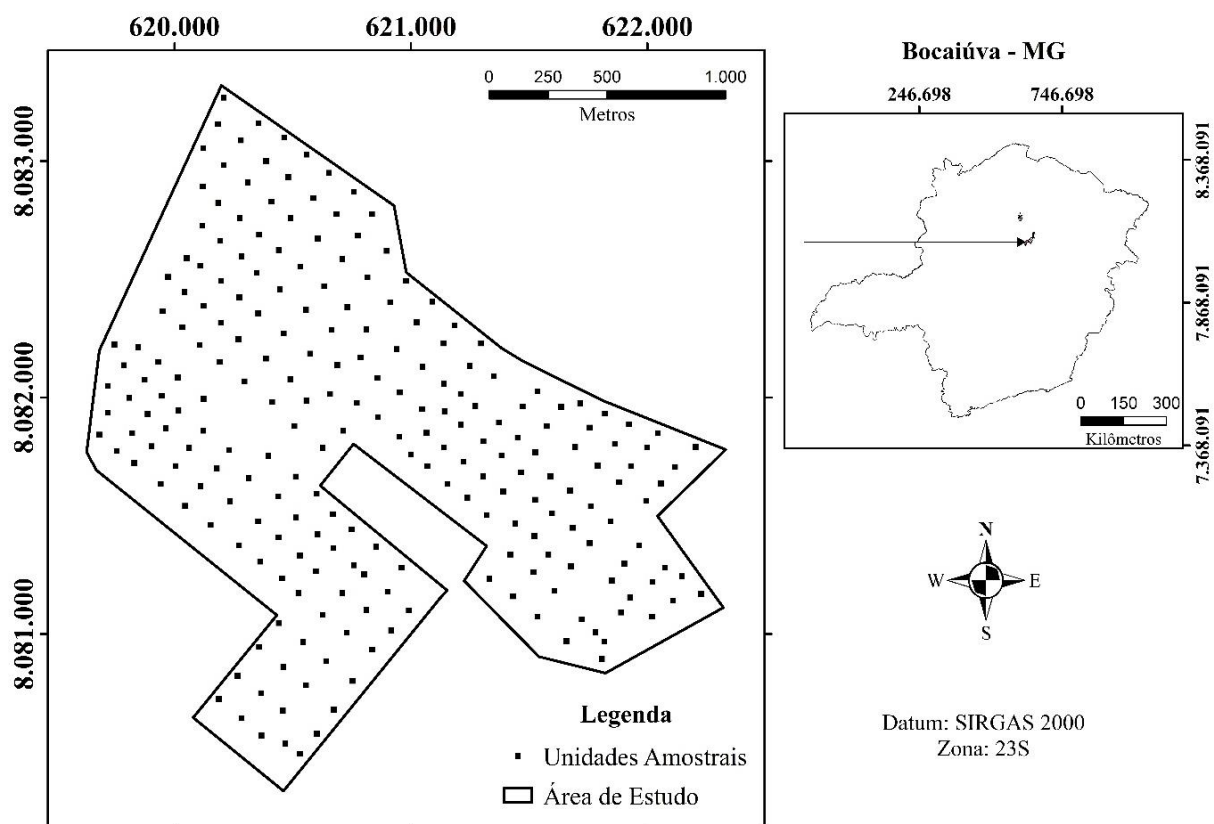


Figura 1. Localização geográfica da área e das unidades amostrais, no município de Bocaiúva - MG.

2.2. Banco de Dados

Na área de estudo foram alocadas 233 unidades amostrais, pelo método de área fixa, com área de 200 m². Nas unidades amostrais foram mensuradas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura total (Ht) e a altura média das árvores dominantes (Hd), segundo o conceito de Assmann (SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

Posteriormente, estimou-se a área basal (G), o volume de madeira (V) e o número de árvores por hectare (N) de cada unidade amostral. A coordenada geográfica central de cada unidade amostral foi obtida para a posterior análise espacial.

2.3. Processos e Intensidades Amostrais

Foram simulados os processos de amostragem casual simples (ACS), nas intensidades amostrais de uma unidade amostral para cada 16,4; 5,4; 3,2; 2,3 e 1,8 hectares, amostragem sistemática (AS), nas intensidades de uma unidade amostral para cada 16,4; 6,5; 3,2; 2,3 e 1,8 hectares e em conglomerados (AC), nas intensidades de uma unidade amostral para cada 16,4; 5,4; 3,2 e 2,3 hectares. Os conglomerados foram organizados na forma de um quadrado, em que as subunidades, equidistantes entre si, foram sistematizadas nos vértices de cada conglomerado.

A intensidade amostral de uma unidade amostral para 1,6 hectares foi considerada como valor referencial para comparar com as demais intensidades, simuladas 30 vezes para ACS e AC, e de 10 a 15 vezes para AS. Isso foi feito para verificar a distribuição assumida pelas médias espaciais estimadas das variáveis em estudo, atendendo ao teorema do limite central.

O procedimento de estudo adotado, de forma resumida, seguiu as seguintes etapas: i) definição dos arranjos para cada combinação de processo e intensidade amostral; ii) caracterização, modelagem e classificação da estrutura de dependência espacial; iii) espacialização utilizando a krigagem ordinária de todas as variáveis estudadas e para todas as simulações, e iv) obtenção dos intervalos de confiança para todas as variáveis e comparação com os valores de referência (Figura 2).

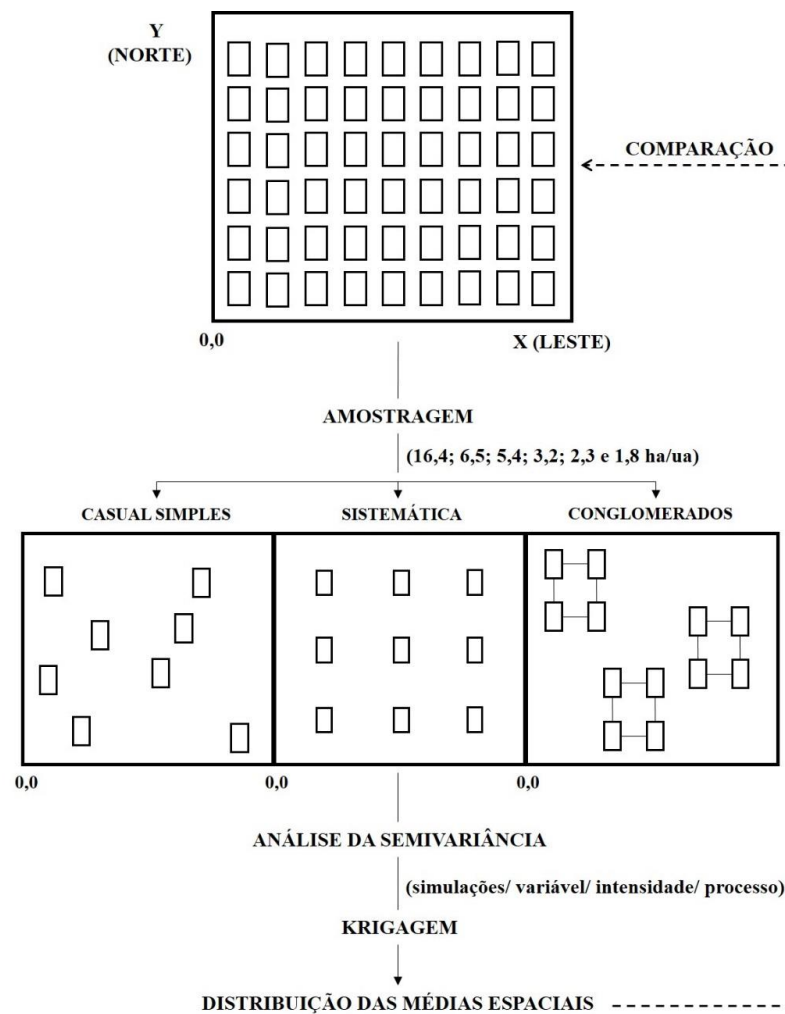


Figura 2. Etapas principais da avaliação das intensidades e processos amostrais.

2.4. Análise Geoestatística

O modelo teórico de semivariância, ajustado ao semivariograma experimental (Equação 1) em todas as simulações de inventário, foi determinado a partir da avaliação prévia dos modelos Esférico (Equação 2), Exponencial (Equação 3) e Gaussiano (Equação 4).

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

$$\begin{aligned} \text{Modelo Esférico: } \gamma(h) &= C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C \text{ para } h \geq a \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Modelo Exponencial: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a} \right)} \right] \quad (3)$$

$$\text{Modelo Gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (4)$$

Em que $\gamma(h)$ = semivariância estimada entre pares de pontos; $N(h)$ = número de pares de valores medidos $z(x_i)$, $z(x_i + h)$; separados pela distância h ; C_0 = efeito pepita; C = contribuição; a = alcance; h = distância média entre pares de pontos.

Para isto, foram selecionadas aleatoriamente para cada variável dendrométrica, três simulações de cada combinação de processo e intensidade amostral, em que os modelos foram ajustados e avaliados quanto as estatísticas de ajuste (Apêndices A, B e C). A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do Critério de Informação de Akaike – AIC (Equação 5), Critério de Informação Bayesiano - BIC (Equação 6), obtidos por meio da função de Máxima Verossimilhança; e Erro Médio Reduzido - \overline{ER} (Equação 7) e Desvio Padrão dos Erros Reduzidos - S_{er} (Equação 8), obtidos a partir da validação cruzada.

$$AIC = -2 \log L + 2K \quad (5)$$

$$BIC = -2 \log L + 2K \log(n) \quad (6)$$

Em que: L = Verossimilhança do modelo candidato; K = Número de parâmetros do modelo; n é o número de observações.

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (7)$$

$$S_{er} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \right\}^2} \quad (8)$$

Em que: $z(x_{i0})$ = valor observado no ponto i_0 ; $\hat{z}(x_{i0})$ = valor estimado no ponto i_0 ; $\sigma(x_{i0})$ = desvio padrão da krigagem no ponto i_0 .

O AIC mede a distância da curva de um modelo ajustado a uma curva padrão (ARAÚJO et al., 2018). A diferença do AIC ($\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min}$) é a estatística utilizada na comparação dos modelos (BURNHAN; ANDERSON, 2002), em que: AIC_i = Valor de AIC para o modelo (i); AIC_{\min} = Valor de AIC para o modelo suporte ($< AIC$). Para valores de Δ_i menor do que dois, o modelo (i) é estatisticamente igual ao modelo suporte, demonstrando mesma identidade entre os modelos. O \overline{ER} mais próximo de zero e S_{er} mais próximo de um, representam melhor qualidade do ajuste e ausência ou mínima tendência associada às estimativas.

Em seguida, para todas as simulações, foi construído o semivariograma experimental para obtenção dos parâmetros iniciais efeito pepita (C_0), contribuição (C) e alcance (a), (Equação 1) (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Além disso, foram analisados os semivariogramas direcionais (0, 45, 90 e 135°) com o objetivo de detectar a presença de anisotropia. Quando presente, a correção foi realizada para obtenção de um semivariograma isotrópico. No semivariograma experimental construído para cada simulação, foi ajustado o modelo Esférico (Equação 2), que apresentou, em geral, as melhores estatísticas de ajuste para todas as variáveis. Os parâmetros dos modelos foram obtidos pelo método da Máxima Verossimilhança, utilizando o pacote Geor (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001) do software R (R CORE TEAM, 2015).

Com os parâmetros ajustados, obteve-se o Índice de Dependência Espacial (Equação 9), classificado como baixa ($IDE \leq 0,25$), moderada ($0,25 < IDE \leq 0,75$) e forte ($IDE > 0,75$) dependência espacial, conforme descrito por Zimback (2003).

$$IDE = \frac{C}{(C_0 + C)} \quad (9)$$

Comprovada a dependência espacial das simulações de processo e intensidade amostral de todas as variáveis dendrométricas, foi realizada a krigagem ordinária (Equação 10) para obtenção das médias espaciais.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (10)$$

Em que: $Z(x_0)$ = estimativa no ponto não amostrado; $Z(x_i)$ = valor observado no i-ésimo ponto amostral; n = número de pontos amostrados; λ_i = peso associado aos i-ésimos pontos amostrados ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Após a obtenção das médias espaciais de todas as simulações, foram calculados o coeficiente de variação relativo (CV%) e o desvio padrão das médias ($S_{\bar{x}}$) de cada combinação de processo e intensidade amostral por variável.

Em seguida, foram construídos os intervalos de confiança da média espacial (Equação 13), com α igual a 5 %, a partir do erro de amostragem absoluto (Equação 11). Além disso, foi calculado o erro de amostragem relativo (Equação 12).

$$EA = \pm t S_{\bar{x}} \quad (11)$$

$$E_{(\%)} = \pm \frac{t S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (12)$$

$$\bar{x} \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} S_{\bar{x}} \quad (13)$$

Em que: E_a = erro de amostragem absoluto; E_r = erro de amostragem relativo; $S_{\bar{x}}$ = desvio padrão das médias espaciais das combinações de processo e intensidade amostral; \bar{x} = média aritmética das médias espaciais das combinações de processo e intensidade amostral por variável.

Para todas as variáveis, foi escolhida uma simulação aleatória de cada combinação de processo e intensidade amostral para a elaboração dos mapas temáticos. A Exatidão Global – EG (Equação 14) foi a estatística utilizada para avaliar a similaridade entre os mapas dos processos e intensidades amostrais com o mapa de referência de cada variável dendrométrica. Os valores de EG foram obtidos a partir da matriz de erros, descrita por De Bastiani et al. (2012). A EG mais próxima de 1 significa uma maior acuracidade do mapa, ou seja, maior similaridade com o mapa de referência. Os mapas temáticos foram obtidos pelo *software* ArcGis 10.2.

$$EG = \sum_{i=1}^m \frac{n_{ii}}{n} \quad (14)$$

Em que n_{ii} = pixels convergentes entre as classes (mapa da amostragem *versus* mapa padrão), n = número total de pixels do mapa de referência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as variáveis dendrométricas avaliadas, observou-se que a estrutura de dependência espacial foi detectada na totalidade das 1.980 simulações realizadas, independente das variações de processo e intensidade amostral (Tabela 1). Entretanto, a força da dependência espacial foi influenciada por estas variações de procedimento amostral, abrangendo as classes fraca, moderada e forte, dependendo do arranjo amostral obtido em cada simulação. Em análises geoestatísticas, variações nos processos amostrais podem não exercer influência significativa na detecção da dependência espacial de variáveis dendrométricas de eucalipto (LUNDGREN et al., 2016; MELLO et al., 2005), apresentando sobretudo, maior efeito na correta caracterização da sua força. A detecção da dependência espacial está mais condicionada a fração amostrada da população, onde intensidades amostrais insuficientes podem induzir a falta de padrões espaciais mesmo quando existentes (SANTOS et al., 2011), representada pelo efeito pepita puro (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A medida em que a intensidade amostral aumentou, os parâmetros, estatísticas de ajuste e a dependência espacial média se aproximaram dos valores de referência (R). Essa tendência foi observada em todos os processos amostrais. Isso implica dizer que em inventários florestais com intensidades amostrais a partir de uma unidade a cada 6,5 hectares, o processo de amostragem influencia significativamente na caracterização da estrutura de dependência espacial de variável. A exceção desse comportamento foi observada para as variáveis altura total e altura média das árvores dominantes, que na menor intensidade amostral (principalmente em ACS e AC) já apresentaram a classificação de referência da dependência espacial. Dessa forma, para estas variáveis, a intensidade amostral será o fator de maior influência, onde amostragens mais intensas que a supracitada permitirão obter parâmetros mais acurados dos modelos de semivariância na análise geoestatística.

O ideal em inventários florestais é definir um tamanho ótimo de amostra que não onere a operação, e que possibilite confiança nas estimativas obtidas (LUNDGREN et al., 2016). Dessa forma, em inventários obtidos pela análise geoestatística, o processo amostral deve ser aquele que melhor caracterize a força da dependência espacial, enquanto que a intensidade amostral deve estar dentro do seu alcance, matematicamente expressos pelos parâmetros dos modelos.

Uma vez que foram observados ganhos em acurácia significativos em relação a intensidade de uma unidade a cada 16,4 hectares, e pouco significativos nas intensidades amostrais subsequentes, destacou-se o comportamento dos parâmetros médios na intensidade de uma unidade a cada 5,4 (ACS; AC) e 6,5 (AS) hectares.

Com exceção da variável número de árvores por hectare (N), a contribuição média ($C_{\bar{x}}$) foi superior na amostragem sistemática em relação aos demais processos amostrais. No entanto, os valores de contribuição para esta variável foram semelhantes entre a amostragem casual simples ($C_{\bar{x}} = 16.922,3$) e amostragem sistemática ($C_{\bar{x}} = 16.392,0$), mesmo esta última apresentando maior intensidade amostral (6,5 hectares). A contribuição é um importante parâmetro do semivariograma, pois representa o campo em que a semivariância é função da distância, em que a força da dependência espacial é matematicamente expressada (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Desse modo, a amostragem sistemática foi superior em captar a força da estrutura de dependência espacial para todas as variáveis.

Em relação ao alcance médio ($a_{\bar{x}}$) dos modelos, verificou-se que quase todas as variáveis apresentaram maiores valores na amostragem sistemática, sendo exceção, para a variável área basal (ACS = 405 m; AS = 318 m, AC = 439 m). Os valores de alcance médio encontrados representam o raio, em metros, dos estratos considerados homogêneos dentro da área total (MELLO et al., 2005).

Tabela 1. Valores médios e desvios das simulações de amostragem, dos parâmetros e estatísticas de ajuste do modelo de semivariância esférico e índice de dependência espacial para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (HD), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N).

PA	IA	Parâmetros					Estatísticas de Ajuste						Dependência Espacial							
		C _{0x̄}	C _{0s̄x̄}	C _{x̄}	C _{s̄x̄}	a _{x̄}	a _{s̄x̄}	AIC _{x̄}	AIC _{s̄x̄}	BIC _{x̄}	BIC _{s̄x̄}	ER _{x̄}	ER _{s̄x̄}	Ser _{x̄}	Ser _{s̄x̄}	IDE _{x̄}	IDE _{s̄x̄}	B(%)	M(%)	F(%)
Diâmetro a 1,30 m do solo (cm.ha⁻¹)																				
R	1,6	1,068	-	0,628	-	537,7	-	761,7	-	775,5	-	-0,001	-	1,02	-	37,0	-	-	-	-
	16,4	0,673	0,781	0,993	0,868	366,8	296,7	82,1	7,8	86,7	7,8	-0,013	0,045	1,57	0,13	59,5	44,4	30,0	20,0	50,0
	5,4	0,839	0,540	0,816	0,595	438,4	167,1	235,5	12,5	244,5	12,5	-0,002	0,009	1,16	0,04	48,1	32,1	30,0	43,3	26,7
ACS	3,2	0,972	0,313	0,685	0,217	483,3	145,2	390,4	16,0	401,5	16,0	-0,001	0,005	1,13	0,02	41,1	14,5	16,7	80,0	3,3
	2,3	1,060	0,174	0,640	0,120	498,3	73,7	540,2	15,4	552,6	15,4	-0,001	0,002	1,07	0,01	37,9	7,6	3,3	96,7	0,0
	1,8	1,025	0,100	0,657	0,079	535,5	41,2	685,0	12,2	698,4	12,2	-0,001	0,001	1,04	0,00	39,0	5,0	0,0	100,0	0,0
	16,4	0,837	0,926	0,992	1,056	501,6	254,0	84,7	8,9	89,2	8,9	0,010	0,018	1,09	0,04	53,9	47,6	40,0	13,3	46,7
	6,5	0,700	0,492	1,126	0,639	500,8	124,0	201,9	12,3	210,1	12,3	-0,003	0,012	1,10	0,02	59,6	30,2	20,0	60,0	20,0
AS	3,2	1,144	0,246	0,622	0,183	469,2	64,1	399,3	14,6	410,3	14,6	-0,001	0,004	1,06	0,02	35,5	10,8	20,0	80,0	0,0
	2,3	1,045	0,141	0,642	0,133	479,6	49,1	540,2	11,7	552,6	11,7	-0,001	0,003	1,04	0,01	38,1	7,5	0,0	100,0	0,0
	1,8	1,066	0,075	0,611	0,060	516,3	41,4	688,0	10,4	701,4	10,4	-0,001	0,001	1,03	0,00	36,5	3,4	0,0	100,0	0,0
	16,4	0,594	0,622	0,731	0,519	493,6	337,1	75,8	12,7	80,5	12,7	-0,004	0,026	1,15	0,11	60,6	35,3	20,0	40,0	40,0
	5,4	0,631	0,509	0,920	0,480	430,5	118,2	231,6	17,5	240,7	17,5	-0,001	0,005	1,08	0,04	60,4	28,6	10,0	53,3	36,7
AC	3,2	0,652	0,336	0,914	0,315	413,6	109,3	384,2	13,7	395,3	13,7	-0,002	0,004	1,05	0,02	59,2	20,3	0,0	83,3	16,7
	2,3	0,902	0,165	0,728	0,154	467,1	80,8	529,8	15,6	542,2	15,6	-0,001	0,003	1,04	0,01	44,9	9,2	0,0	100,0	0,0
Área Basal (m².ha⁻¹)																				
R	1,6	6,640	-	2,913	-	335,1	-	1.184,7	-	1.198,5	-	-0,005	-	1,03	-	30,0	-	-	-	-
	16,4	5,818	5,768	4,143	4,487	368,3	291,8	123,2	10,1	127,8	10,1	-0,011	0,034	1,18	0,11	47,4	45,0	46,7	16,7	36,7
	5,4	4,702	3,489	4,936	3,928	405,0	241,2	359,7	13,6	368,7	13,6	-0,005	0,006	1,07	0,04	50,7	37,9	30,0	40,0	30,0
ACS	3,2	6,021	2,544	3,674	3,047	406,4	206,9	600,3	18,4	611,4	18,4	-0,003	0,003	1,05	0,01	36,1	28,0	36,7	53,3	10,0
	2,3	6,355	1,545	3,304	1,500	437,7	164,0	831,7	14,8	844,1	14,8	-0,004	0,002	0,94	0,30	34,0	15,1	33,3	66,7	0,0
	1,8	6,388	1,040	2,931	0,991	381,0	124,1	1.062,6	13,0	1.076,0	13,0	-0,003	0,001	1,03	0,01	31,4	10,4	26,7	73,3	0,0
	16,4	4,051	4,088	4,911	4,277	333,1	160,0	122,0	9,2	126,5	9,2	-0,011	0,031	1,14	0,08	51,0	45,3	40,0	20,0	40,0
	6,5	4,765	3,982	5,322	4,141	318,5	172,0	304,4	10,4	312,6	10,4	-0,007	0,008	1,08	0,03	52,1	41,1	30,0	30,0	40,0
AS	3,2	8,188	1,361	1,535	1,500	490,7	239,8	603,2	11,1	614,3	11,1	-0,004	0,005	1,05	0,01	15,4	13,3	90,0	10,0	0,0
	2,3	5,895	1,584	4,022	1,347	387,1	106,5	833,7	8,7	846,0	8,7	-0,003	0,002	1,04	0,01	40,9	14,7	10,0	90,0	0,0
	1,8	6,904	1,047	2,712	0,932	413,2	97,6	1.069,2	9,3	1.069,2	9,3	-0,003	0,003	1,04	0,01	28,3	10,1	53,3	46,7	0,0
	16,4	4,766	5,232	3,349	3,183	317,7	261,9	121,3	13,9	126,0	13,9	-0,016	0,036	1,18	0,13	46,4	39,7	36,7	36,7	26,7
	5,4	4,770	2,269	3,417	2,669	439,7	207,2	357,2	17,5	366,3	17,5	-0,002	0,008	1,07	0,03	39,5	26,6	23,3	63,3	13,3
AC	3,2	4,101	2,451	4,534	2,567	330,9	143,0	597,7	17,5	608,9	17,5	-0,004	0,005	1,06	0,02	52,7	28,7	13,3	56,7	30,0
	2,3	4,274	2,037	4,641	2,078	303,5	95,1	821,5	15,2	833,9	15,2	-0,003	0,002	1,04	0,01	51,9	22,7	3,3	83,3	13,3

Tabela 1. Continuação...

PA	IA	Parâmetros						Estatísticas de Ajuste								Dependência Espacial				
		C _{0x}	C _{0Sx}	C _x	C _{Sx}	a _x	a _{Sx}	AIC _x	AIC _{Sx}	BIC _x	BIC _{Sx}	ER _x	ER _{Sx}	Ser _x	Ser _{Sx}	IDE _x	IDE _{Sx}	B(%)	M(%)	F(%)
Altura Total (m.ha⁻¹)																				
R	1,6	2,979	-	9,448	-	566,9	-	1138,2	-	1152,0	-	-0,003	-	1,01	-	76,0	-	-	-	-
ACS	16,4	1,962	4,035	9,445	3,993	518,2	240,4	125,1	7,5	129,7	7,5	-0,007	0,040	1,10	0,09	85,1	30,8	10,0	10,0	80,0
	5,4	2,714	1,989	9,415	2,178	513,7	87,2	363,7	11,6	372,7	11,6	-0,002	0,009	1,06	0,02	77,8	15,6	0,0	36,7	63,3
	3,2	2,863	1,016	9,445	1,130	528,2	61,1	592,6	14,5	603,6	14,5	-0,005	0,005	1,03	0,01	76,9	7,5	0,0	33,3	66,7
	2,3	2,900	0,676	9,993	2,409	573,6	83,5	810,1	14,7	822,4	14,7	-0,004	0,002	1,02	0,01	77,3	5,8	0,0	36,7	63,3
	1,8	2,909	0,341	9,738	2,115	583,9	79,3	1.028,7	9,0	1.042,1	9,0	-0,003	0,001	1,01	0,00	76,4	3,8	0,0	40,0	60,0
AS	16,4	6,004	6,377	6,387	6,603	364,8	143,0	130,5	4,6	135,1	4,6	0,013	0,011	1,07	0,03	51,0	49,8	46,7	6,7	46,7
	6,5	1,225	1,934	11,039	2,322	556,6	69,5	305,2	8,7	313,4	8,7	-0,006	0,005	1,03	0,04	89,8	16,5	0,0	20,0	80,0
	3,2	3,524	0,919	8,950	1,283	557,5	22,1	599,6	10,8	610,6	10,8	-0,006	0,003	1,03	0,01	71,6	7,6	0,0	70,0	30,0
	2,3	3,049	0,561	10,158	2,179	598,6	141,3	815,2	10,7	827,6	10,7	-0,004	0,003	1,02	0,01	76,6	4,5	0,0	30,0	70,0
	1,8	3,011	0,248	9,837	2,064	593,9	112,5	1.031,1	9,7	1.044,5	9,7	-0,004	0,001	1,01	0,00	76,2	3,1	0,0	33,3	66,7
AC	16,4	2,044	3,342	7,985	4,044	524,8	280,3	121,2	10,0	125,9	10,0	0,005	0,035	1,12	0,18	81,5	28,8	6,7	20,0	73,3
	5,4	1,313	1,547	10,379	2,205	502,2	113,8	357,3	16,8	366,4	16,8	-0,003	0,005	1,04	0,04	89,2	12,9	0,0	10,0	90,0
	3,2	1,809	0,905	11,111	1,938	535,2	106,0	594,4	13,7	605,6	13,7	-0,005	0,004	1,03	0,01	86,5	7,6	0,0	6,7	93,3
	2,3	2,232	0,785	10,652	3,143	562,0	87,3	801,4	14,7	813,8	14,7	-0,030	0,142	1,02	0,01	81,9	6,7	0,0	13,3	86,7
Altura Média das Árvores Dominantes (m.ha⁻¹)																				
R	1,6	0,138	-	14,033	-	571,8	-	1.063,6	-	1.092,8	-	-0,003	-	0,99	-	99,0	-	-	-	-
ACS	16,4	1,315	2,753	11,401	3,011	578,6	171,3	126,9	5,8	131,5	5,8	-0,019	0,040	1,11	0,11	90,2	20,2	0,0	16,7	83,3
	5,4	0,515	0,700	12,788	1,423	563,7	54,3	354,8	12,6	363,8	12,6	-0,005	0,011	1,02	0,04	96,2	4,8	0,0	0,0	100,0
	3,2	0,424	0,485	13,223	1,437	562,6	39,8	569,0	13,2	580,0	13,2	-0,005	0,008	1,01	0,02	97,1	3,4	0,0	0,0	100,0
	2,3	0,184	0,218	14,175	2,799	584,7	98,5	766,8	11,6	779,1	11,6	-0,005	0,003	1,00	0,02	98,8	1,4	0,0	0,0	100,0
	1,8	0,228	0,163	14,103	2,209	591,6	77,7	966,9	7,3	980,3	7,3	-0,003	0,003	1,01	0,00	98,3	1,2	0,0	0,0	100,0
AS	16,4	6,277	7,083	7,421	6,752	436,6	220,6	132,7	2,9	137,3	2,9	0,006	0,012	1,07	0,04	55,5	49,8	40,0	6,7	53,3
	6,5	0,291	0,758	13,105	1,407	588,0	25,7	306,3	6,0	314,6	6,0	-0,005	0,003	0,99	0,04	97,9	5,5	0,0	0,0	100,0
	3,2	0,936	0,693	12,725	0,778	597,9	35,6	575,7	16,1	586,8	16,1	-0,006	0,006	1,01	0,01	93,2	5,0	0,0	0,0	100,0
	2,3	0,339	0,310	14,861	3,810	622,1	133,5	773,6	11,8	786,0	11,8	-0,003	0,006	1,01	0,01	97,7	2,3	0,0	0,0	100,0
	1,8	0,233	0,240	14,769	4,211	608,7	130,4	969,0	8,4	982,4	8,4	-0,003	0,002	1,01	0,00	98,3	1,8	0,0	0,0	100,0
AC	16,4	0,072	0,241	10,728	3,268	642,3	238,9	116,9	8,3	121,6	8,3	-0,004	0,022	0,97	0,15	99,4	2,1	0,0	0,0	100,0
	5,4	0,108	0,338	12,226	2,398	550,8	82,3	346,0	15,8	355,1	15,8	-0,004	0,005	0,96	0,05	99,2	2,6	0,0	0,0	100,0
	3,2	0,002	0,012	14,151	3,562	573,6	104,1	570,9	12,0	582,1	12,0	-0,004	0,006	0,98	0,03	100,0	0,1	0,0	0,0	100,0
	2,3	0,061	0,122	14,077	1,149	572,1	32,0	763,6	9,1	776,0	9,1	-0,002	0,003	0,99	0,01	99,5	0,9	0,0	0,0	100,0

Tabela 1. Continuação...

PA	IA	Parâmetros						Estatísticas de Ajuste								Dependência Espacial				
		$C_{0\bar{x}}$	$C_{0S\bar{x}}$	$C_{\bar{x}}$	$C_{S\bar{x}}$	$a_{\bar{x}}$	$a_{S\bar{x}}$	$AIC_{\bar{x}}$	$AIC_{S\bar{x}}$	$BIC_{\bar{x}}$	$BIC_{S\bar{x}}$	$ER_{\bar{x}}$	$ER_{S\bar{x}}$	$Ser_{\bar{x}}$	$Ser_{S\bar{x}}$	$IDE_{\bar{x}}$	$IDE_{S\bar{x}}$	B(%)	M(%)	F(%)
Volume de Madeira (m³.ha⁻¹)																				
R	1,8	1.208,1	-	1.304,9	-	578,58	-	2.434,4	-	2.448,2	-	-0,004	-	1,02	-	52,0	-	-	-	-
ACS	16,4	1.095,2	1.162,6	1.289,5	1.026,5	554,0	446,9	248,3	9,2	252,9	9,2	0,002	0,034	1,14	0,19	57,0	42,5	33,3	23,3	43,3
	5,4	809,1	642,4	1.557,4	705,6	446,6	190,8	741,2	11,5	750,2	11,5	-0,001	0,007	1,07	0,03	65,4	26,4	6,7	60,0	33,3
	3,2	1.120,7	425,7	1.319,9	375,4	476,4	122,4	1.235,4	16,0	1.246,4	16,0	-0,002	0,004	1,04	0,02	54,6	15,7	3,3	90,0	6,7
	2,3	1.116,8	252,9	1.346,5	240,1	513,3	102,3	1.711,2	14,1	1.723,6	14,1	-0,003	0,003	1,02	0,01	54,8	9,5	0,0	96,7	3,3
	1,8	1.180,1	96,2	1.273,8	117,0	574,5	53,6	2.193,7	9,2	2.207,1	9,2	-0,002	0,001	1,02	0,00	51,7	3,8	0,0	100,0	0,0
AS	16,4	1.165,1	1.189,8	1.189,1	1.304,6	400,0	202,0	250,9	5,5	255,5	5,5	0,015	0,019	1,10	0,04	48,2	50,4	53,3	0,0	46,7
	6,5	635,4	910,2	1.908,8	986,8	495,9	73,1	621,2	8,0	629,4	8,0	-0,002	0,005	1,06	0,02	74,2	38,7	20,0	10,0	70,0
	3,2	1.349,9	243,1	1.151,2	276,7	549,8	64,3	1.240,5	11,4	1.251,6	11,4	-0,003	0,003	1,03	0,01	45,9	8,6	0,0	100,0	0,0
	2,3	1.052,3	247,1	1.382,2	219,0	504,6	63,7	1.707,7	9,2	1.720,1	9,2	-0,003	0,002	1,03	0,01	56,9	9,8	0,0	90,0	10,0
	1,8	1.207,5	89,3	1.268,9	70,1	564,9	26,0	2.195,7	9,3	2.209,1	9,3	-0,003	0,001	1,02	0,00	51,3	2,9	0,0	100,0	0,0
AC	16,4	814,4	964,9	1.192,5	826,8	581,5	388,3	251,8	11,6	256,5	11,6	0,005	0,018	1,16	0,13	62,9	33,2	16,7	43,3	40,0
	5,4	697,7	453,5	1.519,2	390,1	441,8	149,7	752,5	14,8	761,6	14,8	0,001	0,007	1,06	0,02	69,1	17,3	0,0	66,7	33,3
	3,2	694,1	380,4	1.683,4	712,1	442,4	150,3	1.251,8	14,4	1.263,0	14,4	-0,003	0,004	1,04	0,01	69,6	17,0	0,0	66,7	33,3
	2,3	900,5	226,5	1.516,7	452,2	485,2	166,2	1.705,4	16,3	1.717,8	16,4	-0,003	0,003	1,03	0,01	62,5	10,3	0,0	90,0	10,0
Número de Árvores por Hectare (n.ha⁻¹)																				
R	1,8	15.305,7	-	13.462,8	-	500,0	-	3.019,2	-	2.448,2	-	-0,005	-	1,02	-	47,0	-	-	-	-
ACS	16,4	9.764,3	15.389,7	18.048,7	13.363,7	476,5	401,1	305,9	9,1	310,5	9,1	-0,017	0,049	1,20	0,11	65,21	40,0	23,3	26,7	50,0
	5,4	10.682,5	8.350,1	16.922,3	9.604,5	398,9	158,0	916,4	15,1	925,4	15,1	-0,007	0,011	1,08	0,04	60,41	31,5	13,3	53,3	33,3
	3,2	12.688,8	5.469,1	15.145,8	5.604,2	411,8	103,8	1.525,3	19,1	1.536,4	19,1	-0,006	0,005	1,06	0,02	53,41	19,1	13,3	76,7	10,0
	2,3	13.965,5	3.338,8	13.647,4	2.898,9	439,5	89,9	2.116,8	15,8	2.129,2	15,8	-0,004	0,003	1,03	0,01	49,25	10,5	0,0	100,0	0,0
	1,8	14.342,6	1.847,0	13.034,7	1.536,5	459,9	52,2	2.717,5	13,2	2.730,9	13,2	-0,004	0,003	1,03	0,01	47,37	4,7	0,0	100,0	0,0
AS	16,4	13.912,8	12.864,2	10.478,7	12.421,1	382,8	172,9	304,4	7,1	309,0	7,1	-0,023	0,018	1,10	0,05	44,97	49,7	53,3	6,7	40,0
	6,5	9.051,0	8.662,2	16.392,0	10.973,5	431,6	104,8	757,4	10,6	765,6	10,6	-0,011	0,012	1,09	0,03	61,28	39,4	30,0	10,0	60,0
	3,2	16.627,7	5.428,1	10.338,7	4.286,8	473,1	68,3	1.523,9	19,2	1.535,0	19,2	-0,005	0,005	1,05	0,01	38,74	15,0	20,0	80,0	0,0
	2,3	14.545,6	2.090,3	15.183,8	2.986,9	469,5	79,8	2.124,5	10,7	2.136,9	10,7	-0,007	0,003	1,03	0,01	50,85	7,5	0,0	100,0	0,0
	1,8	15.582,1	1.219,4	13.317,8	1.354,2	489,8	47,2	2.726,1	7,5	2.739,5	7,5	-0,005	0,002	1,03	0,01	46,06	4,2	0,0	100,0	0,0
AC	16,4	12.400,4	12.182,9	13.812,4	11.419,0	513,2	411,1	313,6	14,2	318,4	14,2	-0,018	0,050	1,24	0,20	52,53	37,2	23,3	43,3	33,3
	5,4	11.923,8	6.023,7	13.776,6	5.400,6	369,8	110,8	934,0	18,0	943,2	18,0	-0,007	0,008	1,09	0,04	54,67	18,1	3,3	80,0	16,7
	3,2	11.637,6	5.977,3	13.597,7	5.313,9	361,8	96,1	1.552,8	17,3	1.563,9	17,3	-0,005	0,004	1,05	0,01	54,70	22,4	6,7	73,3	20,0
	2,3	14.309,2	2.357,7	12.805,3	2.521,2	394,2	71,3	2.126,3	13,3	2.138,7	13,3	-0,004	0,002	1,03	0,01	47,05	8,5	0,0	100,0	0,0

Em que: PA = processo amostral; IA = intensidade amostral em hectares por unidade amostral; R, ACS, AS e AC = inventário de referência, amostragem casual simples, sistemática e em conglomerados respectivamente; $C_{0\bar{x}}$, $C_{0S\bar{x}}$, $C_{\bar{x}}$, $a_{\bar{x}}$, $AIC_{\bar{x}}$, $BIC_{\bar{x}}$, $ER_{\bar{x}}$, $IDE_{\bar{x}}$ = média do efeito pepita, contribuição, critério de informação de Akaike, critério de informação Bayesiano, erro médio reduzido, índice de dependência espacial das simulações realizadas, respectivamente; $C_{0S\bar{x}}$, $C_{S\bar{x}}$, $a_{S\bar{x}}$, $AIC_{S\bar{x}}$, $BIC_{S\bar{x}}$, $ER_{S\bar{x}}$, $IDE_{S\bar{x}}$ = desvio padrão da média do efeito pepita, contribuição, alcance, critério de informação de Akaike, critério de informação Bayesiano, erro médio reduzido e índice de dependência espacial das simulações realizadas. A proporção de simulações com baixa, moderada e forte dependência espacial estão representados por B(%), M(%), F(%), respectivamente.

Para todas as variáveis em análise, observou-se que a intensidade amostral de uma unidade a cada 16,4 hectares apresentou resíduos médios ($\overline{ER_x}$ e Ser_x) retratando menor acurácia (mais distantes de 0 e 1, respectivamente) em relação às demais intensidades. A partir de uma unidade para cada 5,4 e 6,5 hectares, foram observados valores mais próximos de 0 e 1 para o $\overline{ER_x}$ e Ser_x , respectivamente. Nas intensidades amostrais de uma unidade a cada 5,4 (ACS; AC) e 6,5 (AS) hectares, não foi observada nenhuma tendência em função do processo amostral para estas estatísticas de ajuste. No entanto, como são valores médios e de baixa magnitude, a análise gráfica do erro médio reduzido para cada simulação (\overline{ER}) foi mais adequada para avaliar, em cada variável, a influência do processo amostral nesta estatística de ajuste.

Foi possível observar que a amostragem sistemática propiciou menor amplitude na dispersão de \overline{ER} para todas as variáveis (Figura 3) e apresentou os parâmetros e estatísticas de ajuste mais acurados na intensidade de uma unidade amostral para cada 6,5 hectares, pois além de permitir a captação da dependência espacial, foi superior em descrever com robustez estatística, a força da autocorrelação espacial das variáveis (Tabela 1). Segundo Yamamoto e Landim (2013), em análises geoestatísticas, a amostragem sistemática é a que permite o melhor resultado, em função da distribuição espacial regular das amostras.

Considerando todas as combinações de processos e intensidades amostrais, obteve-se estrutura moderada de dependência espacial para a variável diâmetro a 1,30 m do solo ($\overline{ID\bar{E}}\% = 48,71$), área basal ($\overline{ID\bar{E}}\% = 41$), volume de madeira ($\overline{ID\bar{E}}\% = 59$) e número de árvore por hectare ($\overline{ID\bar{E}}\% = 52$). Para altura total ($\overline{ID\bar{E}}\% = 78$) e, principalmente, para altura média das árvores dominantes ($\overline{ID\bar{E}}\% = 94,72$), foi possível observar forte autocorrelação espacial destas, demonstrando maior continuidade espacial em relação as demais variáveis em análise. No caso da altura média das árvores dominantes (HD), apenas nas amostragens aleatória e sistemática de uma unidade em 16,4 hectares não foi detectada forte dependência espacial em todas as simulações. Na amostragem aleatória, cinco destas simulações (16,7%) foram classificadas como moderada, e na amostragem sistemática, seis simulações (40%) foram classificadas como baixa e uma considerada moderada (6,7%).

Com isso, é possível observar que a altura média das árvores dominantes apresenta dependência espacial forte por natureza. Esse resultado evidencia a sua baixa exposição a fontes de variação que não a do sítio florestal (densidade do povoamento, tratos e práticas silviculturais, entre outros) (SCOLFORO, 2006), propiciando padrões espaciais bem definidos, que após a definição da idade de referência, podem ser considerados como o índice de local.

A forte estrutura de dependência espacial da Altura média das árvores dominantes, comumente encontrada em povoamentos de eucalipto (GUEDES et al., 2015; KANEGAE JUNIOR et al., 2007; MELLO et al., 2005), demonstra o grande potencial desta variável na espacialização da capacidade produtiva de um local. Como por exemplo, a estrutura de dependência espacial da altura média das árvores dominantes de *Tectona grandis* L. f. (teca), e consequentemente criação de estratos homogêneos de manejo, permitem prescrever intervenções precisas e direcionadas ao longo do crescimento do povoamento (PELLISSARI et al., 2014). É primordial considerar a relação espacial entre as unidades amostrais na classificação da capacidade produtiva em plantios florestais, em especial os de eucalipto, tendo em vista a ampla dispersão geográfica dos plantios do gênero no Brasil. Calcula-se que os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares do país, e localizam-se, principalmente, em Minas Gerais (24%), São Paulo (15%) e Mato Grosso do Sul (15%) (PÖYRY, 2017), ou seja, em regiões com características edafoclimáticas contrastantes.

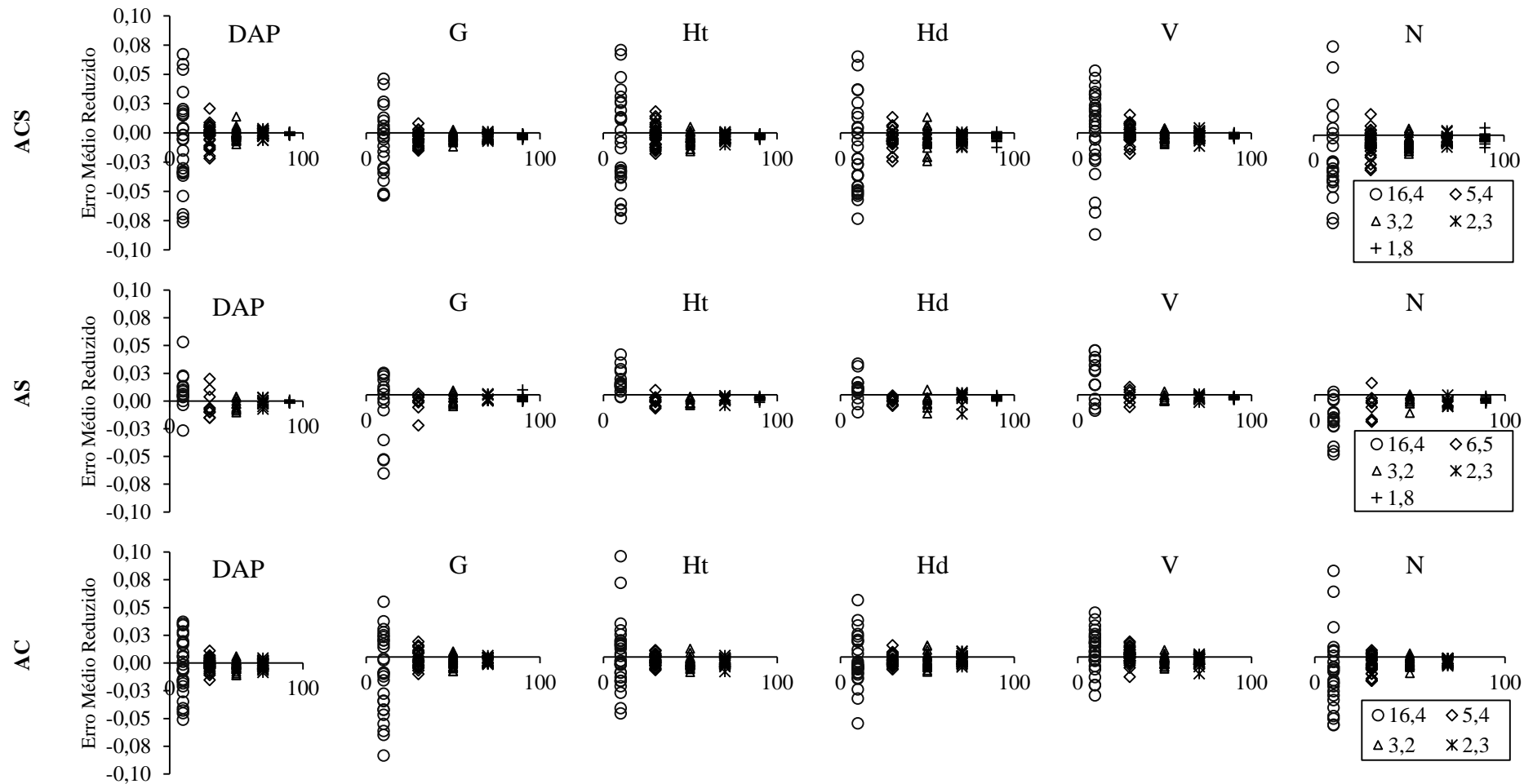


Figura 3. Erro médio reduzido (\overline{ER}), obtidos a partir da validação cruzada das 30 simulações (ACS e AC) e 10 a 15 simulações (AS), para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo médio (DAP), área basal média (G), altura total média (Ht), altura média das árvores dominantes média (Hd), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N), variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3 e 1,8 hectares por unidade amostral

Apesar da intensidade amostral influenciar na força da estrutura de dependência espacial, os intervalos de confiança para a média espacial das variáveis, em todas as intensidades avaliadas, foram precisos e exatos (Tabela 2). De maneira geral, foi observada uma redução considerável na amplitude dos intervalos de confiança para intensidades amostrais maiores, implicando no aumento da precisão dos inventários.

A exatidão encontrada nas simulações obtidas a partir de uma unidade amostral em cada 16,4 hectares, em todos os processos amostrais, demonstra o elevado desempenho da aplicação da krigagem ordinária, na predição de variáveis dendrométricas. Esta intensidade amostral propiciou erro relativo (E%) menor do que 10%, com exceção apenas da variável volume de madeira (V). Em termos práticos, o erro relativo comumente aceito em inventários florestais na obtenção do estoque de volume é de no máximo 10%, em termos ótimos de 5% (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). Mello et al. (2005) afirmam que na presença da componente espacial, o processamento de inventários florestais de eucalipto deve utilizar a dependência espacial das unidades amostrais na obtenção de informações dendrométricas.

Embora estes resultados demonstrem acurácia nas estimativas de posição e dispersão, a espacialização consistente não é garantida. Desse modo, considerando a influência do procedimento amostral nas estimativas geoestatísticas, a amostragem sistemática, com uma unidade amostral lançada a cada 6,5 hectares, permite estimativas extremamente precisas e exatas ($E\% < 5$) e espacialização fidedigna das variáveis dendrométricas. A espacialização é uma informação valiosa para o manejo de florestas em pé, pois permite se conhecer a variação espacial da variabilidade de interesse, e assim direcionar intervenções silviculturais em função dos fatores limitantes da produção em cada estrato mapeado (LUNDGREN et al., 2016; PELISSARI et al., 2014).

Tabela 2. Estatística descritiva dos inventários florestais, obtida a partir de estimativas espaciais, na variação das combinações de processo e intensidade amostral para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (Hd), volume de madeira (V) e número de árvore por hectare (N) em povoamento de eucalipto.

Processo	IA	Mínimo	Máximo	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	CV(%)	EA	E(%)	IC _{1-α}	\bar{R}
DAP - Diâmetro a 1,30 do solo (cm.ha⁻¹)										
ACS	16,4	14,52	15,82	15,07	0,30	1,97	0,61	4,03	14,46 \leq \bar{R} \leq 15,68	15,08
	5,4	14,74	15,41	15,10	0,15	0,99	0,31	2,02	14,79 \leq \bar{R} \leq 15,40	15,08
	3,2	14,92	15,24	15,08	0,09	0,56	0,17	1,15	14,91 \leq \bar{R} \leq 15,26	15,08
	2,3	14,97	15,22	15,08	0,06	0,40	0,12	0,82	14,96 \leq \bar{R} \leq 15,21	15,08
	1,8	15,04	15,16	15,09	0,03	0,21	0,06	0,43	15,02 \leq \bar{R} \leq 15,15	15,08
AS	16,4	14,74	15,55	15,08	0,22	1,44	0,47	3,09	14,62 \leq \bar{R} \leq 15,55	15,08
	6,5	14,94	15,29	15,10	0,09	0,63	0,21	1,42	14,88 \leq \bar{R} \leq 15,31	15,08
	3,2	14,95	15,16	15,05	0,07	0,45	0,15	1,01	14,90 \leq \bar{R} \leq 15,20	15,08
	2,3	14,92	15,12	15,03	0,06	0,42	0,14	0,94	14,89 \leq \bar{R} \leq 15,17	15,08
	1,8	15,00	15,12	15,08	0,03	0,20	0,06	0,42	15,02 \leq \bar{R} \leq 15,15	15,08
AC	16,4	14,54	15,86	15,04	0,34	2,24	0,69	4,59	14,35 \leq \bar{R} \leq 15,73	15,08
	5,4	14,75	15,27	15,01	0,12	0,80	0,24	1,63	14,77 \leq \bar{R} \leq 15,26	15,08
	3,2	14,87	15,18	15,04	0,08	0,52	0,16	1,07	14,88 \leq \bar{R} \leq 15,20	15,08
	2,3	14,89	15,18	15,02	0,07	0,49	0,15	1,00	14,87 \leq \bar{R} \leq 15,17	15,08
G - Área Basal (m².ha⁻¹)										
ACS	16,4	18,09	19,92	18,53	0,60	3,22	1,22	6,59	17,31 \leq \bar{R} \leq 19,75	18,59
	5,4	18,15	19,42	18,67	0,35	1,90	0,73	3,89	17,94 \leq \bar{R} \leq 19,39	18,59
	3,2	18,49	19,03	18,63	0,23	1,22	0,46	2,49	18,17 \leq \bar{R} \leq 19,10	18,59
	2,3	18,50	18,96	18,65	0,13	0,68	0,26	1,40	18,39 \leq \bar{R} \leq 18,91	18,59
	1,8	21,00	18,81	18,63	0,07	0,36	0,14	0,74	18,49 \leq \bar{R} \leq 18,77	18,59
AS	16,4	17,32	19,82	18,73	0,65	3,46	1,39	7,42	17,34 \leq \bar{R} \leq 20,12	18,59
	6,5	18,15	19,16	18,51	0,31	1,70	0,71	3,84	17,80 \leq \bar{R} \leq 19,21	18,59
	3,2	18,33	19,00	18,67	0,25	1,35	0,57	3,06	18,10 \leq \bar{R} \leq 19,24	18,59
	2,3	18,29	18,73	18,55	0,12	0,66	0,28	1,49	18,27 \leq \bar{R} \leq 18,82	18,59
	1,8	18,46	18,75	18,59	0,08	0,42	0,17	0,91	18,42 \leq \bar{R} \leq 18,75	18,59
AC	16,4	17,41	20,90	18,72	0,71	3,77	1,44	7,71	17,28 \leq \bar{R} \leq 20,17	18,59
	5,4	17,78	19,25	18,69	0,33	1,76	0,67	3,60	18,02 \leq \bar{R} \leq 19,36	18,59
	3,2	18,20	18,95	18,66	0,20	1,05	0,40	2,14	18,26 \leq \bar{R} \leq 19,06	18,59
	2,3	18,21	18,81	18,54	0,16	0,84	0,32	1,72	18,22 \leq \bar{R} \leq 18,86	18,59
Ht - Altura Total (m.ha⁻¹)										
ACS	16,4	21,00	23,57	22,20	0,63	2,85	1,29	5,83	20,90 \leq \bar{R} \leq 23,49	22,05
	5,4	21,85	23,10	22,34	0,34	1,50	0,69	3,08	21,65 \leq \bar{R} \leq 23,03	22,05
	3,2	21,76	22,61	22,20	0,18	0,83	0,38	1,70	21,82 \leq \bar{R} \leq 22,57	22,05
	2,3	21,92	22,41	22,10	0,14	0,64	0,29	1,31	21,81 \leq \bar{R} \leq 22,39	22,05
	1,8	21,78	22,23	22,08	0,09	0,41	0,18	0,84	21,89 \leq \bar{R} \leq 22,26	22,05
AS	16,4	21,67	22,98	22,26	0,44	2,00	0,95	4,28	21,30 \leq \bar{R} \leq 23,21	22,05
	6,5	21,88	22,50	22,19	0,22	1,00	0,50	2,26	21,69 \leq \bar{R} \leq 22,69	22,05
	3,2	21,81	22,44	22,13	0,21	0,95	0,48	2,15	21,65 \leq \bar{R} \leq 22,60	22,05
	2,3	21,89	22,30	22,07	0,14	0,62	0,31	1,41	21,75 \leq \bar{R} \leq 22,38	22,05
	1,8	21,85	22,17	22,06	0,08	0,37	0,18	0,80	21,89 \leq \bar{R} \leq 22,24	22,05
AC	16,4	21,21	25,31	22,36	1,05	4,72	2,16	9,64	20,20 \leq \bar{R} \leq 24,51	22,05
	5,4	21,38	23,13	22,30	0,39	1,77	0,81	3,61	21,49 \leq \bar{R} \leq 23,10	22,05
	3,2	21,75	22,79	22,24	0,24	1,06	0,48	2,17	21,75 \leq \bar{R} \leq 22,72	22,05
	2,3	21,57	22,45	22,02	0,20	0,91	0,41	1,87	21,61 \leq \bar{R} \leq 22,44	22,05

Tabela 2. Continuação.

Processo	IA	Mínimo	Máximo	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	CV(%)	EA	E(%)	IC _{1-α}	\bar{R}
Hd - Altura Média das Árvores Dominantes (m.ha⁻¹)										
ACS	16,4	22,29	24,65	23,53	0,58	2,45	1,18	5,00	22,35 $\leq \bar{R} \leq$ 24,71	23,33
	5,4	23,08	24,51	23,62	0,35	1,47	0,71	3,01	22,91 $\leq \bar{R} \leq$ 24,33	23,33
	3,2	23,16	23,83	23,51	0,16	0,69	0,33	1,41	23,18 $\leq \bar{R} \leq$ 23,84	23,33
	2,3	23,02	23,62	23,38	0,14	0,60	0,29	1,23	23,09 $\leq \bar{R} \leq$ 23,66	23,33
	1,8	23,07	23,48	23,36	0,08	0,36	0,17	0,74	23,18 $\leq \bar{R} \leq$ 23,53	23,33
AS	16,4	22,80	24,25	23,63	0,40	1,70	0,86	3,64	22,77 $\leq \bar{R} \leq$ 24,49	23,33
	6,5	23,24	23,92	23,57	0,20	0,83	0,44	1,87	23,13 $\leq \bar{R} \leq$ 24,02	23,33
	3,2	23,19	23,74	23,47	0,19	0,83	0,44	1,87	23,03 $\leq \bar{R} \leq$ 23,91	23,33
	2,3	23,24	23,50	23,34	0,09	0,38	0,20	0,87	23,14 $\leq \bar{R} \leq$ 23,55	23,33
	1,8	22,97	23,43	23,33	0,11	0,48	0,24	1,03	23,09 $\leq \bar{R} \leq$ 23,57	23,33
AC	16,4	22,19	26,58	23,74	1,14	4,79	2,32	9,79	21,41 $\leq \bar{R} \leq$ 26,06	23,33
	5,4	22,36	24,49	23,67	0,47	1,97	0,95	4,03	22,71 $\leq \bar{R} \leq$ 24,62	23,33
	3,2	23,01	24,17	23,57	0,26	1,11	0,53	2,27	23,04 $\leq \bar{R} \leq$ 24,11	23,33
	2,3	23,10	23,93	23,40	0,19	0,80	0,38	1,63	23,02 $\leq \bar{R} \leq$ 23,78	23,33
V - Volume de Madeira (m³.ha⁻¹)										
ACS	16,4	178,28	215,24	194,00	9,25	4,77	18,92	9,75	175,08 $\leq \bar{R} \leq$ 212,92	193,48
	5,4	186,64	207,13	196,14	5,10	2,60	10,43	5,32	185,70 $\leq \bar{R} \leq$ 206,57	193,48
	3,2	188,94	201,17	195,04	3,25	1,67	6,65	3,41	188,40 $\leq \bar{R} \leq$ 201,69	193,48
	2,3	191,88	199,05	194,67	1,87	0,96	3,83	1,97	190,84 $\leq \bar{R} \leq$ 198,50	193,48
	1,8	192,19	197,27	194,20	1,10	0,57	2,26	1,16	191,94 $\leq \bar{R} \leq$ 196,45	193,48
AS	16,4	177,54	212,28	196,09	9,48	4,84	20,34	10,37	175,75 $\leq \bar{R} \leq$ 216,43	193,48
	6,5	188,15	201,28	193,91	4,02	2,07	9,09	4,69	184,82 $\leq \bar{R} \leq$ 202,99	193,48
	3,2	189,96	201,29	195,02	3,92	2,01	8,88	4,55	186,14 $\leq \bar{R} \leq$ 203,90	193,48
	2,3	189,23	196,01	193,07	1,94	1,01	4,40	2,28	188,67 $\leq \bar{R} \leq$ 197,46	193,48
	1,8	192,19	195,54	193,66	1,05	0,54	2,24	1,16	191,41 $\leq \bar{R} \leq$ 195,9	193,48
AC	16,4	176,01	229,12	196,77	12,02	6,11	24,59	12,50	172,18 $\leq \bar{R} \leq$ 221,36	193,48
	5,4	184,24	206,43	195,69	5,53	2,83	11,32	5,78	184,37 $\leq \bar{R} \leq$ 207,00	193,48
	3,2	188,70	201,76	195,44	3,14	1,61	6,42	3,28	189,03 $\leq \bar{R} \leq$ 201,86	193,48
	2,3	187,88	201,12	192,88	3,00	1,55	6,13	3,18	186,75 $\leq \bar{R} \leq$ 199,01	193,48
N - Número de Árvores por Hectare (n.ha⁻¹)										
ACS	16,4	961	1093	1016	31,68	3,12	64,79	6,38	950,75 $\leq \bar{R} \leq$ 1080,32	1016
	5,4	981	1054	1022	18,74	1,83	38,33	3,75	983,85 $\leq \bar{R} \leq$ 1060,51	1016
	3,2	986	1042	1020	13,52	1,33	27,66	2,71	992,34 $\leq \bar{R} \leq$ 1047,66	1016
	2,3	1001	1035	1021	7,99	0,78	16,34	1,60	1.004,63 $\leq \bar{R} \leq$ 1037,30	1016
	1,8	1012	1030	1019	5,00	0,49	10,24	1,00	1008,80 $\leq \bar{R} \leq$ 1029,27	1016
AS	16,4	977	1066	1030	26,38	2,56	56,58	5,49	973,25 $\leq \bar{R} \leq$ 1,086,41	1016
	6,5	989	1037	1012	17,58	1,74	39,76	3,93	972,37 $\leq \bar{R} \leq$ 1,051,90	1016
	3,2	1005	1050	1025	12,65	1,23	28,61	2,79	995,97 $\leq \bar{R} \leq$ 1,053,20	1016
	2,3	1009	1037	1021	9,91	0,97	22,42	2,20	998,65 $\leq \bar{R} \leq$ 1,043,49	1016
	1,8	1010	1021	1016	3,25	0,32	6,97	0,69	1,009,14 $\leq \bar{R} \leq$ 1,023,09	1016
AC	16,4	915	1115	1035	42,26	4,08	86,43	8,35	948,74 $\leq \bar{R} \leq$ 1,121,59	1016
	5,4	989	1078	1037	22,58	2,18	46,19	4,45	991,28 $\leq \bar{R} \leq$ 1,083,66	1016
	3,2	1014	1059	1030	10,19	0,99	20,83	2,02	1,009,48 $\leq \bar{R} \leq$ 1,051,15	1016
	2,3	1008	1043	1025	7,67	0,75	15,69	1,53	1,009,57 $\leq \bar{R} \leq$ 1,040,94	1016

Em que: ACS, AS e AC representam amostragem casual simples, amostragem sistemática e amostragem em conglomerados, respectivamente; IA, \bar{x} , $S_{\bar{x}}$, CV(%), EA, E(%), IC_{1- α} , \bar{R} representam a intensidade amostral em hectares por unidade amostral, a média espacial, o desvio padrão das médias amostrais, o coeficiente de variação, o erro absoluto, o intervalo de confiança à 5% de probabilidade, e a média referencial, respectivamente.

Os mapas espaciais provenientes da krigagem ordinária (Figura 4 a 9), permitem observar que na intensidade de uma unidade amostral para 16,4 hectares, apesar da média populacional estimada ser exata, os mapas não retratam o comportamento espacial das variáveis. Nesta intensidade amostral, os estratos apresentaram baixa definição para todas as variáveis espacializadas, e em alguns casos (Figura 5: AC; Figura 9: AS e AC), inexistência de correlação espacial das unidades amostrais.

No entanto, a partir de uma unidade amostral para 6,5 (AS) e 5,4 (ACS; AC) hectares, foi observada uma melhoria significativa na definição dos estratos, principalmente para as variáveis que apresentam forte dependência espacial por natureza (Ht e Hd). Esta melhoria foi percebida em todos os processos amostrais, em que o aumento progressivo do número de unidades amostrais proporcionou uma espacialização mais próxima do mapa de referência, também verificado nos valores de exatidão global dos mapas (Tabela 3).

A exatidão global permitiu inferir sobre os mapas de forma matemática, em que foi realizada a comparação pixel a pixel (100 m²) dos mapas escolhidos em cada simulação, com o mapa de referência da variável. Dessa forma, foi possível verificar matematicamente, que a medida que a intensidade amostral aumentou, os mapas de cada simulação foram se aproximando dos respectivos mapas de referência. De maneira geral, os mapas produzidos a partir da intensidade de uma unidade amostral para cada 1,8 hectares tiveram a maior similaridade em relação ao mapa de referência. No entanto, esta intensidade amostral não condiz com os recursos normalmente disponibilizados para a realização de inventários florestais, caracterizando-se como uma superamostragem.

Os mapas confeccionados sob a amostragem de uma unidade amostral a cada 6,5 (AS) e 5,4 (ACS; AC) apresentaram valores abaixo de 50% de similaridade, exceto por raras exceções (ACS: N – 5,4 ha; AC: G – 5,4 ha). Deve-se considerar, no entanto, que são mapas que retratam apenas uma ocasião de inventário, sorteada ao acaso dentro das simulações avaliadas, podendo não representar o comportamento geral da variável.

Para uma unidade de amostra a cada 3,2 hectares, foi encontrada uma tendência de se obter uma similaridade maior do que 50% em relação ao mapa de referência. Dessa forma, a espacialização mais refinada da variável deve considerar tal intensidade amostral, independente do processo amostral adotado. Por fim, como os inventários realizados buscam inferir sobre uma gama de variáveis, não é recomendado indicar um procedimento amostral exclusivo para cada variável. Assim, a intensidade de uma unidade de amostra a cada 6,5 hectares, utilizando o processo de amostragem sistemática, propicia estimativas precisas e exatas, com acurácia na espacialização das variáveis dendrométricas.

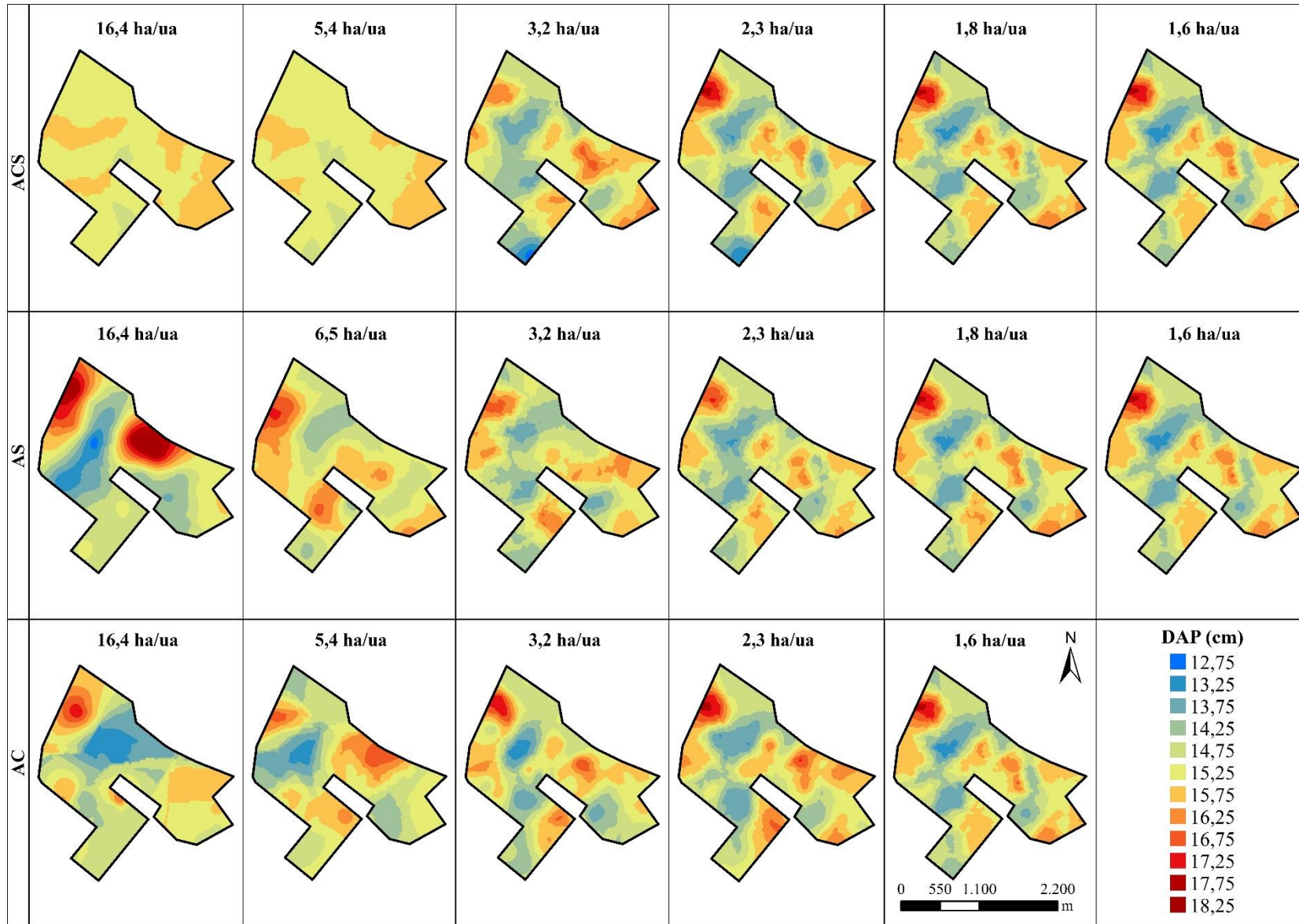


Figura 4. Espacialização do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

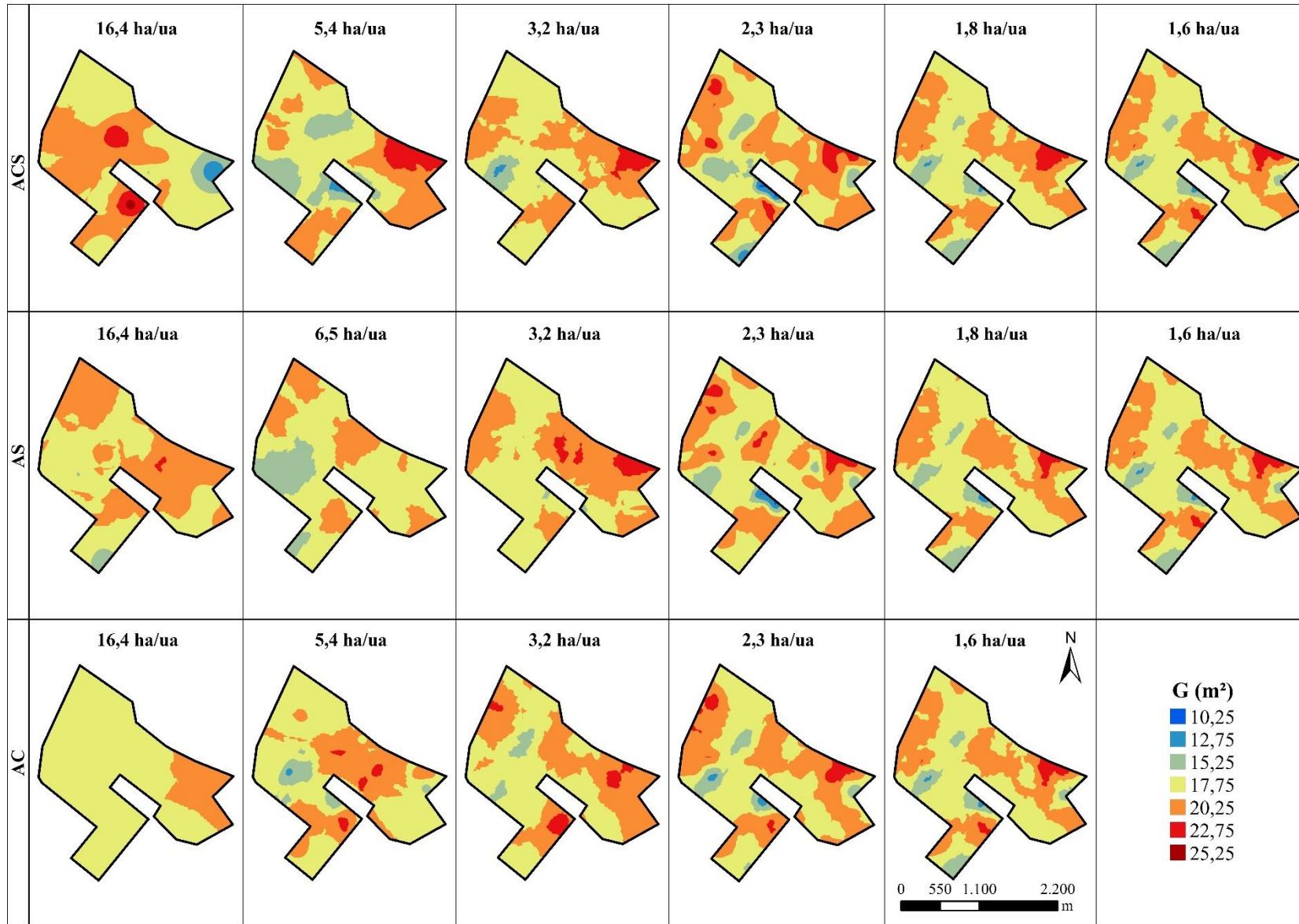


Figura 5. Espacialização da área basal (G) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

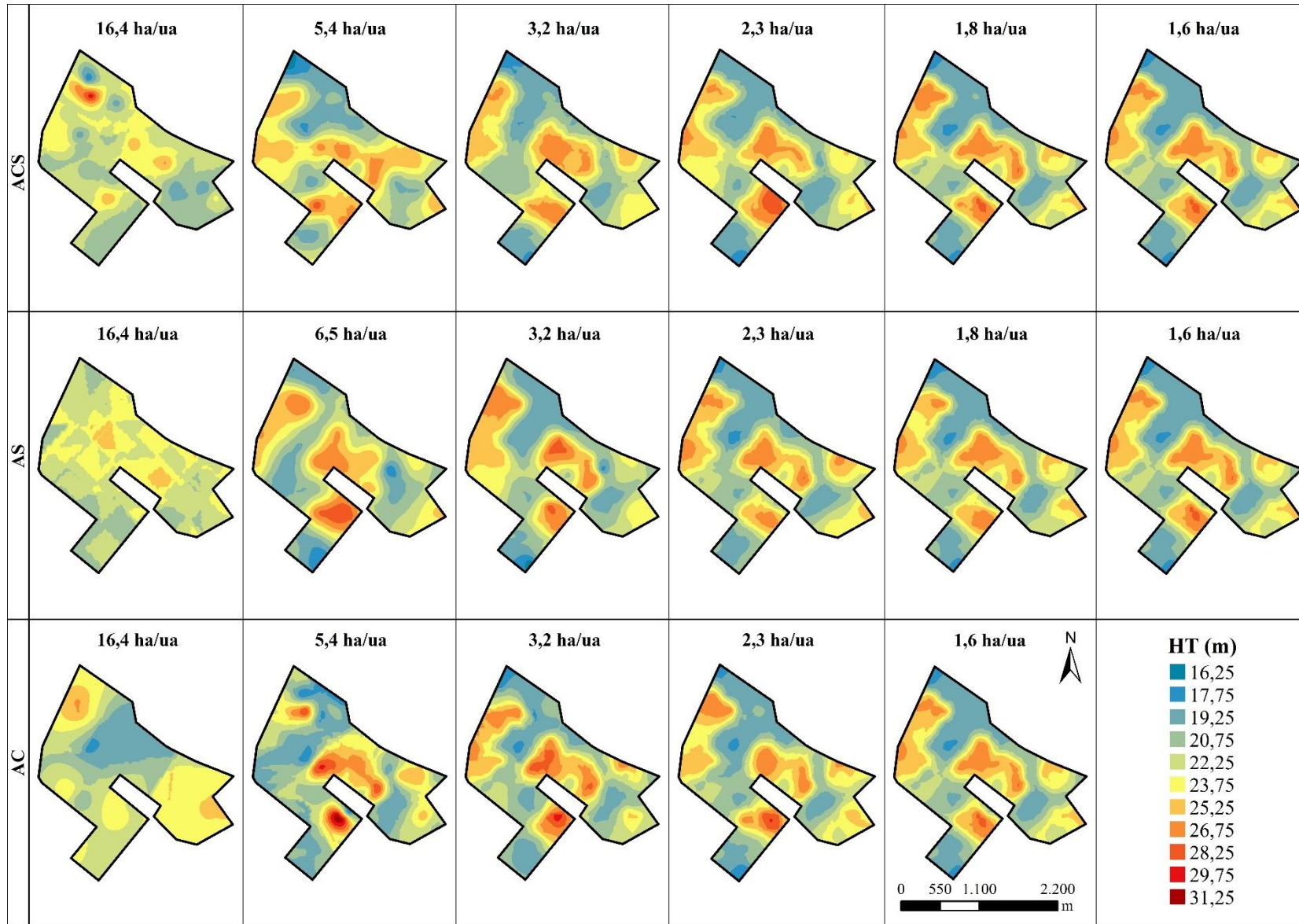


Figura 6. Espacialização da altura total (Ht) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 6,5; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

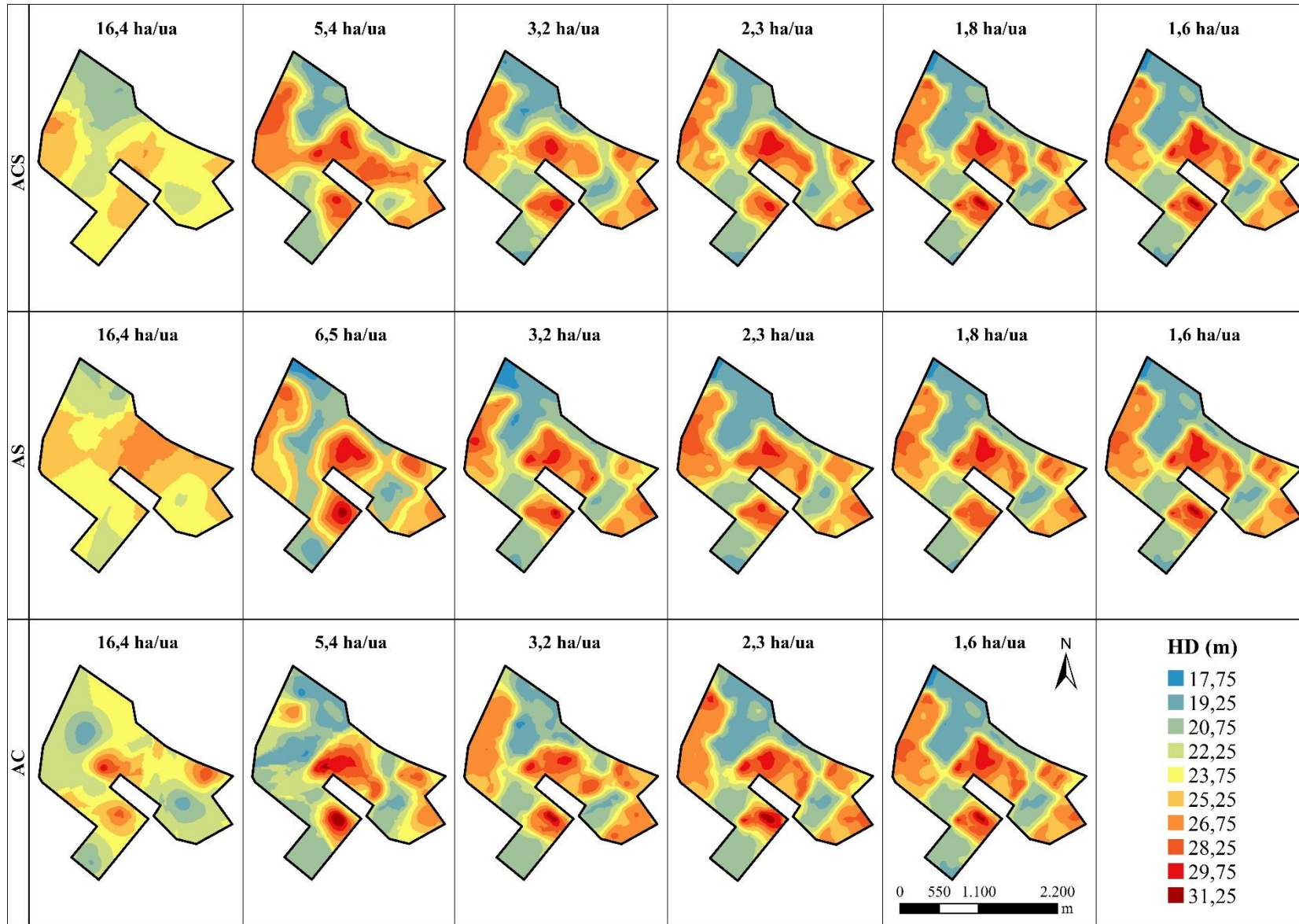


Figura 7. Espacialização da altura média das árvores dominantes (Hd) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

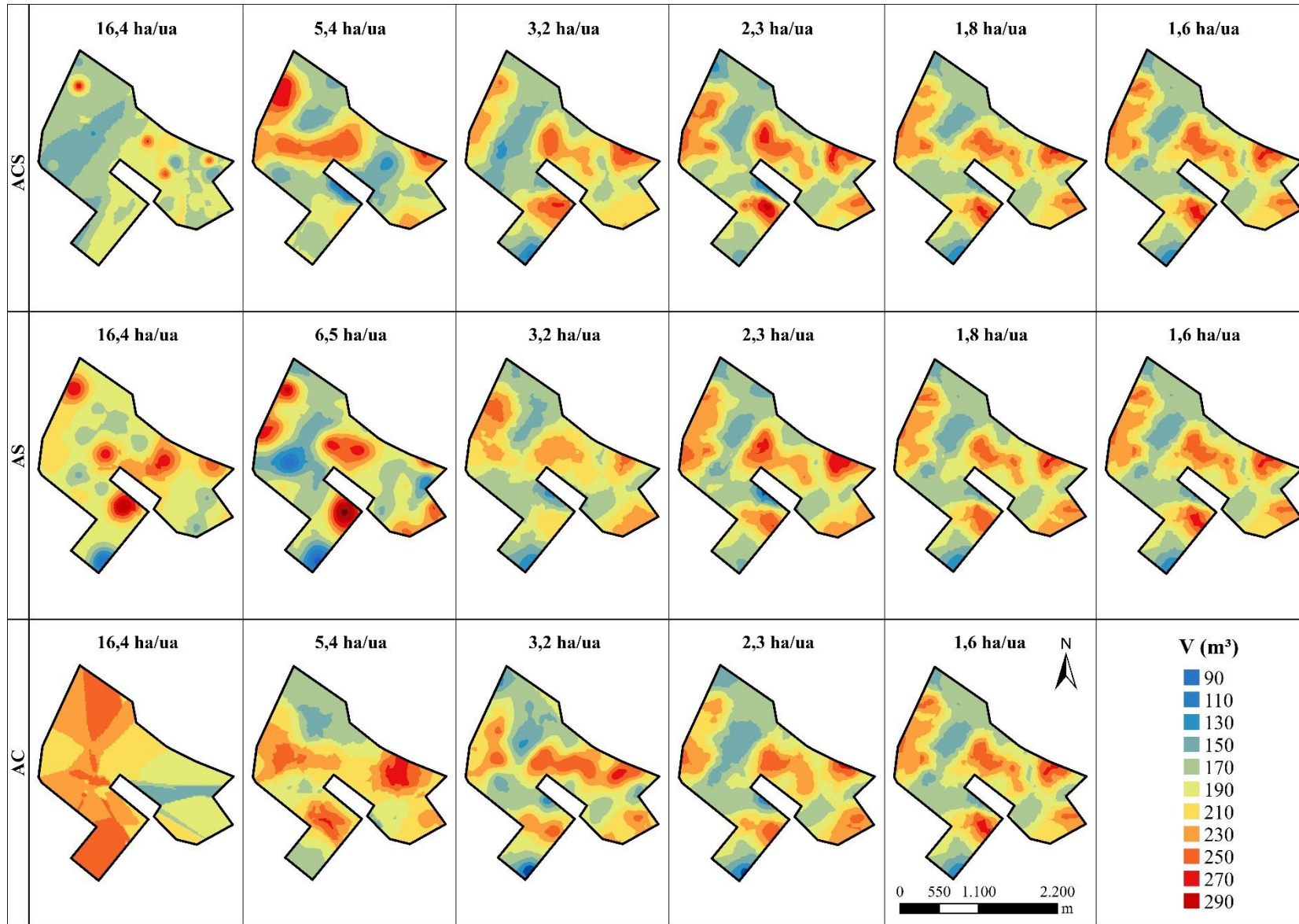


Figura 8. Espacialização do volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

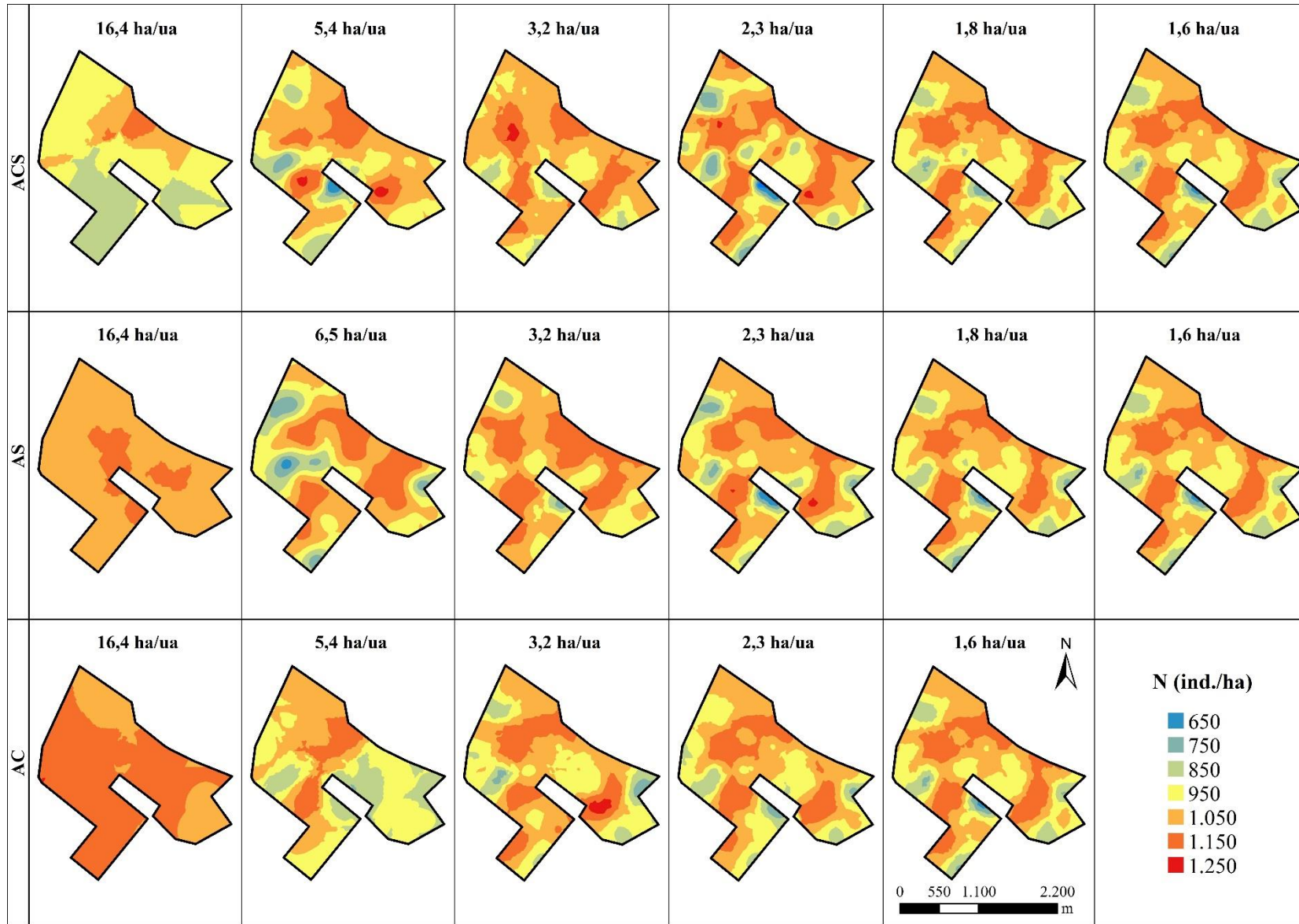


Figura 9. Espacialização do número de indivíduos por hectare (N) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária nos processos de Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Sistemática (AS) e Amostragem em Conglomerados (ACS) variando as intensidades amostrais em 16,4; 5,4; 3,2; 2,3; 1,8; 1,6 hectares por unidade amostral.

Tabela 3. Exatidão Global dos mapas temáticos das variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), área basal (G), altura total (Ht), altura média das árvores dominantes (Hd), volume de madeira (V) e número de árvores por hectare (N), na variação das intensidades amostrais pelos processos amostrais, em relação ao mapa de referência de uma unidade amostral para cada 1,6 hectares.

Processo Amostral	IA	EG_(DAP)	EG_(G)	EG_(HT)	EG_(HD)	EG_(V)	EG_(N)
ACS	16,4	0,210	0,469	0,221	0,138	0,298	0,295
	5,4	0,217	0,255	0,429	0,460	0,389	0,517
	3,2	0,494	0,665	0,582	0,611	0,536	0,587
	2,3	0,624	0,737	0,656	0,730	0,620	0,687
	1,8	0,803	0,895	0,891	0,882	0,843	0,873
AS	16,4	0,254	0,496	0,188	0,135	0,237	0,369
	6,5	0,302	0,282	0,329	0,433	0,392	0,486
	3,2	0,477	0,646	0,520	0,638	0,506	0,601
	2,3	0,578	0,735	0,730	0,717	0,623	0,727
	1,8	0,783	0,894	0,836	0,877	0,840	0,882
AC	16,4	0,230	0,568	0,241	0,179	0,155	0,311
	5,4	0,373	0,556	0,401	0,464	0,345	0,399
	3,2	0,488	0,668	0,582	0,617	0,481	0,670
	2,3	0,601	0,793	0,688	0,718	0,641	0,744

Em que: ACS, AS e AC representam amostragem casual simples, amostragem sistemática e amostragem em conglomerados, respectivamente; IA representa a intensidade amostral em hectares por unidade amostral; EG_(DAP) = Exatidão Global dos mapas de diâmetro a 1,30m do solo, EG_(G) = Exatidão Global dos mapas de área basal, EG_(HT) = Exatidão Global dos mapas de altura total, EG_(HD) = Exatidão Global dos mapas de altura média das árvores dominantes, EG_(V) = Exatidão Global dos mapas de volume de madeira, EG_(N) = Exatidão Global dos mapas de número de árvores por hectare.

4. CONCLUSÕES

A estrutura de dependência espacial das variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, área basal, altura total, volume de madeira e número de árvores por hectare é influenciada pelo processo e intensidade amostral utilizado no inventário florestal. A variável altura média das árvores dominantes apresenta forte estrutura de dependência espacial, independente do processo e intensidade amostral, sendo essa uma característica a ser considerada em modelos de classificação de sítios e de crescimento e produção.

A krigagem ordinária gera estimativas precisas e exatas em inventários florestais na intensidade de uma unidade amostral em 16,4 hectares, realizados com processos de amostragem casual simples, sistemática e conglomerados. Contudo, o processo de amostragem sistemática, na intensidade de uma unidade amostral para cada 6,5 hectares, é o mais viável, pois além de garantir precisão e exatidão nas estimativas, proporciona a espacialização das variáveis nos locais não amostrados com acurácia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ARAÚJO, E. J. G. et al. Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–13, 2018.
- BURNHAN, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and multimodel inference**. 2 ed. New York: Springer, 2002.
- CALDEIRA, M. A. et al. Spatial distribution of leaf-cutting ant nests (Hymenoptera: Formicidae) in *Eucalyptus* plantations. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 34–39, 2005.
- DE BASTIANI, F.; URIBE-OPAZO, M.A.; DALPOSSO, G.H. Comparison of maps of spatial variability of soil resistance to penetration constructed with and without covariables using a spatial linear model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 2, p. 394-404, 2012.
- GUEDES, I. C. L. et al. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* avaliada ao longo do tempo. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 527–534, 2015.
- KANEGAE JUNIOR, H. et al. 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.
- LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 19–33, 2006.
- LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, L. C. R. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por Krigagem. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 511–523, 2016.
- MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 113–126, 2005.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. 1. ed. Curitiba: Próprio autores, 1997.
- PELLISSARI, A. L. et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biomassa**, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014.
- PÖYRY, C. EM G. E N. L. **Relatório 2017 IBÁ**. São Paulo, 2017.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2015.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v. 1, n. 2, p. 15–18, 2001.

SANTOS, P. C. et al. O emprego da geoestatística na determinação do tamanho “ótimo” de amostras aleatórias com vistas à obtenção de estimativas dos volumes dos fustes de espécies florestais em Paragominas, estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 41, n. 2, p. 213–222, 2011.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria Florestal**: Medição, Volumetria e Gravimetria. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. 1. ed. Botucatu: UNESP, 2003.

CAPÍTULO II

Dependência espacial de variáveis dendrométricas em função da idade em povoamentos de eucalipto

Spatial dependence of dendrometric variables over age on eucalyptus stands

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas ao longo do tempo e em diferentes intensidades amostrais em povoamento de eucalipto. As hipóteses testadas foram que a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas se altera ao longo do crescimento em povoamentos de eucalipto e a intensidade amostral influencia nesta estrutura. As variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, área basal, altura total, altura média das árvores dominantes e volume de madeira foram obtidas em inventário florestal contínuo, aos 3,5, 4,5 e 5,5 anos, de 80 unidades amostrais permanentes (400 m²) distribuídas aleatoriamente no povoamento (394 ha) localizado em Abaeté, Minas Gerais. Foram avaliadas as intensidades de uma unidade amostral a cada 4,9 (n = 80), 7,3 (n = 54) e 16,4 (n = 24) hectares. Considerou-se a maior intensidade amostral como referência para as demais. Os modelos de semivariância esférico, exponencial e gaussiano foram ajustados ao semivariograma experimental, em que o modelo de melhor ajuste foi utilizado pela krigagem ordinária na espacialização das variáveis analisadas. Os resultados demonstraram predominância de forte dependência espacial das variáveis dendrométricas, independentemente da idade e intensidade amostral, sobretudo para altura média das árvores dominantes e volume de madeira. A menor intensidade amostral influenciou negativamente na dependência espacial da área basal, em todas as idades. A estrutura de dependência espacial não é influenciada pelo aumento da idade do povoamento, sendo recomendada a análise geoestatística destas variáveis em inventário florestal contínuo, considerando a intensidade amostral de uma unidade amostral a cada 16,4 hectares em povoamentos com área superior a 300 hectares. Finalmente, a forte componente espacial presente na altura média das árvores dominantes indica o potencial no uso da análise geoestatística na classificação da capacidade produtiva para povoamentos de eucalipto.

Palavras-chave: Inventário florestal contínuo. Intensidade amostral. Continuidade espacial. Semivariância. Geoestatística.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the spatial dependence structure of dendrometric variables over time and in different sample intensities in eucalyptus stands. The hypotheses considered were that the spatial dependence structure of dendrometric variables changes along the growth in eucalyptus stands and the sample intensity influences this structure. The variables diameter at 1.30 m of soil, basal area, total height, mean height of dominant trees and volume of wood were obtained in continuous forest inventory, at 3.5, 4.5 and 5.5 years, from 80 sample unit (400 m²) distributed randomly in the stand (394 ha) located in Abaeté, Minas Gerais. The intensities of one sample unit were evaluated every 4.9 (n = 80), 7.3 (n = 54) and 16.4 (n = 24) hectares. The highest sample intensity was reference for the others. The spherical, exponential and gaussian semivariance models were adjusted to the experimental semivariogram, where the best fit model was used by ordinary kriging in the spatialization of the analyzed variables. The results showed a predominance of strong spatial dependence of dendrometric variables, regardless of age and sample intensity, especially for mean height of dominant trees and volume of wood. The lower sample intensity influenced negatively the spatial dependence of the basal area, at all ages. The structure of spatial dependence is not influenced by the increase in the age of the stand, and the geostatistical analysis of these variables is recommended in a continuous forest inventory, considering the sample intensity of one sample unit for each 16.4 hectares in stands with an area of more than 300 hectares. Finally, the strong spatial component present in the average height of dominant trees indicates the potential in the use of geostatistical analysis in the classification of productive capacity for eucalyptus stands.

Keywords: Continuous forest inventory. Sample intensity. Space continuity. Semivariance. Geostatistics.

1. INTRODUÇÃO

A geoestatística tem sido amplamente utilizada para compreender a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas em povoamentos de eucalipto (GUEDES et al., 2012; KANEGAE JUNIOR et al., 2006, 2007, MELLO et al., 2005, 2006, 2009). Contudo, poucos estudos exploram as variações espaciais que podem ocorrer ao longo do tempo, e menos ainda, a intensidade amostral ideal em cada ocasião de medição de um inventário florestal contínuo pela análise geoestatística.

Esta abordagem no tempo, além de permitir a redução dos custos relacionados à amostragem, pode melhorar os métodos de classificação de sítio, a partir de estimativas consistentes obtidas pela forte dependência espacial já observada para a variável altura média das árvores dominantes em povoamentos de eucalipto (GUEDES et al., 2015; KANEGAE JUNIOR et al., 2007; MELLO et al., 2005). Avaliando a continuidade espacial de área basal, volume e incremento médio anual em povoamentos clonais de eucalipto em cinco medições anuais sucessivas (2,7 a 6,8 anos), Guedes et al. (2015) verificaram que a estrutura espacial de todas as variáveis em estudo foi semelhante, exceto a realizada aos 2,7 anos de idade do povoamento. Neste trabalho, os autores concluíram que o crescimento temporal desse povoamento não afetou na dependência espacial das variáveis.

Contudo, a alteração no comportamento espacial pode ser relacionada, principalmente, com o aumento da competição entre árvores, decorrentes da limitação dos recursos locais disponíveis ao crescimento (KANEGAE JUNIOR et al., 2007). Além disso, outros fatores podem influenciar nesse comportamento no tempo, como a espécie e a idade do povoamento. Ainda, as micro variações de sítio podem influenciar negativamente na dependência espacial em estágios iniciais do desenvolvimento da floresta (GUEDES et al., 2015), devido ao aumento da competição pelos recursos naturais disponíveis neste local. Em povoamentos de *Tectona grandis*, por exemplo, Pelissari et al. (2014), encontraram aumento da estrutura de dependência espacial do quinto para o oitavo ano nas variáveis área basal, volume e na relação área basal pelo volume.

Diante disso, definimos as seguintes hipóteses: i) a estrutura de continuidade espacial das variáveis dendrométricas se altera ao longo do crescimento em povoamentos de eucalipto e ii) a intensidade amostral influencia a estrutura de dependência espacial ao longo do tempo. Por esta razão, o objetivo deste estudo foi avaliar a estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas, ao longo do tempo, em diferentes intensidades amostrais em povoamentos de eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

Os dados deste estudo foram coletados em um povoamento clonal de eucalipto de 394 ha, localizado no município de Abaeté em Minas Gerais (Figura 10), região de cerrado com altitude de 647 m (MONTE et al., 2009). O clima é caracterizado por apresentar invernos secos e verões chuvosos, definido como tropical úmido de savana (tipo Aw), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014). A temperatura e a precipitação média anual são de 20,74°C e 1.300 mm, respectivamente (MONTE et al., 2009).

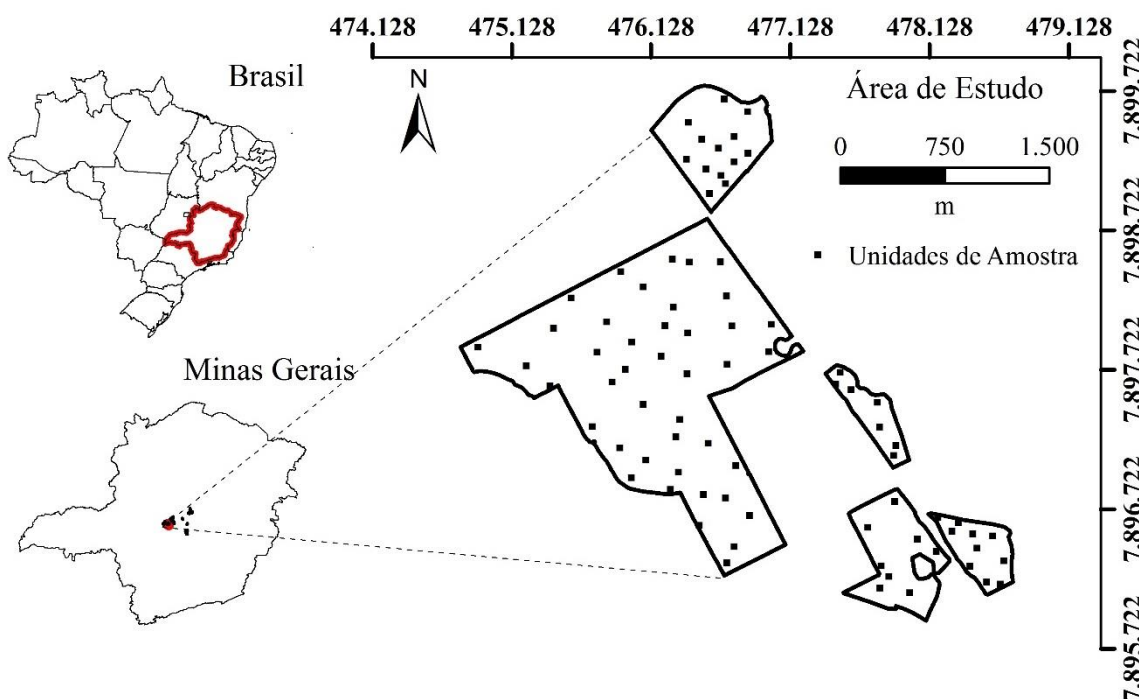


Figura 10. Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das unidades amostrais no povoamento clonal de eucalipto, município de Abaeté, MG.

2.2. Banco de Dados

Foram alocadas, por meio do processo de amostragem casual simples, 80 unidades amostrais permanentes com área de 400 m². As unidades amostrais foram mensuradas em múltiplas ocasiões, nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos, com repetição total. As variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura total (Ht) e a altura média das árvores dominantes (Hd), segundo o conceito de Assmann (SCOLFORO; THIERSCH, 2004), foram mensuradas em todas as unidades amostrais. Posteriormente, estimou-se a área basal (G) e volume de madeira (V) de cada unidade amostral. A coordenada geográfica central de cada unidade amostral foi registrada para a posterior análise espacial.

2.3. Análise Geoestatística

A partir do arranjo inicial com 80 unidades amostrais, foram avaliadas as intensidades de uma unidade amostral a cada 4,9 (80 unidades amostrais); 7,3 (54 unidades amostrais) e 16,4 (24 unidades amostrais) hectares. Os valores obtidos pela intensidade amostral de uma unidade amostral a cada 4,9 hectares foram considerados referenciais para comparar com as demais intensidades. Em cada intensidade amostral e idade foi feita a análise da dependência espacial

por meio do semivariograma experimental (Equação 15) e ajuste dos modelos Esférico (Equação 16), Exponencial (Equação 17) e Gaussiano (Equação 18), para obtenção dos parâmetros efeito pepita (C_0), contribuição (C) e alcance (a). Além disso, foram analisados os semivariogramas direcionais (0, 45, 90 e 135°) com o objetivo de detectar a anisotropia. Quando presente, a correção foi realizada para obtenção de um semivariograma isotrópico.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Modelo Esférico: } \gamma(h) &= C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C \text{ para } h \geq a \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{Modelo Exponencial: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a} \right)} \right] \quad (17)$$

$$\text{Modelo Gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (18)$$

Em que: $\gamma(h)$ = semivariância estimada entre pares de pontos; $N(h)$ = número de pares de valores medidos $z(x_i)$, $z(x_i + h)$, separados pela distância h.

A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do Critério de Informação de Akaike - AIC (Equação 19), Critério de Informação Bayesiano - BIC (Equação 20), Erro Médio Reduzido - \overline{ER} (Equação 21) e Desvio Padrão dos Erros Reduzidos - S_{er} (Equação 22), obtidos a partir da validação cruzada.

$$AIC = -2 \log L + 2K \quad (19)$$

$$BIC = -2 \log L + 2K \log(n) \quad (20)$$

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (21)$$

$$S_{er} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \right\}^2} \quad (22)$$

Em que: L = Verossimilhança do modelo candidato; K = Número de parâmetros do modelo candidato; n é o número de observações; $z(x_{i0})$ = valor observado no ponto i_0 ; $\hat{z}(x_{i0})$ = valor estimado no ponto i_0 ; $\sigma(x_{i0})$ = desvio padrão da krigagem no ponto i_0 .

O AIC mede a distância da curva de um modelo ajustado a uma curva padrão (ARAÚJO et al., 2018). A diferença do AIC ($\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min}$) é a estatística utilizada na comparação dos modelos (BURNHAN; ANDERSON, 2002), em que: AIC_i = Valor de AIC para o modelo (i); AIC_{\min} = Valor de AIC para o modelo suporte (< AIC). Para valores de Δ_i menor do que dois, o modelo (i) é estatisticamente igual ao modelo suporte, demonstrando mesma identidade

entre os modelos. O \overline{ER} mais próximo de zero e S_{er} mais próximo de um representam melhor qualidade do ajuste e ausência ou mínima tendência associada às estimativas.

Com os parâmetros ajustados, obteve-se o Índice de Dependência Espacial (Equação 23), classificando-a como baixa ($IDE \leq 0,25$), moderada ($0,25 < IDE \leq 0,75$) e forte ($IDE > 0,75$), conforme descrito por Zimback (2003).

$$IDE = \frac{C}{(C_0 + C)} \quad (23)$$

Após a seleção do modelo que melhor se ajustou ao semivariograma experimental em cada idade e intensidade amostral, em cada variável analisada, foi realizada a krigagem ordinária (Equação 24) para obtenção das estimativas espaciais de todas as variáveis nos locais não amostrados.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (24)$$

Em que: $Z(x_0)$ = estimativa no ponto não amostrado; $Z(x_i)$ = valor observado no i-ésimo ponto amostral; n = número de pontos amostrados; λ_i = peso associado aos i-ésimos pontos amostrados ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presença da estrutura de dependência espacial das variáveis em estudo foi detectada nas diferentes idades e intensidades amostrais avaliadas (Tabelas 4 a 8). Entre todos os ajustes, 68%, 26% e 6% apresentaram estrutura de dependência espacial classificada como forte, moderada e fraca, respectivamente. Esse comportamento demonstra a elevada continuidade espacial das variáveis, principalmente a altura média das árvores dominantes e volume, e consequentemente, possibilidade de utilizar a geoestatística como estimador em inventários florestais contínuos.

Os modelos esférico e exponencial foram os que apresentaram melhores ajustes ao semivariograma experimental, cada um com superioridade em 44% do total de ajustes realizados. Já o modelo gaussiano apresentou melhor ajuste em 11% dos inventários realizados. De acordo com Yamamoto e Landim (2013), mesmo existindo vários modelos teóricos, os modelos esférico, exponencial e gaussiano são descritores da maioria dos fenômenos espaciais existentes.

A superioridade do modelo esférico foi predominante para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (Tabela 4). No entanto, o modelo exponencial apresentou melhor ajuste em todas as idades avaliadas na intensidade amostral de uma unidade amostral a cada 4,9 hectares. Para a variável área basal (G), o modelo exponencial foi superior na intensidade de uma unidade amostral em 4,9 e 7,3 hectares (Tabela 5). O modelo gaussiano foi superior aos demais modelos na menor intensidade amostral, porém, detectando fraca dependência espacial, com baixíssima estruturação espacial expressa pelos seus valores.

O alcance médio, observado nos modelos de semivariância de melhor ajuste, foi de 500,92 m (DAP); 288,6 m (G); 495,20 m (HT); 674,23 m (HD) e 600,92 m (V). O alcance representa a distância máxima em que dois pontos possuem correlação espacial (MELLO et al., 2005), e ainda, quanto maior o seu valor, maior é a continuidade espacial da variável (KANEKAE JUNIOR et al., 2007). Dessa forma, pode-se observar que a altura média das árvores dominantes é aquela com maior continuidade espacial, enquanto que a área basal, a de menor correlação espacial.

Ainda, para todas as variáveis, foi observada redução do alcance com o aumento da idade e redução da intensidade amostral. Guedes et al. (2015) também verificaram tendência de redução do alcance com o avanço da idade em povoamentos clonais de eucalipto. De acordo com Kanegae Junior et al. (2007), o avanço da idade do povoamento leva a intensificação da competição pelos recursos disponíveis, podendo refletir na estruturação espacial de variáveis dendrométricas de eucalipto.

De maneira geral, a intensidade amostral e a idade exerceram pouca influência na detecção da estrutura de dependência espacial das variáveis. A única exceção foi observada apenas para a variável área basal, na intensidade amostral de uma unidade amostral para cada 16,4 hectares. Para esta intensidade amostral, a dependência espacial foi classificada como fraca, sendo que nas demais intensidades de amostragem, obteve-se forte dependência espacial. Com isso, pode-se afirmar que a intensidade amostral teve maior impacto na caracterização da dependência espacial, do que o aumento da idade. O motivo para isso pode ser relacionado a forma como a variável é estimada. Ao contrário das outras variáveis em estudo, os valores de área basal por hectare encontrados em cada unidade amostral é resultante da soma das áreas seccionais (g) de todas as árvores da parcela, em que seu valor é influenciado diretamente pelo número de árvores presentes, como de seu tamanho (SCOLFORO, 2006).

Dessa forma, as falhas decorrentes da mortalidade de plantas podem aumentar as variações aleatórias dentro das unidades amostrais, e consequente redução do gradiente estrutural, refletindo na redução da dependência espacial pela oscilação abrupta entre os valores de parcelas vizinhas. Por outro lado, as outras variáveis analisadas tiveram seus valores

representados por uma média aritmética, reduzindo assim o efeito dos valores discrepantes dentro da unidade amostral, e permitindo a continuidade espacial entre as suas unidades amostrais.

Com exceção da área basal, as demais variáveis indicaram que a intensidade amostral de uma unidade amostral em 16,4 hectares, foi suficiente para descrever a forte dependência espacial de referência (uma unidade amostral em 4,9 hectares) nas três idades avaliadas. Com isso, a estrutura de dependência espacial em povoamentos de eucalipto acima de 300 hectares, será detectada quando forem utilizadas intensidades amostrais variando de 4,9 a 16,4 hectares por unidade amostral. Isso porque em áreas que permitam uma intensidade de uma unidade de amostra a cada 16,4 hectares é garantida uma quantidade mínima de pontos para a construção do semivariograma, além captar o aumento da semivariância, em função da distância, nas diferentes direções.

Tabela 4. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto, nas intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

IA	I	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	\bar{ER}	S _{ER}	IDE(%)	DE	\bar{x}
	3,5	Esférico	0,148	0,424	911,79	160,06	169,58	-0,003	1,068	74,10	Moderada	11,81
		Exponencial	0,002	0,553	250,51	162,04	171,57	-0,005	1,063	99,71	Forte	11,83
		Gaussiano	0,228	0,319	426,48	161,30	170,83	-0,028	1,131	58,31	Moderada	11,82
4,9	4,5	Esférico	0,232	0,365	911,48	173,17	182,70	-0,001	1,074	61,13	Moderada	12,95
		Exponencial	0,067	0,526	240,51	174,37	183,90	-0,009	1,089	88,69	Forte	12,96
		Gaussiano	0,306	0,278	447,03	174,16	183,69	-0,024	1,135	47,57	Moderada	12,96
	5,5	Esférico	0,292	0,381	904,53	185,70	195,22	0,001	1,057	56,58	Moderada	13,48
		Exponencial	0,167	0,507	273,29	187,26	196,79	-0,005	1,071	75,22	Forte	13,48
		Gaussiano	0,373	0,297	472,21	186,44	195,96	0,000	1,057	44,29	Moderada	13,48
	3,5	Esférico	0,036	0,633	830,53	118,09	126,05	0,004	1,081	94,58	Forte	11,80
		Exponencial	0,000	0,630	317,15	121,42	129,38	-0,003	0,988	100,00	Forte	11,83
		Gaussiano	0,155	0,482	387,74	118,81	126,77	-0,003	1,106	75,71	Forte	11,81
7,3	4,5	Esférico	0,041	0,656	828,90	120,50	128,46	0,011	1,126	94,18	Forte	12,93
		Exponencial	0,000	0,644	310,59	123,12	131,07	-0,007	1,026	100,00	Forte	12,94
		Gaussiano	0,000	0,625	268,99	120,77	128,73	0,031	1,189	100,00	Forte	12,97
	5,5	Esférico	0,047	0,697	799,75	125,60	133,55	0,008	1,134	93,65	Forte	13,46
		Exponencial	0,000	0,699	304,84	128,06	136,01	-0,002	1,028	100,00	Forte	13,45
		Gaussiano	0,177	0,535	371,22	126,54	134,50	0,015	1,278	75,20	Forte	13,47
	3,5	Esférico	0,000	0,430	640,01	55,28	59,99	-0,024	1,192	100,00	Forte	11,89
		Exponencial	0,000	0,435	193,03	55,82	60,53	-0,037	1,117	100,00	Forte	11,89
		Gaussiano	0,000	0,435	330,18	55,19	59,90	-0,024	1,160	100,00	Forte	11,89
16,4	4,5	Esférico	0,000	0,511	586,20	59,71	64,42	-0,004	1,267	100,00	Forte	13,07
		Exponencial	0,000	0,518	193,19	60,01	64,72	-0,027	1,183	100,00	Forte	13,06
		Gaussiano	0,000	0,517	304,30	59,76	64,47	-0,005	1,251	100,00	Forte	13,06
	5,5	Esférico	0,000	0,646	772,79	64,02	68,74	0,014	1,303	100,00	Forte	13,58
		Exponencial	0,000	0,642	265,24	64,46	69,17	-0,023	1,159	100,00	Forte	13,58
		Gaussiano	0,000	0,643	368,41	63,77	68,48	0,005	1,334	100,00	Forte	13,57

Em que: IA = Intensidade Amostral em hectares por unidade amostral; I = Idade em anos; C₀ = Efeito Pepita; C = Contribuição; A = Alcance; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; \bar{ER} = Erro Médio Reduzido; S_{er} = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) = Índice de Dependência Espacial e DE = Classificação da Dependência Espacial; \bar{x} = média espacial.

Tabela 5. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável área basal (G) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

IA	I	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	\bar{ER}	S _{ER}	IDE(%)	DE	\bar{x}
	3,5	Esférico	0,871	2,167	684,77	303,96	313,49	-0,001	1,035	71,32	Moderada	13,53
		Exponencial	0,629	2,488	286,72	306,54	316,07	-0,001	1,028	79,82	Forte	13,51
		Gaussiano	1,254	1,893	376,58	303,22	312,75	0,001	1,040	60,17	Moderada	13,55
4,9	4,5	Esférico	0,973	2,483	659,04	315,00	324,53	0,002	1,040	71,85	Moderada	16,27
		Exponencial	0,686	2,820	274,13	316,78	326,30	0,001	1,033	80,44	Forte	16,22
		Gaussiano	1,432	2,113	359,66	314,47	324,00	0,002	1,043	59,61	Moderada	16,28
	5,5	Esférico	0,930	3,161	665,71	324,96	334,49	0,003	1,034	77,27	Forte	17,61
		Exponencial	0,751	3,539	334,78	326,30	335,83	0,002	1,026	82,50	Forte	17,48
		Gaussiano	1,554	2,703	381,31	324,13	333,65	0,002	1,038	63,51	Moderada	17,61
	3,5	Esférico	0,652	2,871	619,59	220,78	228,73	0,012	1,074	81,50	Forte	13,54
		Exponencial	0,000	3,503	214,98	222,02	229,97	0,008	1,023	100,00	Forte	13,52
		Gaussiano	1,286	2,260	330,29	220,89	228,84	0,017	1,087	63,74	Moderada	13,54
7,3	4,5	Esférico	0,845	3,164	621,16	228,30	236,25	0,018	1,073	78,92	Forte	16,28
		Exponencial	0,000	3,979	208,48	229,37	237,32	0,011	1,032	100,00	Forte	16,23
		Gaussiano	1,584	2,452	335,08	228,47	236,42	0,017	1,076	60,75	Moderada	16,27
	5,5	Esférico	0,516	4,336	649,43	234,87	242,82	0,017	1,046	89,37	Forte	17,64
		Exponencial	0,000	4,889	262,59	236,38	244,34	0,015	1,014	100,00	Forte	17,53
		Gaussiano	1,511	3,420	355,42	235,04	242,99	0,021	1,055	69,36	Moderada	17,63
	3,5	Esférico	0,000	2,999	507,94	102,39	107,10	0,037	1,075	100,00	Forte	13,73
		Exponencial	2,998	0,005	78,61	102,50	107,21	0,000	1,047	0,16	Fraca	13,74
		Gaussiano	0,000	3,000	214,85	102,46	107,17	-0,010	1,073	100,00	Forte	13,73
16,4	4,5	Esférico	3,813	0,008	254,20	108,28	112,99	-0,004	1,042	0,20	Fraca	16,65
		Exponencial	3,814	0,006	40,32	108,28	112,99	-0,004	1,042	0,16	Fraca	16,65
		Gaussiano	3,810	0,010	105,35	108,28	112,99	-0,004	1,042	0,26	Fraca	16,65
	5,5	Esférico	3,641	0,690	950,26	111,20	115,91	-0,085	1,161	15,93	Fraca	18,01
		Exponencial	4,313	0,009	145,44	111,24	115,95	-0,008	1,043	0,21	Fraca	18,06
		Gaussiano	4,057	0,266	434,10	111,23	115,94	-0,008	1,043	6,16	Fraca	18,04

Em que: IA = Intensidade Amostral em hectares por unidade amostral; I = Idade em anos; C₀ = Efeito Pepita; C = Contribuição; A = Alcance; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; \bar{ER} = Erro Médio Reduzido; S_{er} = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) = Índice de Dependência Espacial e DE = Classificação da Dependência Espacial; \bar{x} = média espacial.

Tabela 6. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável altura total (Ht) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

IA	I	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	\bar{ER}	S _{ER}	IDE(%)	DE	\bar{x}
	3,5	Esférico	1,324	2,152	830,64	315,58	325,11	0,003	1,081	61,91	Moderada	18,63
		Exponencial	0,000	3,493	201,18	316,90	326,43	0,006	1,091	100,00	Forte	18,61
		Gaussiano	1,740	1,724	426,67	315,88	325,41	0,004	1,082	49,76	Moderada	18,64
4,9	4,5	Esférico	0,827	1,908	877,75	289,73	299,26	-0,004	1,045	69,76	Moderada	21,76
		Exponencial	0,270	2,487	274,99	292,50	302,03	-0,008	1,057	90,21	Forte	21,74
		Gaussiano	1,208	1,562	469,64	290,45	299,98	-0,008	1,044	56,40	Moderada	21,76
	5,5	Esférico	0,941	2,631	800,00	310,85	320,38	-0,001	1,057	73,66	Moderada	23,04
		Exponencial	0,186	3,462	275,00	312,14	321,67	0,002	1,049	94,91	Forte	23,00
		Gaussiano	1,452	2,118	412,86	311,44	320,96	-0,001	1,063	59,34	Moderada	23,03
	3,5	Esférico	0,149	2,730	750,00	200,24	208,19	-0,012	1,019	94,82	Forte	18,43
		Exponencial	0,000	2,956	337,05	203,35	211,31	-0,010	0,951	100,00	Forte	18,48
		Gaussiano	0,713	2,254	407,15	200,08	208,03	-0,003	1,024	75,97	Forte	18,43
7,3	4,5	Esférico	0,415	2,770	827,12	206,38	214,33	-0,006	1,061	86,98	Forte	21,66
		Exponencial	0,000	3,172	314,86	208,89	216,85	-0,015	1,000	100,00	Forte	21,61
		Gaussiano	0,969	2,232	422,62	206,87	214,83	-0,010	1,079	69,73	Moderada	21,66
	5,5	Esférico	0,000	3,658	762,81	209,85	217,80	0,006	0,984	100,00	Forte	22,99
		Exponencial	0,000	4,135	422,62	214,96	222,91	-0,002	0,939	100,00	Forte	22,82
		Gaussiano	0,272	3,799	362,91	208,08	216,03	0,006	1,140	93,31	Forte	22,96
	3,5	Esférico	0,000	4,596	770,51	111,13	115,84	0,033	1,246	100,00	Forte	18,85
		Exponencial	0,000	4,534	254,83	111,51	116,22	0,041	1,242	100,00	Forte	18,85
		Gaussiano	0,000	4,649	376,10	111,05	115,76	0,037	1,241	100,00	Forte	18,87
16,4	4,5	Esférico	0,057	2,559	809,45	97,29	102,01	-0,036	1,105	97,81	Forte	21,87
		Exponencial	0,000	2,522	199,55	97,96	102,67	-0,012	1,062	100,00	Forte	21,90
		Gaussiano	0,000	2,587	362,12	97,34	102,05	-0,027	1,105	100,00	Forte	21,87
	5,5	Esférico	0,000	3,571	605,75	106,28	111,00	-0,036	1,138	100,00	Forte	23,37
		Exponencial	0,000	3,626	187,28	106,76	111,47	-0,014	1,089	100,00	Forte	23,36
		Gaussiano	0,000	3,627	313,71	106,37	111,08	-0,006	1,141	100,00	Forte	23,35

Em que: IA = Intensidade Amostral em hectares por unidade amostral; I = Idade em anos; C₀ = Efeito Pepita; C = Contribuição; A = Alcance; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; \bar{ER} = Erro Médio Reduzido; S_{er} = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) = Índice de Dependência Espacial e DE = Classificação da Dependência Espacial; \bar{x} = média espacial.

Tabela 7. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

IA	I	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	\overline{ER}	S _{ER}	IDE(%)	DE	\bar{x}
3,5		Esférico	0,725	1,30	849,47	270,42	279,951	0,006	1,04	64,2	Moderada	19,78
		Exponencial	0,263	1,76	263,22	270,74	280,269	0,001	1,04	87,0	Forte	19,82
		Gaussiano	0,920	1,05	387,18	270,35	279,880	0,007	1,04	53,4	Moderada	19,80
4,9	4,5	Esférico	0,635	1,29	1018,50	259,92	269,446	-0,003	1,02	67,0	Moderada	23,37
		Exponencial	0,591	1,92	800,00	262,76	272,287	-0,003	1,02	76,4	Forte	23,17
		Gaussiano	0,863	1,12	548,80	259,88	269,405	-0,005	1,03	56,4	Moderada	23,35
5,5		Esférico	0,719	1,89	1015,15	279,66	289,188	-0,002	1,03	72,5	Moderada	24,77
		Exponencial	0,699	2,51	800,00	280,18	289,711	-0,004	1,03	78,21	Forte	24,43
		Gaussiano	1,132	2,09	800,00	278,59	288,118	-0,013	1,06	64,81	Moderada	24,52
3,5		Esférico	0,000	2,09	636,41	186,44	194,394	0,000	1,01	100,0	Forte	19,74
		Exponencial	0,000	2,26	353,65	187,48	195,435	0,000	0,98	100,0	Forte	19,75
		Gaussiano	0,466	1,73	361,51	186,22	194,171	0,004	1,12	78,7	Forte	19,73
7,3	4,5	Esférico	0,318	1,77	836,06	184,21	192,164	-0,017	1,04	84,7	Forte	23,34
		Exponencial	0,000	2,09	329,77	185,13	193,088	-0,007	0,99	100,0	Forte	23,27
		Gaussiano	0,657	1,44	428,97	184,18	192,140	-0,022	1,05	68,6	Moderada	23,34
5,5		Esférico	0,000	2,51	816,46	186,69	194,641	0,005	0,96	100,0	Forte	24,90
		Exponencial	0,000	2,92	521,82	189,19	197,145	0,009	0,95	100,00	Forte	24,62
		Gaussiano	0,163	2,58	362,82	185,85	193,809	-0,002	1,13	94,07	Forte	24,95
3,5		Esférico	0,254	0,99	1465,75	75,52	80,231	-0,008	1,15	79,5	Forte	19,91
		Exponencial	0,000	1,25	526,74	75,98	80,695	0,001	1,04	100,0	Forte	19,97
		Gaussiano	0,484	0,78	800,00	75,67	80,386	0,022	1,18	61,6	Moderada	19,92
16,4	4,5	Esférico	0,322	1,30	1344,59	82,61	87,319	-0,001	1,16	80,1	Forte	23,53
		Exponencial	0,000	1,53	384,47	83,51	88,224	-0,029	1,09	100,0	Forte	23,59
		Gaussiano	0,665	0,94	707,73	83,02	87,731	-0,012	1,16	58,5	Moderada	23,54
5,5		Esférico	0,000	2,35	1292,49	88,68	93,393	-0,041	1,03	100,0	Forte	24,92
		Exponencial	0,000	2,45	586,07	91,17	95,881	-0,048	1,01	100,00	Forte	24,84
		Gaussiano	0,560	1,93	717,65	89,44	94,157	-0,071	1,30	77,51	Forte	24,87

Em que: IA = Intensidade Amostral em hectares por unidade amostral; I = Idade em anos; C₀ = Efeito Pepita; C = Contribuição; A = Alcance; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; \overline{ER} = Erro Médio Reduzido; S_{er} = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) = Índice de Dependência Espacial e DE = Classificação da Dependência Espacial; \bar{x} = média espacial.

Tabela 8. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto, variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

IA	I	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	ER	S _{ER}	IDE(%)	DE	\bar{x}
	3,5	Esférico	175,889	374,77	750,00	719,48	729,010	0,001	1,08	68,1	Moderada	124,88
		Exponencial	85,007	479,53	269,29	721,64	731,167	0,000	1,06	84,9	Forte	124,95
		Gaussiano	240,316	325,13	400,68	719,01	728,543	-0,001	1,08	57,5	Moderada	125,17
4,9	4,5	Esférico	153,262	566,83	750,00	733,59	743,119	-0,004	1,05	78,7	Forte	173,82
		Exponencial	149,888	940,95	750,00	737,46	746,987	-0,008	1,04	86,3	Forte	171,78
		Gaussiano	251,842	503,52	413,84	732,54	742,063	-0,006	1,05	66,7	Moderada	174,02
	5,5	Esférico	210,394	922,51	750,00	767,66	777,191	-0,006	1,06	81,4	Forte	199,86
		Exponencial	221,638	1408,13	750,00	769,36	778,889	-0,005	1,04	86,40	Forte	193,76
		Gaussiano	381,340	805,00	423,76	766,46	775,992	-0,003	1,05	67,86	Moderada	199,71
	3,5	Esférico	7,266	531,07	652,26	485,83	493,787	0,009	1,01	98,7	Forte	124,13
		Exponencial	0,000	544,54	290,19	488,71	496,666	0,002	0,97	100,0	Forte	123,96
		Gaussiano	128,500	418,19	355,06	486,07	494,025	0,005	1,06	76,5	Forte	124,12
7,3	4,5	Esférico	90,495	755,33	750,00	509,57	517,529	0,001	1,04	89,3	Forte	173,31
		Exponencial	142,168	1138,34	750,00	514,96	522,915	0,005	1,03	88,9	Forte	170,71
		Gaussiano	238,293	617,31	391,59	509,47	517,428	0,006	1,04	72,1	Moderada	173,33
	5,5	Esférico	0,000	1252,41	721,45	527,15	535,108	0,008	0,99	100,0	Forte	200,13
		Exponencial	0,000	1358,84	392,86	530,10	538,058	0,012	0,97	100,00	Forte	196,54
		Gaussiano	220,965	1130,99	389,14	526,83	534,789	0,016	1,04	83,66	Forte	200,21
	3,5	Esférico	0,000	624,03	570,43	230,35	235,057	-0,012	1,20	100,0	Forte	128,12
		Exponencial	627,532	1,23	121,29	230,76	235,471	0,027	1,13	0,2	Fraca	128,05
		Gaussiano	0,000	633,37	301,69	230,43	235,144	-0,018	1,21	100,0	Forte	128,29
16,4	4,5	Esférico	0,000	794,09	750,00	234,97	239,682	-0,023	1,11	100,0	Forte	178,58
		Exponencial	0,000	767,65	175,94	235,35	240,063	-0,008	1,07	100,0	Forte	179,17
		Gaussiano	0,000	801,24	365,50	234,91	239,623	-0,028	1,11	100,0	Forte	178,42
	5,5	Esférico	168,970	1090,36	948,75	244,79	249,500	-0,005	1,10	86,6	Forte	205,57
		Exponencial	0,000	1229,88	288,20	245,56	250,269	-0,006	1,05	100,00	Forte	205,33
		Gaussiano	0,000	1253,61	398,30	244,72	249,437	-0,005	1,10	100,00	Forte	205,75

Em que: IA = Intensidade Amostral em hectares por unidade amostral; I = Idade em anos; C₀ = Efeito Pepita; C = Contribuição; A = Alcance; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; ER = Erro Médio Reduzido; S_{er} = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) = Índice de Dependência Espacial e DE = Classificação da Dependência Espacial; \bar{x} = média espacial.

A estrutura de dependência espacial permaneceu constante para as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, altura total, altura média das árvores dominantes e volume de madeira, mesmo com o crescimento do povoamento, demonstrando que a continuidade espacial destas variáveis não foi afetada pela idade da floresta. Dessa forma, pode-se inferir que a manutenção dos padrões espaciais ao longo do tempo deve-se a pouca influência da competição por recursos disponíveis ao crescimento. Guedes et al. (2015) observaram que a competição em povoamentos de eucalipto não foi suficientemente forte para afetar a estrutura de dependência espacial, em medições anuais realizadas entre 2,7 e 6,8 anos de idade. No entanto, a manutenção da estruturação espacial relaciona-se com as idades avaliadas e a qualidade do sítio em que estas florestas se estabelecem (KANEGAE JUNIOR et al., 2007).

A intensidade amostral comumente adotada em inventários florestais contínuos é de uma unidade amostral em cada 10 hectares em plantios de eucalipto (GUEDES et al., 2015). Dessa forma, os resultados obtidos em todas as idades e variáveis deste estudo, sugerem que reduzir em 39% a intensidade amostral em relação ao que é normalmente realizado, possibilita estimativas espaciais confiáveis, reduzindo assim os custos do inventário florestal, mas mantendo os níveis de precisão e exatidão desejados.

A partir da dependência espacial detectada nos modelos de desempenho superior, foi possível aplicar a krigagem ordinária para estimar e espacializar as variáveis nos locais não amostrados dos povoamentos, nas três intensidades amostrais e idades de avaliação (Figuras 11 a 15).

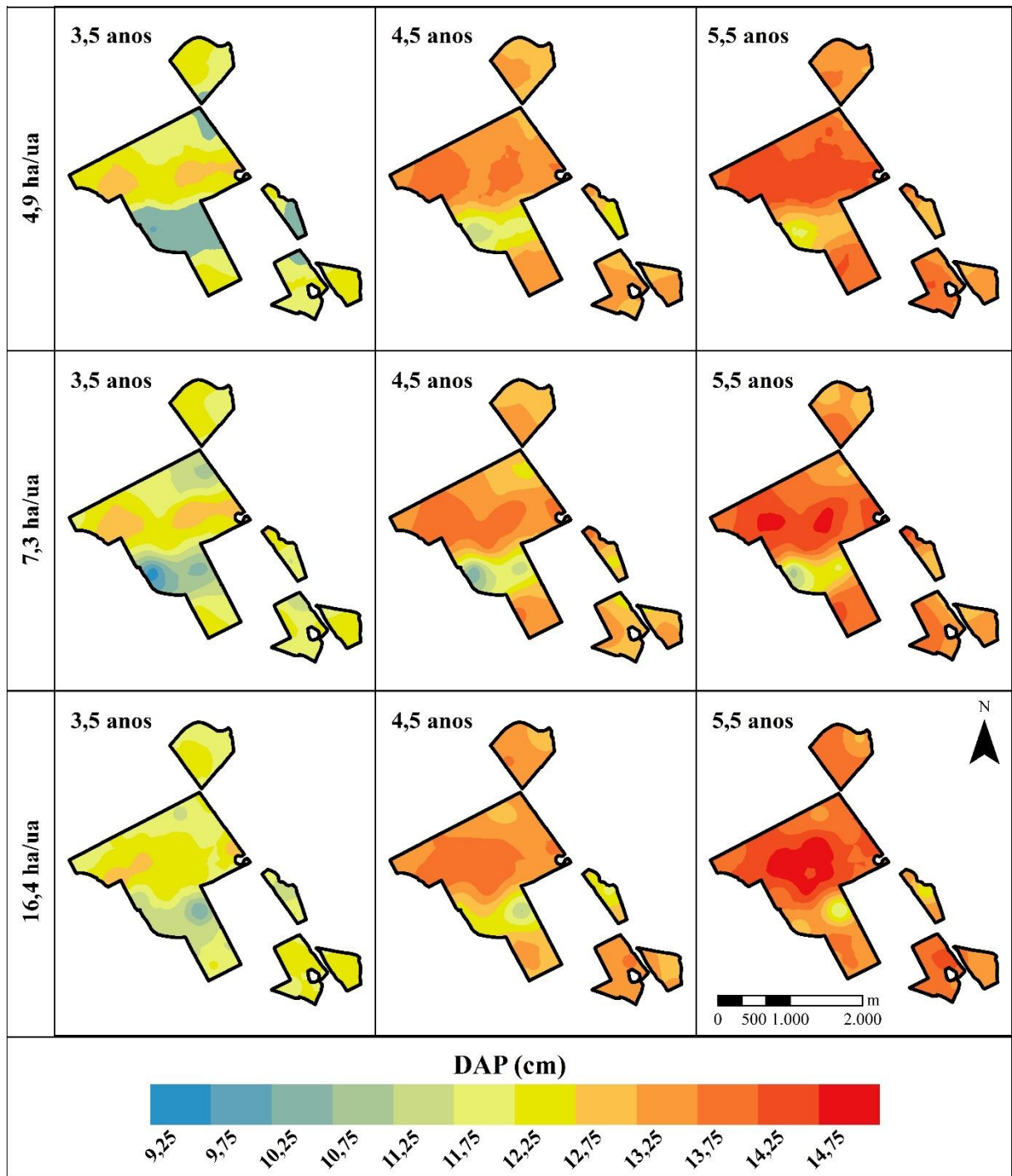


Figura 11. Espacialização do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

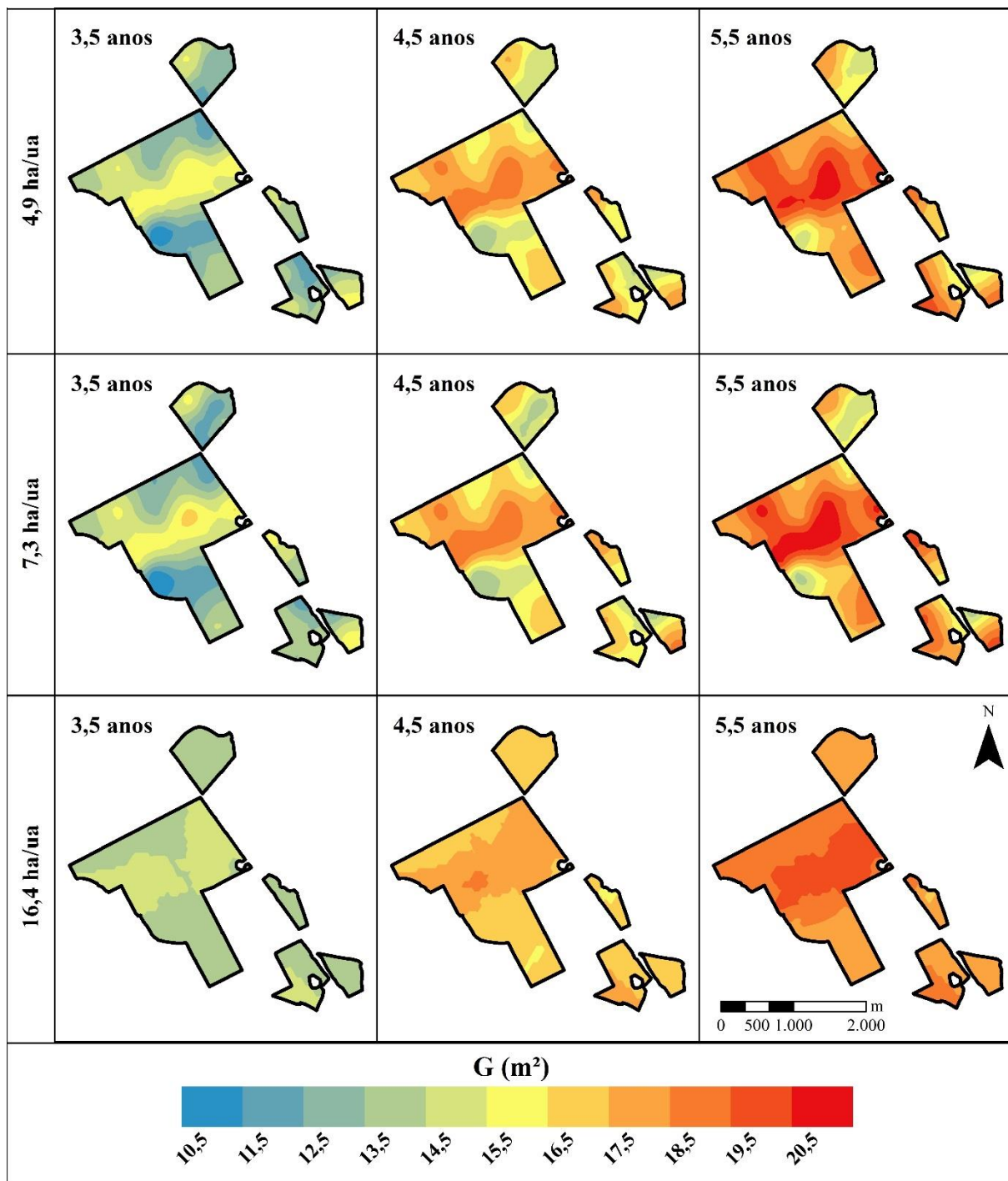


Figura 12. Espacialização da área basal (G) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

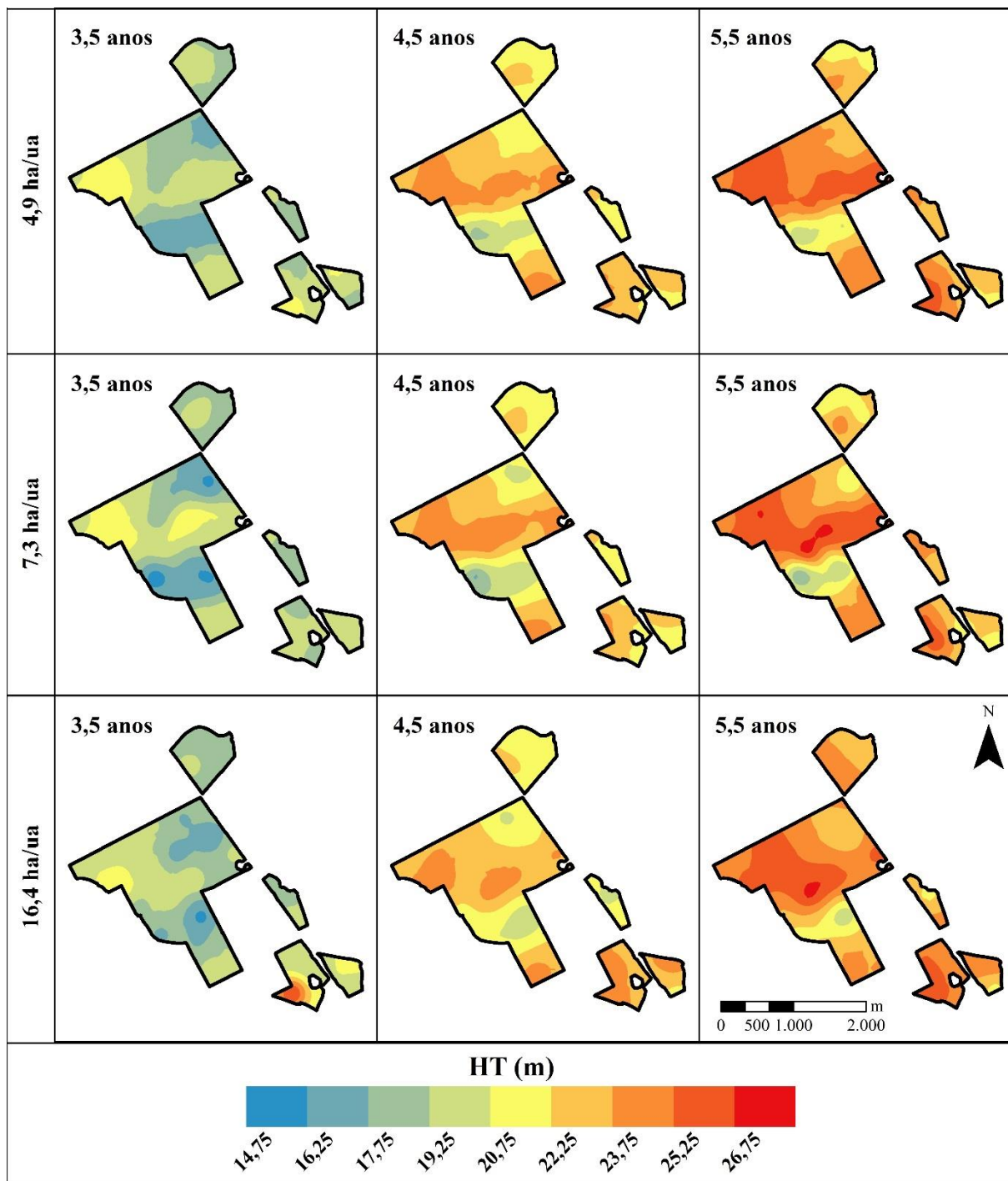


Figura 13. Espacialização da altura total (HT) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

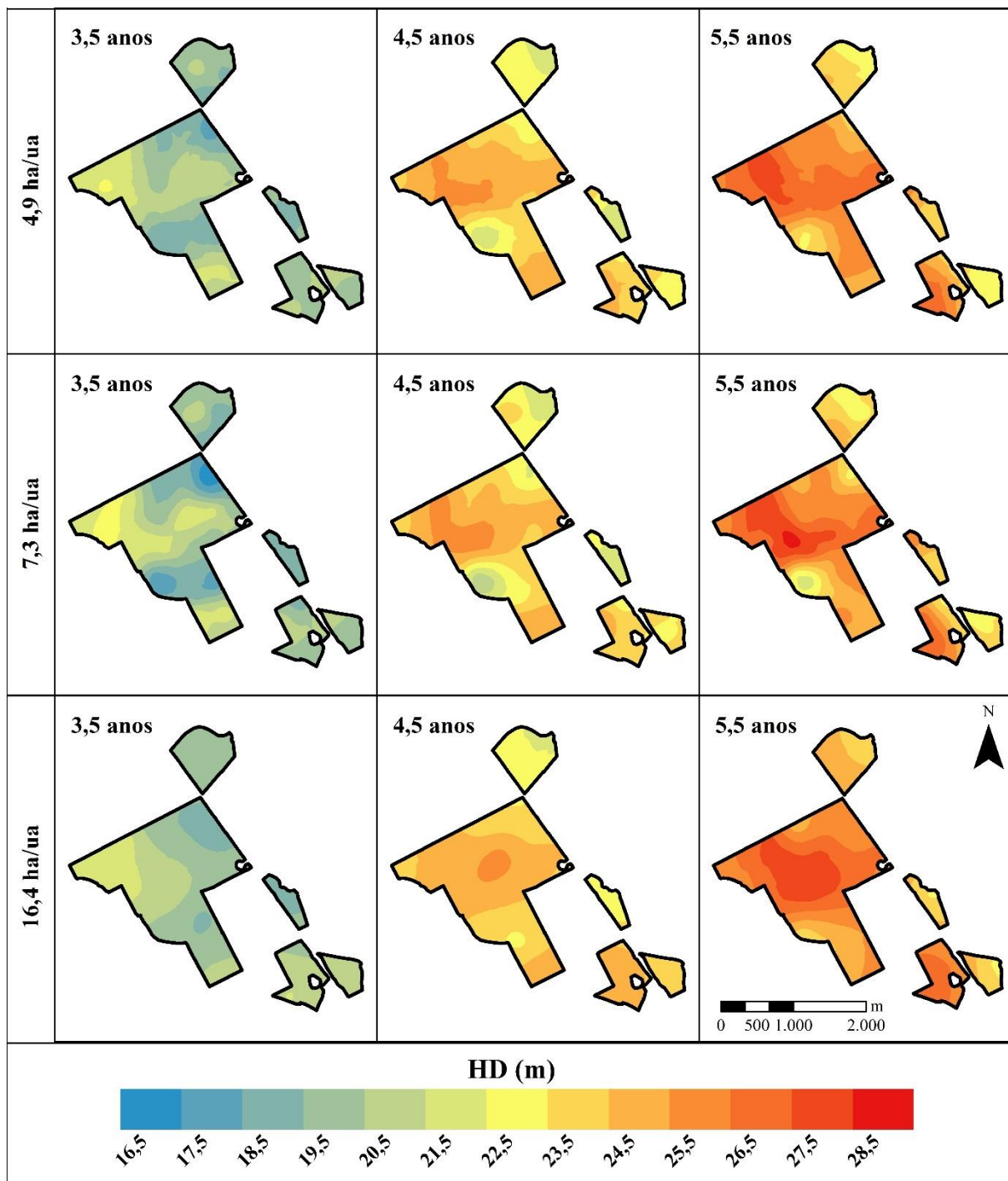


Figura 14. Espacialização da altura média das árvores dominantes (HD) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (AS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

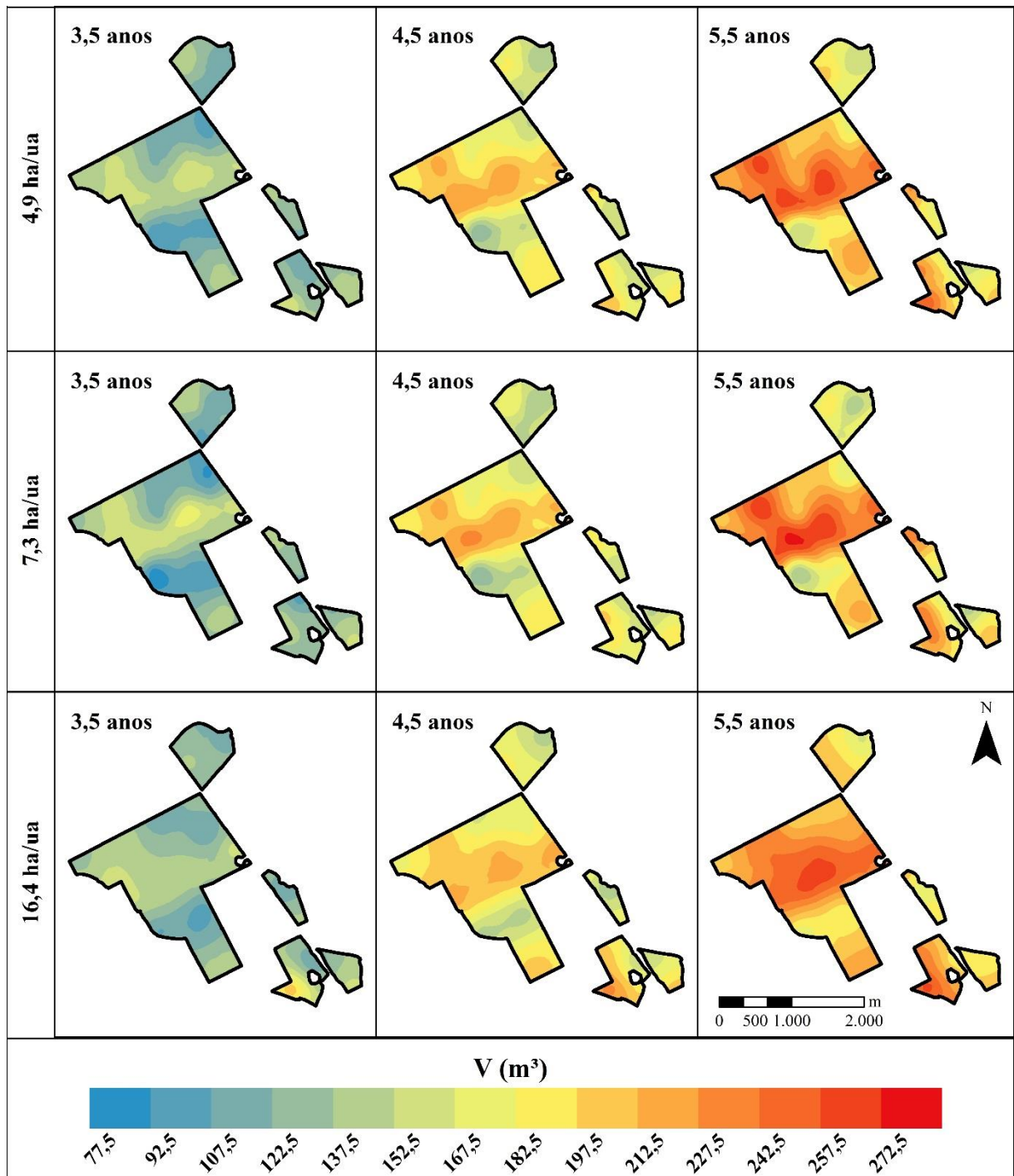


Figura 15. Espacialização do volume de madeira (V) em povoamento de eucalipto por meio da krigagem ordinária no processo de Amostragem Casual Simples (ACS), variando as intensidades amostrais em 4,9; 7,3 e 16,4 hectares por unidade amostral nas idades de 3,5; 4,5 e 5,5 anos.

Apesar de não ter sido constatada influência da intensidade amostral na detecção e caracterização da estrutura de dependência espacial das variáveis, os mapas ilustraram aumento progressivo dos valores médios obtidos para cada variável dendrométrica (cores mais frias para mais quentes). Desse modo, é possível inferir que a mudança na coloração dos estratos está relacionada com o crescimento do povoamento, obtendo-se maiores valores médios a cada idade espacializada.

Além disso, houve tendência na manutenção da área dos estratos homogêneos, corroborando a estabilidade da dependência espacial das variáveis estudadas ao longo do tempo. A intensidade amostral de uma unidade amostral para cada 16,4 hectares, exceto para a variável área basal, espacializou as mesmas tendências encontradas nas intensidades de 4,9 e 7,3 hectares. A diferença foi notada na escala de detalhamento dos estratos, em que as intensidades amostrais maiores proporcionaram estratos mais detalhados.

A variável área basal foi a que demonstrou maior distância dos estratos em relação aqueles obtidos para as intensidades amostrais maiores, em todas as idades. A variável volume e altura média das árvores dominantes foram aquelas que demonstraram melhor definição dos estratos, independentemente da idade e intensidade amostral avaliada. Esse resultado é de elevada importância, pois indica o potencial de uso da análise geostatística no acompanhamento do incremento em volume de madeira em pé e, ainda, na classificação da capacidade produtiva e em modelos de crescimento e produção.

4. CONCLUSÕES

A estrutura de dependência espacial das variáveis diâmetro a 1,30 m do solo, área basal, altura total, altura média das árvores dominantes e volume de madeira não é influenciada pelo aumento da idade do povoamento.

A redução da intensidade amostral influenciou na diminuição do índice de dependência espacial da variável área basal, porém, não interferiu na estrutura de dependência espacial das demais variáveis analisadas.

As variáveis diâmetro a 1,30 do solo, altura total, altura média das árvores dominantes e volume de madeira apresentaram estrutura de dependência espacial predominantemente forte em todas as idades e intensidades amostrais avaliadas. Assim, em povoamentos com área superior a 300 hectares, recomenda-se a análise geoestatística destas variáveis no inventário florestal contínuo, com intensidade mínima de uma unidade amostral a cada 16,4 hectares.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ARAÚJO, E. J. G. et al. Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–13, 2018.
- BURNHAN, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and multimodel inference**. 2 ed. New York: Springer, 2002.
- GUEDES, I. C. L. et al. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* avaliada ao longo do tempo. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 527–534, 2015.
- GUEDES, I. C. L. et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus sp.* **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 541–550, 2012.
- MELLO, J. M. et al. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 185–194, 2009.
- MELLO, J. M. et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 251–260, 2006.
- MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 113–126, 2005.
- MONTE, M. A. et al. Crescimento de um clone de eucalipto submetido a desrama e desbaste. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 777–787, 2009.
- KANEGAE JUNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 123–136, 2006.
- KANEGAE JUNIOR, H. et al. 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.
- PELLISSARI, A. L. et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biomassa**, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014.
- PEREIRA, T. T. C et al. Qualidade de solos cultivados com eucalipto na região central de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, p. 706–713, 2012.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2015.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v. 1, n. 2, p. 15–18, 2001.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria Florestal**: Medição, Volumetria e Gravimetria. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. 1. ed. Botucatu: UNESP, 2003.

CAPÍTULO III

Geoestatística na classificação de sítios e modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto

Geostatistics in site index and modeling of growth and yield in eucalyptus stands

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi obter o índice de sítio utilizando os métodos geoestatísticos krigagem e cokrigagem, e avaliar o seu desempenho na modelagem do crescimento e produção com o modelo de Clutter. Os dados são provenientes de 170 unidades amostrais de área fixa (400 m²), distribuídas pelo processo de amostragem casual simples, com medições anuais entre 24 e 84 meses de idade dos povoamentos de eucalipto, localizados em Bocaiúva, Minas Gerais. A estimativa do índice de sítio foi realizada pelo método da curva guia (idade de referência de 72 meses), seguida da inserção da componente espacial pelo método da validação cruzada. Os interpoladores geoestatísticos avaliados foram: krigagem ordinária e cokrigagem ordinária, utilizando como variável secundária o diâmetro a 1,30 m do solo e a altura total. Seguiu-se com o ajuste do modelo de Clutter, a partir de cada método de obtenção da variável índice de sítio. A qualidade das estimativas geradas pelo modelo de Clutter foi obtida pelo % bias e raiz quadrada do erro médio. Os dados estimados foram comparados com cada método de obtenção da variável sítio em relação aos valores observados, por meio de regressão linear e do coeficiente de correlação linear de *Pearson*. Os resultados demonstram que a variável índice de sítio apresenta-se fortemente estruturada espacialmente. Foi verificada redução na % bias pelos métodos geoestatísticos, indicando redução na tendência das estimativas. A correção do índice de sítio, utilizando a krigagem e cokrigagem ordinária, não propicia alterações significativas na projeção da produção em volume em povoamentos de eucalipto. Outras formas de incorporar a componente espacial no modelo de Clutter devem ser investigadas.

Palavras-chave: Krigagem ordinária. Cokrigagem ordinária. Capacidade produtiva. Modelo de Clutter.

ABSTRACT

The aim of this study was to obtain the site index using the geostatistical methods krigagem and cokrigagem, and to evaluate its performance in the modeling of growth and production with the model of Clutter. The data comes from 170 sample units of fixed area (400 m²), distributed through the simple random sampling process, with annual measurements between 24 and 84 months of age of the eucalyptus stands, located in Bocaiúva, Minas Gerais. The site index was estimated using the guide curve method (reference age of 72 months), followed by the insertion of the spatial component by the cross validation method. The geostatistical interpolators evaluated were: Ordinary kriging and ordinary cokriging, using as secondary variable the diameter at 1.30 m of the soil and the total height. This was followed by the adjustment of the Clutter model, from each method of obtaining the site index variable. The quality of the estimates generated by the Clutter model was obtained by the % bias and square root of the mean error. The estimated data were compared with each method of obtaining the site variable in relation to the observed values, by means of linear regression and the Pearson linear correlation coefficient. The results show that the site index variable is strongly spatially structured. It was verified a reduction in the %bias by geostatistical methods, indicating a reduction in the tendency of the estimates. Correction of the site index, using ordinary kriging and cokriging, does not provide significant changes in the projection of volume production in eucalyptus stands. Other ways of incorporating the spatial component into the Clutter model should be investigated.

Keywords: Ordinary kriging. Ordinary cokriging. Site index. Clutter model.

1. INTRODUÇÃO

A altura média das árvores dominantes (H_d) é uma variável importante na modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto. Trabalhos já demonstraram que esta variável dendrométrica apresenta forte estrutura de dependência espacial (GUEDES et al., 2015; KANEGAE JUNIOR et al., 2007; MELLO et al., 2005), sendo indicada na espacialização e mapeamento da variabilidade de sítio utilizando métodos geoestatísticos (PELLISSARI et al., 2015).

A modelagem tradicional do crescimento e produção em povoamentos do gênero *Eucalyptus* é realizada com a finalidade de projetar a área basal e o volume por hectare, quando utilizado o modelo a nível de povoamento de Clutter (CAMPOS; LEITE, 2017; SALLES et al., 2012). E ainda, baseia-se em procedimentos clássicos de regressão, onde a hipótese de independência dos resíduos deve ser aceita (SCHNEIDER et al., 2009), permitindo assim a confiança nas estimativas obtidas. Quando a hipótese de independência dos resíduos não é aceita, os modelos tradicionais podem prever estimativas tendenciosas (PEREIRA et al., 2016).

Em situações de rejeição da hipótese, uma saída para reduzir o grau de tendência nas estimativas é a utilização de variáveis dendrométricas que apresentam estrutura de dependência espacial (PEREIRA et al., 2016). A dependência espacial nas variáveis área basal, altura média das árvores dominantes e volume, em povoamentos de eucalipto é presente, e seu nível de estruturação varia em função das características inerentes a cada variável e das condições edafoclimáticas do local em que essas florestas se estabelecem (LUNDGREN et al. 2016; GUEDES et al., 2015; KANEGAE JUNIOR et al., 2007; MELLO et al., 2006).

Desse modo, é necessário se aprofundar nos métodos que permitam a inserção de uma componente espacial na modelagem da capacidade produtiva, visando obter a variável índice de sítio, bem como do crescimento e produção. Além da melhor adequação aos pressupostos em que estes modelos estão condicionados, a geoestatística pode permitir aumento significativo na qualidade das estimativas de volume projetado (PEREIRA et al., 2016). Além disso, o mapeamento da capacidade produtiva e do volume prognosticado (V_2), permite o manejo eficiente do povoamento, e decisões tomadas com base em uma nova escala de informação, a espacial.

Por esta razão, levanta-se a hipótese de que a variável índice de sítio, obtida por métodos geoestatísticos, pode viabilizar ganhos na modelagem do crescimento e produção em povoamentos de eucalipto. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi obter o índice de sítio utilizando os métodos geoestatísticos krigagem e cokrigagem, e avaliar o seu desempenho na modelagem do crescimento e produção com o modelo de Clutter.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

Os dados para este estudo foram coletados em plantios clonais de eucalipto, com área de 2.119 hectares (62 talhões), localizados no município de Bocaiúva, noroeste de Minas Gerais (Figura 16).

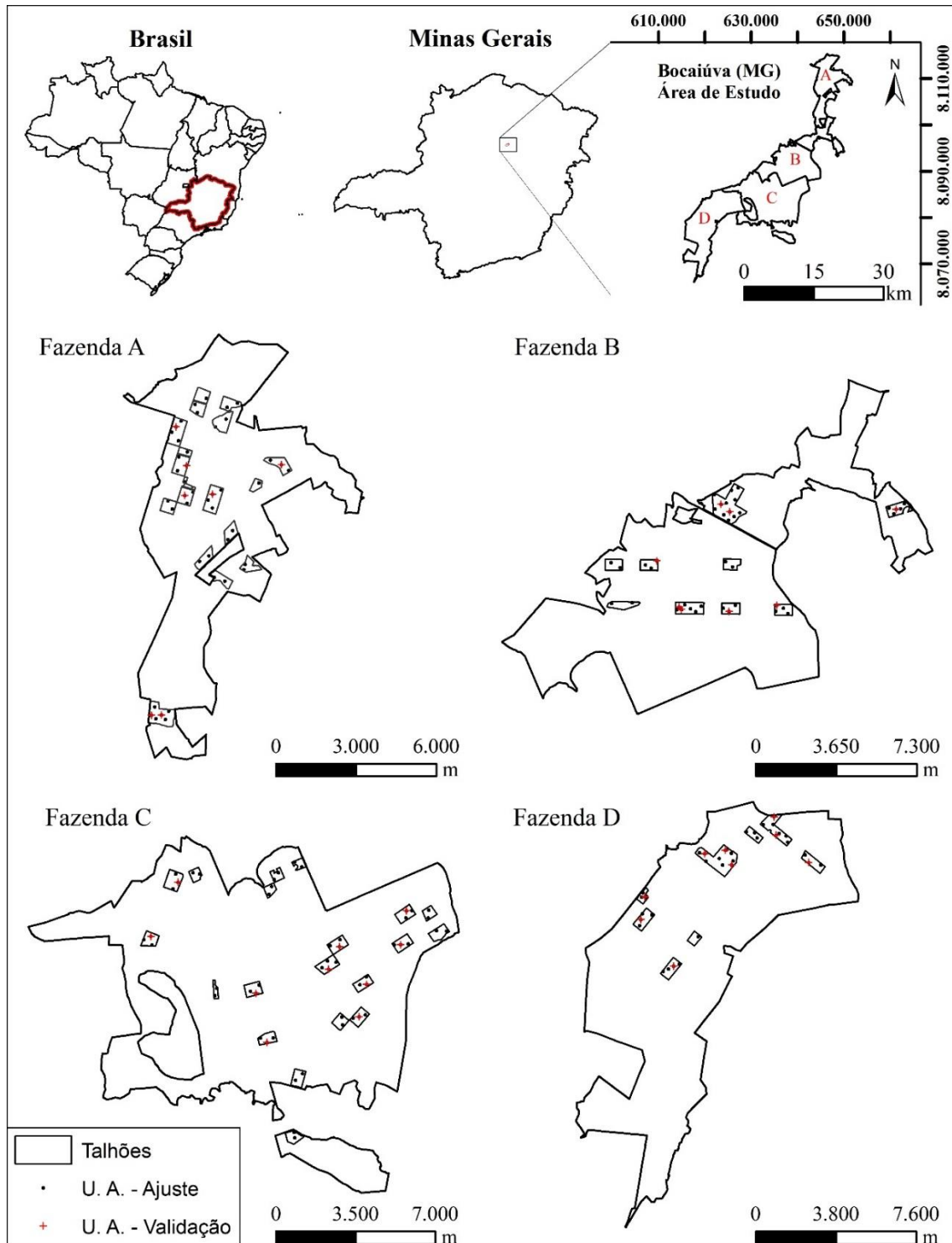


Figura 16. Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das unidades de amostra nos plantios clonais de eucalipto, município de Bocaiúva, Minas Gerais.

A altitude média da região é de 820 m, com predominância de solos do tipo Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (CALDEIRA et al., 2005). O clima é do tipo “Aw”, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por apresentar invernos secos e verões chuvosos, definido como tropical úmido de savana (ALVARES et al., 2014). A temperatura e precipitação média anual são de 24°C e 1.246 mm, respectivamente (CALDEIRA et al., 2005).

2.2. Banco de Dados

Os dados foram obtidos em 170 unidades amostrais permanentes (400 m²), pelo método de área fixa, distribuídas aleatoriamente em quatro fazendas. Nas unidades de amostra foram mensuradas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura total (Ht) e a altura média das árvores dominantes (Hd), segundo o conceito de Assmann (SCOLFORO; THIERSCH, 2004), entre 18 a 90 meses de idade. Posteriormente, estimou-se a área basal (G) e o volume de madeira (V) de cada unidade amostral. As coordenadas geográficas centrais de cada unidade amostral foram registradas para a análise espacial.

Foram selecionados dados de 136 unidades amostrais para o ajuste dos modelos, enquanto que 34 unidades foram separadas para a validação das análises. Sendo assim, a intensidade amostral utilizada foi de uma unidade amostral para cada 15,6 hectares.

2.3. Modelagem da Capacidade Produtiva

A classificação de sítio foi realizada pelo método da Curva-Guia, utilizando o modelo linearizado de Schumacher (Equação 25a). A partir do rearranjo do modelo, pela aplicação do conceito de índice de sítio (Equação 25b), foram obtidos os limites (inferior e superior) de quatro classes de índice de sítio ao longo das idades, definidos com base no produto entre a idade de referência e o menor e maior fator (razão entre Hd_{est.} e Hd_{obs.}) (SCOLFORO, 2006). Considerando a idade de referência (I_{ref}) de 72 meses, estimou-se o índice de sítio para todas as unidades de amostra (Equação 25c).

A significância dos coeficientes foi avaliada pelo teste t ($\alpha = 0,05$), enquanto que a qualidade da regressão foi avaliada por meio da análise gráfica dos resíduos normalizados (Equação 26), coeficiente de determinação ajustado (Equação 27) e erro padrão da estimativa em porcentagem (Equação 28).

$$a) \text{LnHd} = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I}$$

$$b) \text{LnHd} = \text{LnS} + \beta_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (25)$$

$$c) \text{LnS} = \text{LnHd} + \beta_1 \left(\frac{1}{I_{\text{ref}}} - \frac{1}{I} \right)$$

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\text{QMres}}} \quad (26)$$

$$R_{\text{aj.}}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \frac{\text{SQreg}}{\text{SQtotal}} \quad (27)$$

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} 100 \quad (28)$$

Em que: Ln = logaritmo neperiano; Hd = altura média das árvores dominantes (m); β_0 e β_1 = parâmetros do modelo; I = idade (meses); S = índice de sítio (m); I_{ref} = idade de referência (meses); d_i = resíduo normalizado; e_i = resíduo absoluto; QMres = quadrado médio do resíduo; $R_{aj.}^2$ = coeficiente de determinação ajustado; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo (não inclui β_0); SQreg = soma de quadrados da regressão; SQtotal = soma de quadrados total; S_{yx} = erro padrão da estimativa (m); \bar{Y} = valor médio dos dados observados.

Posteriormente, fez-se a análise geoestatística para modelar a estrutura de dependência espacial e aplicar os interpoladores para incorporação da componente espacial nos valores de índice de sítio, obtidos anteriormente pelo método tradicional da curva-guia. Os interpoladores espaciais geoestatísticos aplicados foram a krigagem ordiária (KO) e cokrigagem ordinária (CKO) (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) em duas situações, uma utilizando como variável secundária a média do diâmetro a 1,30 do solo (CKO: S - DAP) e outra considerando a média da altura total das árvores (CKO: S - HT). O processo de interpolação utilizou as quatro unidades amostrais mais próximas ao ponto não amostrado.

Na krigagem ordinária, o semivariograma experimental foi construído para obter os parâmetros iniciais efeito pepita (C_0), contribuição (C) e alcance (a), utilizando a equação 29 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Também foram analisados os semivariogramas direcionais (0° , 45° , 90° e 135°), a fim de verificar a existência de anisotropia. Quando existente, a correção foi realizada para obtenção de um semivariograma isotrópico. Para a cokrigagem ordinária, a correlação espacial da variável índice de sítio com o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e altura total (HT) foi descrita e caracterizada pelo semivariograma cruzado (Equação 30).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (29)$$

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)] \cdot [Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)]\} \quad (30)$$

Em que: $\gamma(h)$ = semivariância estimada entre pares de pontos; $N(h)$ = número de pares de valores medidos $z(x_i)$, $z(x_i + h)$, separados pela distância h ; $\gamma_{12}(h)$ = semivariância cruzada estimada entre pares de pontos; Z_1 = variável primária (Ht); Z_2 = variável secundária (DAP).

O semivariograma experimental e semivariograma experimental cruzado foram utilizados no ajuste dos modelos Gaussiano (Equação 31), Exponencial (Equação 32) e Esférico (Equação 33) e a qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do Erro Médio Reduzido (Equação 34) e Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (Equação 35), obtidos a partir da validação cruzada.

$$\text{Modelo Gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad (31)$$

$$\text{Modelo Exponencial: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad (32)$$

$$\text{Modelo Esférico: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad (33)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a$$

$$\overline{\text{ER}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (34)$$

$$S_{er} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \right\}^2} \quad (35)$$

Em que: C_0 = efeito pepita; C = contribuição; a = alcance; n é o número de observações; $z(x_{i0})$ = valor observado no ponto i_0 ; $\hat{z}(x_{i0})$ = valor estimado no ponto i_0 ; $\sigma(x_{i0})$ = desvio padrão da krigagem no ponto i_0 .

Com os parâmetros ajustados, obteve-se o Índice de Dependência Espacial (Equação 36), classificando-a como baixa ($\text{IDE} \leq 0,25$), moderada ($0,25 < \text{IDE} \leq 0,75$) e forte ($\text{IDE} > 0,75$), conforme descrito por Zimback (2003).

$$\text{IDE} = \frac{C}{(C_0 + C)} \quad (36)$$

Os valores estimados de índice de sítio, em cada interpolador geoestatístico avaliado, foram obtidos a partir da validação cruzada dos modelos de semivariância teóricos de desempenho superior em relação aos demais. A validação cruzada é o procedimento no qual a amostra em que se deseja conhecer o valor estimado é retirada do conjunto de dados. Em seguida, o modelo de semivariância teórico é novamente ajustado com base nos dados restantes, e posteriormente, realizado o processo de interpolação para aquela unidade amostral (ANDRIOTTI, 2003).

As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o software R (R COR E TEAM, 2015), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

2.4. Modelagem do Crescimento e Produção

As projeções da área basal (Equações 37) e do volume de madeira (Equações 38) foram realizadas por meio do modelo de Clutter, na sua forma reduzida, pelo procedimento estatístico denominado Mínimos Quadrados em Dois Estágios (MQ2E).

Os valores de índice de sítio obtidos pelo método da Curva-Guia e pelos interpoladores krigagem ordinária (KO) e cokrigagem ordinária (CKO: S – DAP; CKO: S – Ht) foram utilizados no ajuste do modelo de Clutter, totalizando quatro métodos de ajuste.

$$\text{Ln}G_2 = \text{Ln}G_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \text{Ln}\varepsilon \quad (37)$$

$$\text{Ln}V_2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right) + \beta_2 S + \beta_3 \text{Ln}G_2 + \text{Ln}\varepsilon \quad (38)$$

Em que: V_2 = volume na idade de projeção I_2 , em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; G_1 = área basal na idade atual I_1 , em $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; G_2 = área basal na idade de projeção I_2 , em $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; β_i e α_i = parâmetros do modelo; I_1 = idade atual, em meses; I_2 = idade de projeção, em meses; S = índice de sítio na idade atual, em m; ε = erro aleatório, em que $\varepsilon \sim N(0, s^2)$.

A significância dos coeficientes foi verificada com base no teste t ($\alpha = 0,05$), e a qualidade do ajuste do modelo de Clutter, nos quatro métodos de obtenção de sítio, foi avaliada por meio da raiz quadrada do erro médio - RQEM (Equação 39) e erro médio percentual de predição - bias% (Equação 40).

$$\text{RQEM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 1}} \quad (39)$$

$$\text{bias}(\%) = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Y_i - \hat{Y}_i / Y_i)] \quad (40)$$

Em que: Y_i e \hat{Y}_i = valores observados e preditos; n = número de observações.

Em seguida, o modelo ajustado em cada método de obtenção do índice de sítio foi utilizado na projeção da variável área basal e volume médio nas 34 unidades amostrais inicialmente separadas para a validação do desempenho.

A exatidão de cada método de obtenção do índice de sítio foi avaliada por meio do ajuste de uma regressão linear simples ($y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i + e_i$), com os valores estimados nas unidades amostrais de validação em função dos observados. As hipóteses $H_0: \beta_0 = 0$ e $H_0: \beta_1 = 1$ foram testadas pelo teste “t”, com 95 % de probabilidade, em que, se aceitas, verifica-se que os valores estimados são próximos dos paramétricos, demonstrando alto nível de exatidão, caracterizado pela linha de regressão com inclinação de 45° ($\beta_1 = 1$) e passando pela origem ($\beta_0 = 0$) (SCOLFORO et al. 2016). O coeficiente de correlação linear de *Pearson* foi utilizado para retratar a precisão entre os valores. Por fim, a identidade entre os métodos foi avaliada pelo mesmo procedimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes do modelo ajustado de Schumacher ($\beta_0 = 3,5675$; $\beta_1 = -24,2854$) foram significativos ($p \leq 0,05$), com 95% de probabilidade. As estatísticas de ajuste $R^2_{aj.} = 0,85$ e $S_{yx} = 8,7\%$ indicaram qualidade da equação, sem tendência na distribuição dos resíduos normalizados (Figura 17A). Dessa forma, a regressão obtida foi utilizada para estimar o crescimento médio em altura dominante das árvores, e na sua forma rearranjada, para determinar as curvas com os limites das classes de sítio (Figura 17B).

Com base nos valores observados de altura média das árvores dominantes, permitiu-se construir quatro classes de sítios, com amplitude de 4 m e valores centrais de 19 m (Classe IV), 23 m (Classe III), 27 m (Classe II) e 31 m (Classe I) (Figura 17B).

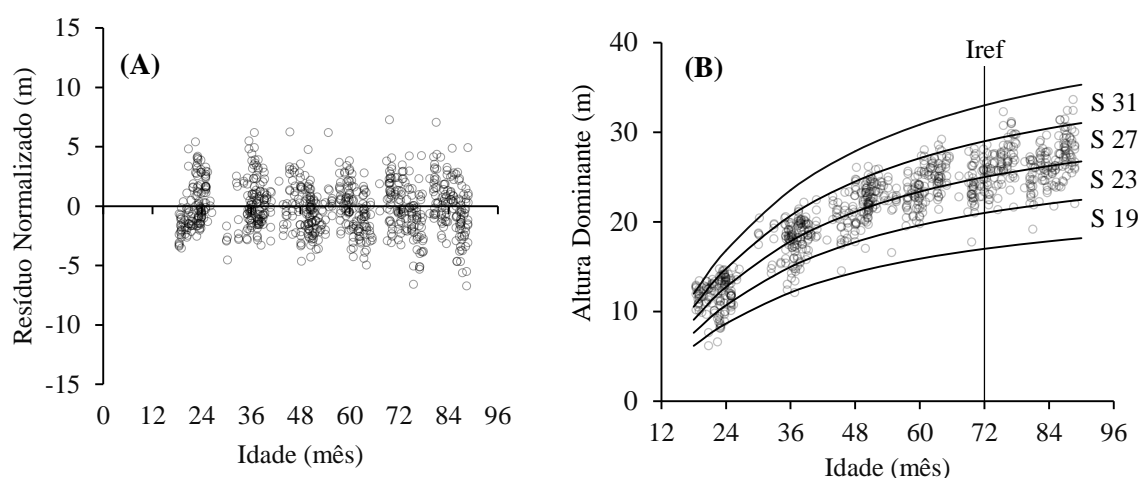


Figura 17. Distribuição dos resíduos normalizados (A) e limites inferiores e superiores das classes de sítio obtidos pelo método da curva guia com o modelo de Schumacher (B) nos povoamentos de eucalipto localizados em Bocaiúva, MG.

O índice de sítio (S) obtido a partir da equação de Schumacher apresentou, predominantemente, forte dependência espacial ($IDE > 0,75$), permitindo a sua espacialização por meio da krigagem e cokrigagem ordinária. Além disso, a presença da estrutura de dependência foi detectada em todas as idades, em que 61% dos modelos de maior desempenho apresentaram forte autocorrelação espacial da variável, enquanto que os demais foram classificados como moderada dependência espacial (Tabela 9). A estruturação do índice de sítio pode ser explicada pela forte continuidade espacial da altura média das árvores dominantes em povoamentos de eucalipto.

Em relação a krigagem ordinária, dentre os modelos de melhor ajuste ao semivariograma experimental ($\bar{E}R$ e S_{er} mais próximos de 0 e 1, respectivamente), não foi verificada tendência na escolha do modelo, ou seja, não foi verificada superioridade de algum modelo em detrimento de outro. Em relação a cokrigagem ordinária, nas duas formas avaliadas (S - DAP e S - HT), o modelo de semivariância teórico gaussiano apresentou desempenho superior em prever a semivariância em função da distância.

O alcance médio nas idades, observado para a krigagem ordinária, cokrigagem ordinária (S - DAP) e cokrigagem ordinária (S - HT) dos modelos de melhor desempenho, foi de 2.202,09, 2.628,88 m e 3.108,24 m, respectivamente. O alcance médio, na prática, pode ser

considerado o raio médio em que os estratos são considerados homogêneos para a área total (MELLO et al., 2005).

Em geral, foi observada tendência de redução do parâmetro ao longo do crescimento do povoamento, indicando que o aumento na idade pode ter intensificado a competição por recursos disponíveis ao crescimento, e conseqüentemente, na redução da continuidade espacial da variável, como também foi verificado por Kaneagae Junior et al. (2007) em povoamentos de eucalipto. No entanto, essa redução não foi significativa ao ponto de afetar a estrutura de dependência espacial da variável. Além disso, é possível observar que a utilização da altura total como variável secundária, permitiu aumento significativo deste parâmetro, melhorando a continuidade espacial, em termos de alcance, da variável índice de sítio.

Tabela 9. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano para a variável índice de sítio (S) em povoamento de eucalipto, nas idades de 24; 36; 48; 60; 72 e 84 meses, espacializada pela krigagem ordinária (KO) e cokrigagem ordinária (S – DAP; S – Ht).

Interpolador	Idade (mês)	Modelo	C ₀	C	a	ER	S _{ER}	IDE(%)	DE	
KO	24	Esférico	1,713	16,808	4.887,483	0,011	1,032	91	Forte	
		Exponencial	1,094	17,825	2.390,422	0,013	1,032	94	Forte	
		Gaussiano	3,577	15,316	2.226,943	0,007	1,030	81	Forte	
	36	Esférico	0,813	6,667	2.089,542	0,007	1,025	89	Forte	
		Exponencial	0,770	7,140	1.302,019	0,008	1,033	90	Forte	
		Gaussiano	1,892	5,634	1.038,188	0,005	1,021	75	Moderada	
	48	Esférico	1,359	3,472	2.459,014	0,003	1,034	72	Moderada	
		Exponencial	1,795	3,278	2.604,411	0,002	1,042	65	Moderada	
		Gaussiano	1,935	3,024	1.387,482	0,003	1,039	61	Moderada	
	60	Esférico	0,598	3,829	2.381,579	0,001	1,041	86	Forte	
		Exponencial	0,348	3,995	1.072,419	-0,001	1,038	92	Forte	
		Gaussiano	1,136	3,273	1.108,153	0,000	1,036	74	Moderada	
	72	Esférico	0,527	4,801	2.639,454	0,000	1,055	90	Forte	
		Exponencial	0,285	5,254	1.364,849	-0,002	1,049	95	Forte	
		Gaussiano	1,291	4,349	1.471,044	-0,002	1,039	77	Forte	
	84	Esférico	0,771	4,408	3.631,125	0,000	1,041	85	Forte	
		Exponencial	0,428	4,696	1.553,360	0,001	1,045	92	Forte	
		Gaussiano	1,386	3,772	1.740,261	-0,003	1,030	73	Moderada	
	CKO (S - DAP)	24	Esférico	0,000	1,769	3.595,574	-0,026	1,021	100	Forte
			Exponencial	0,000	1,898	5.250,000	-0,026	0,778	100	Forte
			Gaussiano	0,243	1,495	2.903,030	-0,033	1,081	86	Forte
		36	Esférico	0,340	0,504	2.004,630	-0,063	0,816	60	Moderada
			Exponencial	0,314	0,547	2.651,800	-0,061	0,815	64	Moderada
			Gaussiano	0,459	0,402	1.846,278	-0,047	0,885	47	Moderada
48		Esférico	0,257	0,659	3.230,799	-0,016	0,912	72	Moderada	
		Exponencial	0,223	0,763	4.835,285	-0,012	0,899	77	Forte	
		Gaussiano	0,337	0,577	2.608,515	-0,017	0,976	63	Moderada	
60		Esférico	0,127	0,764	2.054,733	0,028	0,891	86	Forte	
		Exponencial	0,000	0,918	2.402,460	0,032	0,960	100	Forte	
		Gaussiano	0,240	0,648	1.645,376	0,028	0,910	73	Moderada	
72		Esférico	0,150	0,987	2.544,908	0,025	0,926	87	Forte	
		Exponencial	0,000	1,169	2.975,588	0,029	1,034	100	Forte	
		Gaussiano	0,277	0,856	2.054,733	0,024	0,952	76	Forte	
84		Esférico	0,253	0,762	2.740,536	0,009	0,911	75	Forte	
		Exponencial	0,129	0,922	3.311,548	0,008	0,952	88	Forte	
		Gaussiano	0,345	0,665	2.176,564	0,010	0,944	66	Moderada	
CKO (S - HT)		24	Esférico	0,000	3,821	3.479,152	-0,015	0,826	100	Forte
			Exponencial	0,000	4,164	5.206,976	-0,020	0,685	100	Forte
			Gaussiano	0,405	3,415	2.763,181	-0,028	1,026	89	Forte
		36	Esférico	0,269	3,571	1.861,533	-0,016	0,795	93	Forte
			Exponencial	0,000	3,867	2.305,619	-0,031	1,624	100	Forte
			Gaussiano	0,946	2,964	1.742,934	-0,022	0,750	76	Forte
	48	Esférico	1,409	3,009	4.756,360	0,000	0,820	68	Moderada	
		Exponencial	1,099	3,580	5.250,000	-0,004	1,106	77	Forte	
		Gaussiano	1,678	3,076	5.250,000	0,008	0,990	65	Moderada	
	60	Esférico	1,180	3,192	3.075,159	0,024	0,727	73	Moderada	
		Exponencial	1,053	3,521	4.875,238	0,027	0,693	77	Forte	
		Gaussiano	1,531	2,805	2.565,936	0,013	0,865	65	Moderada	
	72	Esférico	0,504	5,136	2.587,138	0,009	0,702	91	Forte	
		Exponencial	0,000	5,782	3.100,569	0,007	0,906	100	Forte	
		Gaussiano	1,167	4,456	2.088,829	0,011	0,844	79	Forte	
	84	Esférico	0,998	4,710	2.903,030	0,005	0,706	83	Forte	
		Exponencial	0,000	5,854	3.126,188	-0,009	1,165	100	Forte	
		Gaussiano	1,607	4,074	2.324,669	0,006	0,850	72	Moderada	

Em que C₀ = efeito pepita; C = contribuição; a = alcance; ER = erro médio reduzido; S_{er} = desvio padrão dos erros reduzidos; IDE(%) = índice de dependência espacial em porcentagem; DE = classificação da dependência espacial.

Em todos os métodos de obtenção do índice de sítio, o modelo de Clutter ajustado apresentou coeficientes significativos (Tabela 10), ao nível de 95% de probabilidade. Entretanto, na projeção da área basal (G_2) foi constatada inconsistência biológica do parâmetro α_1 , verificada pelo sinal negativo associado ao seu valor (CAMPOS; LEITE, 2013).

Tabela 10. Parâmetros e qualidade do ajuste do modelo de Clutter na projeção de volume e área basal em povoamentos de eucalipto, utilizando a variável independente índice de sítio obtida pelos métodos da Curva-Guia, krigagem ordinária e cokrigagem ordinária.

Método	α_0	α_1	β_0	β_1	β_2	β_3	%bias	RQEM
Área basal (G_2)								
CG	4,4040	-0,0394	-	-	-	-	2,03	1,15
KO	4,7311	-0,0531	-	-	-	-	1,53	1,12
CKO (S – DAP)	4,5565	-0,0456	-	-	-	-	1,98	1,15
CKO (S – HT)	4,6344	-0,0486	-	-	-	-	1,96	1,14
Volume de Madeira (V_2)								
CG	-	-	1,9135	-22,9081	0,0219	1,1045	0,28	8,75
KO	-	-	1,5160	-18,0318	0,0140	1,2883	0,19	11,03
CKO (S - DAP)	-	-	1,6735	-19,9591	0,0175	1,2122	0,20	10,20
CKO (S - HT)	-	-	1,6953	-20,1194	0,0173	1,2076	0,22	10,04

Em que: CG = índice de sítio obtido pelo método da curva-guia; KO = índice de sítio corrigido pela krigagem ordinária; CKO (S – DAP) = índice de sítio obtido pela cokrigagem ordinária utilizando o diâmetro a 1,30 do solo como variável secundária; CKO (S – HT) = índice de sítio obtido pela cokrigagem ordinária utilizando a altura total como variável secundária; α_0 ; α_1 ; β_0 ; β_1 ; β_2 ; β_3 = parâmetros dos modelos simultâneos; RQEM = raiz quadrada do erro médio.

Apesar de não apresentar alterações significativas nas estimativas, a krigagem ordinária apresentou redução de 25% no viés (%bias) dos dados, além da menor raiz quadrada do erro médio (RQEM) na projeção da área basal. Na projeção do volume, apresentou redução de 32% no viés dos dados, mas por outro lado, o maior RQEM dentre todos os métodos analisados.

De forma geral, os menores valores de %bias foram obtidos pelos métodos geoestatísticos para todos os valores de volume (V_2). Assim sendo, apesar de não promover incremento na qualidade das estimativas, os métodos geoestatísticos permitiram redução na tendência das estimativas e conseqüentemente, uma melhor adequação aos pressupostos de independência dos resíduos que os modelos de regressão estão condicionados. Porém, aplicando a componente espacial por meio da geoestatística no modelo de Clutter, Pereira et al. (2016) verificaram melhoria no desempenho do modelo, com redução de até 6,57% no erro de predição do volume. A diferença deste resultado, com o aqui observado, pode estar relacionado com a forma de inserção da componente espacial no modelo. Por outro lado, a inserção direta da componente espacial no modelo de Clutter, pode promover aumento substancial na acurácia de volume futuro (V_2) estimado (PEREIRA et al., 2016).

A aplicação dos métodos geoestatísticos na correção do índice de sítio obtido pelo método da curva guia, não propiciou alterações significativas no ajuste do modelo de Clutter e na projeção da produção em volume (Tabela 11). Por meio do coeficiente de correlação de *Pearson*, foi possível constatar que a krigagem ordinária e as variáveis secundárias utilizadas na cokrigagem ordinária não elevaram a qualidade das estimativas de índice de sítio. No entanto, nenhum método demonstrou exatidão entre as estimativas de volume (V_2) e os valores observados nas 34 unidades amostrais, uma vez que a hipótese de que $\beta_0 = 0$ não foi atendida.

A análise gráfica dos valores estimados em função dos observados (Figura 18), demonstra comportamento semelhante na dispersão dos dados, principalmente para os métodos geoestatísticos. Desse modo, evidencia-se que mesmo não sendo observada exatidão nos valores estimados por cada método, estes não se distanciam de forma significativa.

Tabela 11. Precisão e exatidão dos valores observados e estimados pelos diferentes métodos, e entre os valores obtidos em cada método nas unidades amostrais destinadas a validação dos dados.

Método		β_0^a	β_1^b	R
Y_1	Y_j			
V_{2obs}	$V_2 - CG$	7,98*	0,96 ^{ns}	0,991
V_{2obs}	$V_2 - KO$	12,49*	0,94 ^{ns}	0,984
V_{2obs}	$V_2 - CKO_1$	9,18*	0,95 ^{ns}	0,986
V_{2obs}	$V_2 - CKO_2$	9,84*	0,95 ^{ns}	0,987
$V_2 - CG$	$V_2 - KO$	4,72*	0,98 ^{ns}	0,993
$V_2 - CG$	$V_2 - CKO_1$	1,41 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,994
$V_2 - CG$	$V_2 - CKO_2$	2,08 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,996
$V_2 - KO$	$V_2 - CKO_1$	-2,79*	1,01*	0,998
$V_2 - KO$	$V_2 - CKO_2$	-1,65 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,998
$V_2 - CKO_1$	$V_2 - CKO_2$	1,29 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,998

Em que β_0, β_1 = parâmetros da regressão linear; R = coeficiente de correlação linear de *Pearson*; V_{2obs} = volume futuro observado; $V_2 - CG$ = volume futuro obtido a partir do índice de sítio oriundo da Curva-Guia; $V_2 - KO$ = volume futuro obtido a partir do índice de sítio corrigido pela krigagem ordinária; $V_2 - CKO_1$ = volume futuro obtido a partir do índice de sítio corrigido pela cokrigagem ordinária (var. secundária: DAP); $V_2 - CKO_2$ = volume futuro obtido a partir do índice de sítio corrigido pela cokrigagem ordinária (var. secundária: HT).

^a* indica que o intercepto da regressão é significativamente diferente de 0 ($\alpha = 0,05$) pelo teste t. ^{ns} não significante.

^b* indica que o coeficiente da regressão é significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$) pelo teste t. ^{ns} não significante.

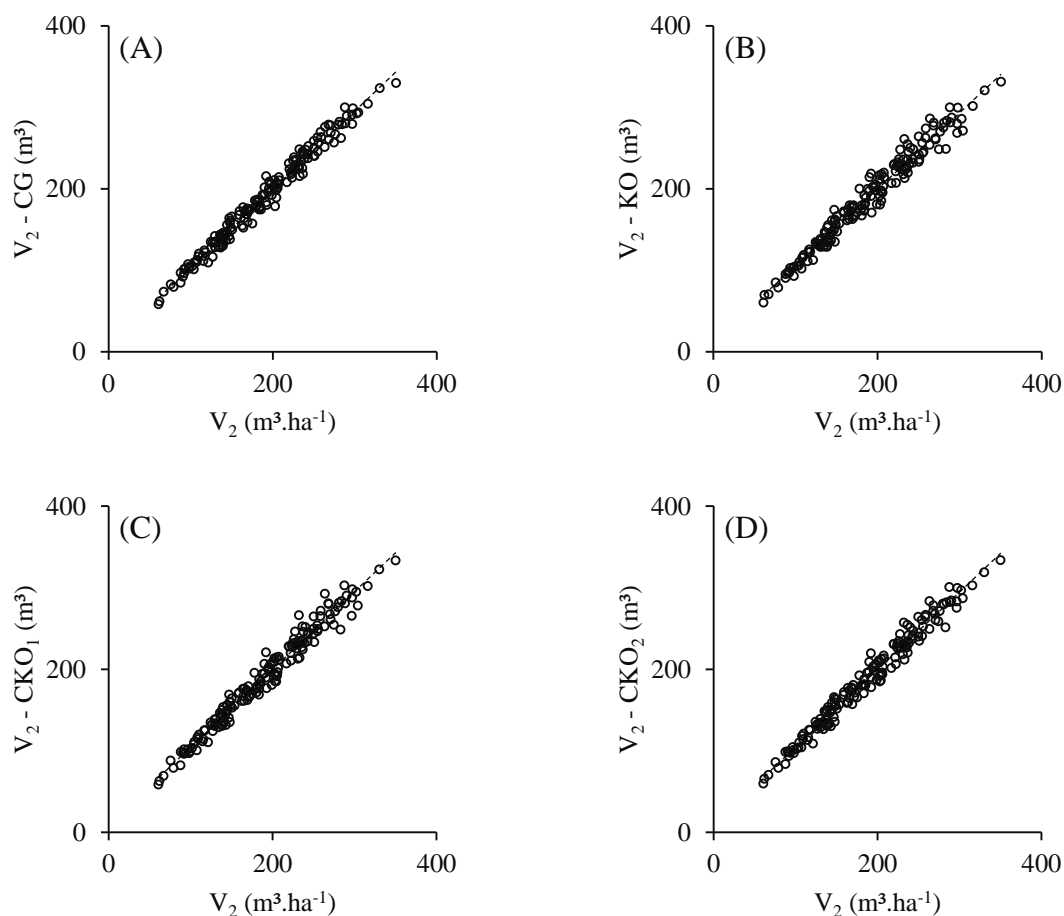


Figura 18. Gráfico de validação dos valores observados de volume futuro (V_2) em relação aos valores estimados pelo modelo de Clutter utilizando a variável índice de sítio obtida pela curva guia (A) e corrigidos pela krigagem ordinária (B), cokrigagem ordinária (var. secundária: DAP) (C), cokrigagem ordinária (var. secundária: HT) (D).

4. CONCLUSÕES

A variável índice de sítio de eucalipto apresenta-se com forte dependência espacial ao longo do crescimento dos povoamentos, permitindo a sua espacialização utilizando como interpoladores espaciais a krigagem e a cokrigagem ordinária. A forte dependência espacial da variável altura média das árvores dominantes viabiliza a aplicação destes métodos na espacialização e mapeamento da capacidade produtiva dos povoamentos realizados pelos métodos tradicionais, como o da curva guia.

A correção do índice de sítio, utilizando a krigagem e cokrigagem ordinária, não propicia alterações significativas na projeção da produção em volume em povoamentos de eucalipto. Dessa forma, outras formas de incorporar a componente espacial no modelo de Clutter devem ser investigadas, visando principalmente superar o problema da inconsistência biológica da variável índice de sítio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003.
- CALDEIRA, M. A. et al. Spatial distribution of leaf-cutting ant nests (Hymenoptera: Formicidae) in *Eucalyptus* plantations. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 34–39, 2005.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017.
- DEBERTIN, D. L. Significance tests of regression coefficients: an additional reminder. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 57, p. 124, 1974.
- GUEDES, I. C. L. et al. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* avaliada ao longo do tempo. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 527–534, 2015.
- KANEGAE JUNIOR, H. et al. 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.
- LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, L. C. R. Influência do tipo de amostragem na estimativa de volume de madeira de eucalipto por Krigagem. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 511–523, 2016.
- MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 113–126, 2005.
- MELLO, J. M. et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 251–260, 2006.
- PELISSARI, A. L. et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biomassa**, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014.
- PELISSARI, A. L. et al. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 601–608, 2015.
- PEREIRA, J. C. P. Modelo de crescimento e produção de Clutter adicionado de uma variável latente para predição de volume em um plantio de *Eucalyptus urograndis* com variáveis correlacionadas espacialmente. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 393–403, 2016.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2015.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v. 1, n. 2, p. 15–18, 2001.

SALLES, T. T. et al. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 253–260, 2012.

SCHNEIDER, P. R. et al. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria, RS: UFSM, 2009.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, v. 376, p. 24–35, 2016.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria Florestal**: Medição, Volumetria e Gravimetria. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. 1. ed. Botucatu: UNESP, 2003.

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados deste estudo permitem as conclusões a seguir:

1. Os processos e intensidades amostrais influenciam a exatidão, precisão e espacialização da estrutura de dependência espacial de variáveis dendrométricas de eucalipto.
2. Em inventários florestais pela análise geoestatística, cujo objetivo é obter o intervalo de confiança para a média espacial, deve se considerar a amostragem sistemática com intensidade de uma unidade amostral a cada 16,4 hectares para estimativas precisas e exatas.
3. Em inventários florestais pela análise geoestatística, cujo objetivo é mapear a variabilidade espacial de variáveis dendrométricas de eucalipto, deve se considerar a amostragem sistemática com intensidade de uma unidade amostral a cada 6,5 hectares para estimativas precisas e exatas.
4. Por apresentar forte dependência espacial, a variável altura média das árvores dominantes não sofre influência significativa do procedimento de amostragem, sendo uma variável com grande potencial na delimitação da capacidade produtiva e uso em modelos de crescimento e produção.
5. A dependência espacial de variáveis dendrométricas de eucalipto não sofre alterações significativas com o aumento da idade do povoamento, sendo recomendada a análise geoestatística em inventários florestais contínuos, utilizando uma unidade amostral a cada 16,4 hectares.
6. A correção do índice de sítio pela krigagem e cokrigagem ordinária não propicia alterações significativas no ajuste do modelo de Clutter. Outras formas de melhorar o ajuste deste modelo, utilizando a forte dependência espacial apresentada pela altura média das árvores dominantes, devem ser investigadas.

APÊNDICE A – Resultados da análise de dependência espacial referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem casual simples, nas diferentes intensidades amostrais.

Tabela 12. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	AIC	\overline{ER}	IDE(%)
16,4	1	Esférico	0,00	1,58	404,68	80,37	0,054	100,0
		Exponencial	1,56	0,00	0,00	83,55	-	0,0
		Gaussiano	1,56	0,00	0,00	83,55	-	0,0
	7	Esférico	0,00	1,18	467,71	74,23	0,059	100,0
		Exponencial	0,00	1,20	176,30	75,46	0,077	100,0
		Gaussiano	0,00	1,25	219,14	74,02	0,069	100,0
	19	Esférico	0,00	2,82	1.175,82	80,79	-0,023	100,0
		Exponencial	0,00	2,38	453,32	82,26	-0,029	100,0
		Gaussiano	0,00	2,19	300,04	78,34	-0,036	100,0
6,5	28	Esférico	0,21	1,39	316,74	232,44	0,003	86,8
		Exponencial	0,00	1,59	108,75	233,95	0,005	100,0
		Gaussiano	0,41	1,19	149,69	232,72	0,004	74,4
	11	Esférico	0,39	1,17	383,73	228,34	0,002	75,2
		Exponencial	0,00	1,50	105,45	229,90	0,002	100,0
		Gaussiano	0,65	0,89	187,60	228,95	0,005	57,8
	30	Esférico	0,76	0,90	514,13	234,58	-0,005	54,1
		Exponencial	0,00	1,62	110,12	234,83	0,000	100,0
		Gaussiano	0,87	0,75	214,96	234,81	-0,010	46,2
3,2	2	Esférico	1,42	0,32	450,40	402,50	0,001	18,5
		Exponencial	1,22	0,52	111,02	402,82	0,004	29,9
		Gaussiano	1,43	0,31	192,49	402,47	0,003	17,9
	13	Esférico	0,81	0,95	805,98	374,58	0,001	54,0
		Exponencial	0,54	1,09	199,62	377,12	0,004	67,0
		Gaussiano	0,99	0,71	377,82	376,07	0,001	41,8
	18	Esférico	0,90	0,70	330,60	389,20	-0,004	43,7
		Exponencial	0,33	1,27	84,92	389,89	-0,008	79,5
		Gaussiano	1,05	0,56	169,61	389,42	-0,004	34,7
2,3	19	Esférico	0,95	0,78	500,00	537,78	0,000	45,0
		Exponencial	0,72	1,01	157,41	541,01	-0,001	58,4
		Gaussiano	1,09	0,66	261,10	537,79	0,000	37,5
	22	Esférico	0,99	0,56	543,88	525,38	-0,001	36,0
		Exponencial	0,88	0,68	189,43	527,74	0,000	43,6
		Gaussiano	1,10	0,48	300,49	525,18	0,000	30,5
	25	Esférico	0,93	0,83	454,32	541,90	0,001	47,1
		Exponencial	0,51	1,27	130,14	544,17	0,001	71,4
		Gaussiano	1,12	0,67	247,47	542,37	0,001	37,7
1,8	10	Esférico	0,97	0,67	550,97	675,79	-0,001	41,0
		Exponencial	0,78	0,86	185,56	678,32	-0,001	52,4
		Gaussiano	1,09	0,56	280,08	675,78	0,000	34,1
	21	Esférico	0,94	0,78	585,06	676,96	-0,002	45,2
		Exponencial	0,76	0,94	197,17	680,28	-0,002	55,5
		Gaussiano	1,09	0,63	300,14	677,60	-0,002	36,7
	26	Esférico	0,99	0,57	559,42	670,91	-0,002	36,4
		Exponencial	0,78	0,76	160,35	672,90	-0,002	49,4
		Gaussiano	1,09	0,45	262,78	671,34	-0,001	29,2

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; AIC é o Critério de Informação de Akaike; \overline{ER} é o Erro Médio Reduzido; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo “-” denota estimativa nula ocasionada pelo efeito pepita puro.

Tabela 13. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	AIC	ER	IDE(%)
16,4	3	Esférico	0,00	5,69	193,00	113,08	0,006	100,0
		Exponencial	5,69	0,00	0,00	113,28	-	0,0
		Gaussiano	0,00	5,80	113,69	113,04	0,002	100,0
	7	Esférico	0,00	6,24	386,02	113,51	-0,030	100,0
		Exponencial	6,00	0,00	0,00	114,50	-	0,0
		Gaussiano	6,00	0,00	0,00	114,50	-	0,0
	27	Esférico	12,68	0,03	76,14	131,74	-0,001	0,2
		Exponencial	12,71	0,00	0,00	131,74	-	0,0
		Gaussiano	12,71	0,00	0,00	131,74	-	0,0
6,5	15	Esférico	0,00	11,26	158,94	375,83	-0,009	100,0
		Exponencial	0,00	11,37	44,94	376,63	-0,007	100,0
		Gaussiano	11,43	0,00	0,00	377,22	-	0,0
	20	Esférico	8,19	0,99	845,02	360,98	-0,001	10,8
		Exponencial	7,74	1,44	199,29	361,27	0,009	15,7
		Gaussiano	8,34	0,83	407,50	-	-	9,1
	23	Esférico	7,96	0,00	591,28	351,87	-0,005	0,0
		Exponencial	7,96	0,00	0,00	351,87	-	0,0
		Gaussiano	7,96	0,00	294,63	351,87	-0,005	0,0
3,2	13	Esférico	4,73	3,24	264,39	580,17	0,001	40,7
		Exponencial	3,81	4,18	86,39	580,81	-0,001	52,3
		Gaussiano	0,00	-	-	-	-	0,0
	19	Esférico	8,24	0,28	821,93	590,56	-0,006	3,3
		Exponencial	8,38	0,15	269,85	590,75	N	1,8
		Gaussiano	8,29	0,24	420,61	590,56	I	2,8
	20	Esférico	0,00	11,35	160,09	622,53	-0,002	100,0
		Exponencial	0,00	11,44	52,00	623,78	-0,005	100,0
		Gaussiano	0,00	11,39	77,18	622,70	-0,002	100,0
2,3	6	Esférico	3,76	6,88	233,80	846,81	-0,005	64,7
		Exponencial	0,19	10,49	71,39	847,98	-0,005	98,2
		Gaussiano	5,42	5,23	123,67	847,24	-0,005	49,1
	22	Esférico	7,56	2,32	483,68	837,15	-0,003	23,5
		Exponencial	5,79	4,04	117,32	837,29	-0,004	41,1
		Gaussiano	7,95	1,91	231,38	837,29	-0,004	19,4
	24	Esférico	4,29	5,21	233,22	830,94	-0,006	54,8
		Exponencial	1,41	8,14	72,56	831,37	-0,007	85,2
		Gaussiano	5,70	3,83	129,89	831,03	-0,006	40,2
1,8	3	Esférico	6,24	2,53	312,71	1053,21	-0,002	28,9
		Exponencial	4,52	4,25	85,42	1053,89	-0,003	48,5
		Gaussiano	6,70	2,07	156,96	1053,27	-0,002	23,6
	19	Esférico	4,40	4,65	237,90	1057,15	-0,004	51,4
		Exponencial	0,00	9,03	62,13	1057,51	-0,004	100,0
		Gaussiano	4,92	4,10	113,72	1057,28	-0,004	45,5
	21	Esférico	4,40	4,65	237,90	1057,15	-0,004	51,4
		Exponencial	0,00	9,03	62,13	1057,51	-0,004	100,0
		Gaussiano	4,92	4,10	113,72	1057,28	-0,004	45,5

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo “-” denota estimativa nula ocasionada pelo efeito pepita puro; o símbolo N representa valores não numéricos (NaN: Not a Number), indicado indefinições matemáticas, enquanto I representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 14. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	AIC	ER	IDE(%)
16,4	13	Esférico	0,00	13,39	612,27	127,61	-0,038	100,0
		Exponencial	0,00	12,73	206,42	129,01	-0,013	100,0
		Gaussiano	1,60	11,52	261,31	127,73	-0,048	87,8
	21	Esférico	0,26	12,28	500,00	128,09	-0,066	97,9
		Exponencial	0,00	12,19	204,03	128,12	-0,038	100,0
		Gaussiano	1,89	10,43	229,04	127,87	-0,061	84,7
	29	Esférico	1,72	4,62	727,13	111,98	0,048	72,8
		Exponencial	0,80	5,78	307,69	112,12	0,012	87,9
		Gaussiano	2,84	3,56	418,68	112,02	0,014	55,6
5,4	1	Esférico	2,72	7,98	597,98	353,19	0,005	74,5
		Exponencial	0,00	10,51	179,58	354,69	0,006	100,0
		Gaussiano	4,29	6,38	302,54	353,96	0,003	59,8
	2	Esférico	4,87	7,14	496,67	371,44	0,007	59,5
		Exponencial	0,00	11,78	115,00	372,50	0,009	100,0
		Gaussiano	6,31	5,63	242,73	372,04	0,008	47,2
	20	Esférico	0,68	8,95	443,28	346,70	-0,012	93,0
		Exponencial	0,00	10,18	210,29	348,67	-0,003	100,0
		Gaussiano	2,36	7,52	240,14	345,92	-0,003	76,1
3,2	19	Esférico	4,48	8,63	545,31	611,46	-0,014	65,8
		Exponencial	2,14	10,94	178,93	614,94	-0,017	83,6
		Gaussiano	6,50	6,83	302,46	613,07	-0,012	51,2
	23	Esférico	2,23	9,63	500,01	588,21	-0,012	81,2
		Exponencial	1,17	19,40	499,99	591,21	0,000	94,3
		Gaussiano	3,36	8,66	234,90	585,78	-0,006	72,0
	28	Esférico	2,35	8,64	533,34	576,97	-0,008	78,6
		Exponencial	2,22	14,67	499,99	585,08	-0,005	86,8
		Gaussiano	4,14	7,23	293,09	577,84	-0,007	63,6
2,3	13	Esférico	1,95	10,89	568,64	796,87	-0,004	84,8
		Exponencial	1,75	17,51	499,99	807,00	0,000	90,9
		Gaussiano	4,38	7,71	292,68	801,49	-0,003	63,8
	19	Esférico	2,75	10,18	537,91	816,64	-0,006	78,7
		Exponencial	2,45	17,87	499,99	827,51	-0,008	88,0
		Gaussiano	4,88	8,27	286,89	819,15	-0,005	62,9
	23	Esférico	3,99	9,52	563,03	834,80	-0,002	70,5
		Exponencial	0,07	12,46	143,46	837,92	-0,005	99,5
		Gaussiano	6,05	6,77	272,52	838,18	-0,003	52,8
1,8	11	Esférico	3,02	9,31	565,47	1030,72	-0,002	75,5
		Exponencial	2,56	16,04	500,00	1039,37	-0,004	86,3
		Gaussiano	4,99	7,20	297,47	1034,17	-0,003	59,1
	29	Esférico	2,56	9,06	573,31	1010,15	-0,003	78,0
		Exponencial	2,34	14,80	499,99	1021,85	-0,003	86,3
		Gaussiano	4,55	7,14	313,06	1014,83	-0,003	61,1
	30	Esférico	3,27	9,18	561,39	1038,95	-0,003	73,7
		Exponencial	2,89	15,70	499,99	1048,21	-0,008	84,5
		Gaussiano	5,32	6,84	294,68	1043,41	-0,004	56,3

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; AIC é o Critério de Informação de Akaike; ER é o Erro Médio Reduzido; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 15. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	AIC	ER	IDE(%)
16,4	10	Esférico	11,24	5,01	653,87	136,94	I	30,8
		Exponencial	10,87	5,33	141,88	137,23	I	32,9
		Gaussiano	0,00	16,16	87,06	137,25	0,000	100,0
	19	Esférico	0,00	13,93	695,82	125,36	-0,073	100,0
		Exponencial	0,00	14,20	347,99	126,26	-0,048	100,0
		Gaussiano	1,15	13,81	319,08	125,26	-0,050	92,3
	21	Esférico	0,84	10,53	750,00	123,20	-0,030	92,6
		Exponencial	0,00	12,27	344,63	124,55	-0,033	100,0
		Gaussiano	2,48	9,53	432,68	122,49	-0,033	79,4
5,4	11	Esférico	0,69	12,37	585,52	354,17	-0,007	94,8
		Exponencial	0,50	18,99	500,00	359,37	-0,003	97,5
		Gaussiano	2,95	10,45	305,37	354,28	-0,003	78,0
	23	Esférico	1,50	14,54	569,20	368,72	-0,012	90,6
		Exponencial	0,00	15,87	234,79	371,27	-0,012	100,0
		Gaussiano	4,53	11,98	314,18	369,44	-0,010	72,6
	24	Esférico	0,00	13,17	466,81	357,80	-0,018	100,0
		Exponencial	0,00	13,14	229,94	360,36	-0,006	100,0
		Gaussiano	0,00	13,30	177,40	356,13	-0,025	100,0
3,2	8	Esférico	0,00	13,69	543,62	567,82	-0,009	100,0
		Exponencial	0,00	15,26	340,57	572,64	-0,008	100,0
		Gaussiano	2,99	10,56	292,70	571,77	-0,003	77,9
	13	Esférico	0,00	12,99	651,54	542,14	0,005	100,0
		Exponencial	0,00	13,07	364,56	548,17	0,007	100,0
		Gaussiano	1,18	9,23	204,12	549,02	0,011	88,6
	14	Esférico	0,39	13,94	566,36	573,47	0,006	97,3
		Exponencial	0,00	16,40	342,12	579,24	0,006	100,0
		Gaussiano	3,37	11,42	316,83	575,43	0,004	77,2
2,3	3	Esférico	0,19	14,33	575,34	774,19	0,001	98,7
		Exponencial	0,00	14,92	321,60	781,59	-0,003	100,0
		Gaussiano	3,15	10,09	283,91	781,48	-0,001	76,2
	6	Esférico	0,00	16,42	604,00	777,86	-0,002	100,0
		Exponencial	0,00	16,06	336,54	784,78	-0,005	100,0
		Gaussiano	3,03	10,68	260,49	786,89	-0,001	77,9
	21	Esférico	0,00	15,10	586,27	770,32	-0,012	100,0
		Exponencial	0,00	14,12	298,78	780,13	-0,012	100,0
		Gaussiano	2,07	9,80	203,23	781,90	-0,019	82,6
1,8	11	Esférico	0,39	13,94	584,20	975,44	-0,002	97,3
		Exponencial	0,00	14,84	329,26	981,18	-0,005	100,0
		Gaussiano	-	-	-	-	-	-
	14	Esférico	0,47	12,79	569,02	967,46	-0,003	96,5
		Exponencial	0,00	14,34	325,36	975,40	-0,004	100,0
		Gaussiano	3,13	9,83	301,51	975,38	-0,003	75,8
	15	Esférico	0,00	15,61	585,93	977,49	-0,001	100,0
		Exponencial	0,00	15,09	328,85	985,40	-0,005	100,0
		Gaussiano	3,31	10,04	288,62	991,08	-0,001	75,2

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo “-” denota estimativa nula ocasionada pelo efeito pepita puro; enquanto I representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 16. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	ER	AIC	IDE(%)
16,4	8	Esférico	1.706,06	1.167,92	635,12	-0,024	255,62	40,6
		Exponencial	2.214,52	643,84	183,72	I	256,18	22,5
		Gaussiano	1.871,80	1.016,77	330,00	-0,023	255,63	35,2
	3	Esférico	386,01	869,77	204,69	-0,013	237,29	69,3
		Exponencial	1.185,01	76,61	322,71	N	237,47	6,1
		Gaussiano	1.193,87	70,25	812,96	I	237,43	5,6
	29	Esférico	1,20	10,28	813,80	-0,027	123,18	89,6
		Exponencial	0,00	12,27	344,63	-0,033	124,55	100,0
		Gaussiano	2,48	9,53	432,68	-0,033	122,49	79,4
5,4	9	Esférico	1.201,75	1.840,14	468,51	-0,006	759,79	60,5
		Exponencial	360,71	2.629,00	120,67	-0,003	761,42	87,9
		Gaussiano	1.596,80	1.446,27	241,35	-0,005	760,13	47,5
	10	Esférico	1.729,64	1.240,04	580,88	0,009	760,20	41,8
		Exponencial	1.477,56	1.505,61	197,84	0,012	761,35	50,5
		Gaussiano	1.994,43	1.011,50	325,94	0,010	760,32	33,7
	16	Esférico	558,58	1.462,08	466,14	0,003	726,83	72,4
		Exponencial	0,00	1.983,26	134,07	-0,005	728,21	100,0
		Gaussiano	845,69	1.177,58	239,52	0,005	726,96	58,2
3,2	1	Esférico	976,32	1.517,13	338,13	-0,009	1.243,90	60,8
		Exponencial	0,00	2.484,65	92,99	-0,005	1.245,15	100,0
		Gaussiano	1.275,26	1.211,66	168,95	-0,007	1.244,22	48,7
	8	Esférico	1.158,52	1.456,22	653,37	0,004	1.233,71	55,7
		Exponencial	767,30	1.779,14	198,92	0,002	1.235,75	69,9
		Gaussiano	1.411,05	1.215,90	327,57	0,003	1.234,05	46,3
	16	Esférico	657,87	1.684,04	340,83	-0,004	1.231,19	71,9
		Exponencial	53,30	2.277,10	110,91	-0,001	1.232,31	97,7
		Gaussiano	898,92	1.440,00	165,32	-0,002	1.230,68	61,6
2,3	19	Esférico	1.272,40	1.332,30	500,00	-0,004	1.724,57	51,1
		Exponencial	800,00	1.778,83	151,30	-0,004	1.727,23	69,0
		Gaussiano	1.550,62	1.078,98	265,90	-0,003	1.725,26	41,0
	20	Esférico	870,29	1.761,85	571,39	-0,005	1.699,90	66,9
		Exponencial	261,43	2.199,67	155,17	-0,006	1.703,14	89,4
		Gaussiano	1.226,93	1.357,31	285,54	-0,006	1.701,73	52,5
	25	Esférico	1.309,53	1.204,16	500,00	-0,010	1.721,40	47,9
		Exponencial	55,24	2.370,88	99,46	-0,005	1.720,26	97,7
		Gaussiano	996,49	1.398,72	139,74	-0,003	1.720,55	58,4
1,8	11	Esférico	1.097,69	1.305,61	500,00	-0,004	2.191,48	54,3
		Exponencial	590,71	1.782,67	152,80	-0,004	2.193,12	75,1
		Gaussiano	1.354,05	1.039,20	252,78	-0,002	2.192,32	43,4
	29	Esférico	1.027,27	1.289,44	612,49	-0,001	2.170,30	55,7
		Exponencial	968,02	2.084,89	500,00	-0,006	2.177,22	68,3
		Gaussiano	1.258,48	990,89	287,79	-0,002	2.171,54	44,1
	30	Esférico	1.282,69	1.245,98	559,15	-0,002	2.204,90	49,3
		Exponencial	752,44	1.686,40	148,57	-0,002	2.206,89	69,1
		Gaussiano	1.530,26	946,52	270,76	-0,003	2.206,33	38,2

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo N representa valores não numéricos (NaN: Not a Number), indicado indefinições matemáticas, enquanto I representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 17. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais.

I.A.	Simulação	Modelo	C ₀	C	A (m)	AIC	ER	IDE(%)
16,4	7	Esférico	0,00	26.821,38	592,78	303,07	-0,032	100,0
		Exponencial	0,00	26.309,91	207,98	304,68	-0,030	100,0
		Gaussiano	2.601,85	25.352,37	287,78	302,91	-0,053	90,7
	9	Esférico	0,00	29.545,62	151,69	309,98	-0,035	100,0
		Exponencial	29.824,69	0,00	0,00	-	-	0,0
		Gaussiano	29.824,69	0,00	0,00	-	-	0,0
	12	Esférico	16.842,47	13.277,79	2.177,53	306,09	N	44,1
		Exponencial	25.586,89	1,19	424,87	306,72	-0,040	0,0
		Gaussiano	16.128,26	27.222,69	1.508,78	305,34	I	62,8
5,4	9	Esférico	13.117,98	20.957,93	500,00	927,61	0,018	61,5
		Exponencial	0,00	33.011,84	121,62	927,79	-0,016	100,0
		Gaussiano	9.723,15	23.466,24	166,67	926,91	-0,005	70,7
	17	Esférico	18.118,55	15.861,69	519,88	930,55	-0,025	46,7
		Exponencial	13.104,02	20.397,38	137,89	932,02	-0,016	60,9
		Gaussiano	21.240,36	12.685,75	259,79	930,78	-0,022	37,4
	29	Esférico	14.862,34	7.134,37	459,30	903,81	-0,009	32,4
		Exponencial	11.475,29	10.575,02	122,01	904,68	-0,003	48,0
		Gaussiano	16.001,15	6.009,35	224,44	903,84	-0,003	27,3
3,2	1	Esférico	17.965,20	12.657,78	356,62	1542,71	-0,011	41,3
		Exponencial	9.269,68	21.010,06	84,76	1543,64	-0,008	69,4
		Gaussiano	21.141,47	9.542,51	192,29	1542,99	-0,010	31,1
	24	Esférico	13.321,18	12.162,00	500,00	1512,57	-0,008	47,7
		Exponencial	7.117,00	18.000,62	130,68	1514,06	-0,008	71,7
		Gaussiano	15.725,95	9.825,02	256,43	1512,92	-0,010	38,5
	28	Esférico	16.500,43	11.561,72	449,90	1528,66	-0,008	41,2
		Exponencial	4.766,96	23.088,46	95,14	1529,67	-0,007	82,9
		Gaussiano	18.864,84	9.030,12	218,48	1529,13	-0,008	32,4
2,3	19	Esférico	16.255,08	12.344,03	500,00	2122,22	-0,006	43,2
		Exponencial	11.132,97	17.119,84	140,50	2124,21	-0,006	60,6
		Gaussiano	18.793,20	10.142,12	269,70	2122,59	-0,007	35,1
	22	Esférico	16.255,08	12.344,03	500,00	2122,22	-0,006	43,2
		Exponencial	11.132,97	17.119,84	140,50	2124,21	-0,006	60,6
		Gaussiano	18.793,20	10.142,12	269,70	2122,59	-0,007	35,1
	26	Esférico	17.772,48	15.073,31	551,20	2139,67	-0,006	45,9
		Exponencial	10.820,71	21.192,25	144,75	2141,23	-0,003	66,2
		Gaussiano	20.283,09	12.033,40	256,45	2139,85	-0,006	37,2
1,8	10	Esférico	16.004,92	13.055,97	500,00	2728,49	-0,005	44,9
		Exponencial	11.618,88	17.506,82	163,97	2730,57	-0,003	60,1
		Gaussiano	18.514,58	11.096,94	270,32	2728,40	-0,005	37,5
	18	Esférico	14.356,80	11.745,89	430,46	2712,01	-0,003	45,0
		Exponencial	7.292,40	18.801,80	119,83	2713,24	-0,002	72,1
		Gaussiano	16.622,52	9.573,32	221,43	2712,14	-0,004	36,5
	28	Esférico	14.315,20	11.182,51	408,14	2709,98	-0,002	43,9
		Exponencial	10.456,24	15.303,13	139,70	2712,09	-0,003	59,4
			Gaussiano	16.755,55	9.074,26	226,77	2709,83	-0,004

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo “-” denota estimativa nula ocasionada pelo efeito pepita puro; o símbolo N representa valores não numéricos (NaN: Not a Number), indicado indefinições matemáticas, enquanto I representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

APÊNDICE B – Resultados da análise de dependência espacial referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem sistemática, nas diferentes intensidades amostrais.

Tabela 18. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	\overline{ER}	IDE(%)
16,4	10	Esférico	0,00	2,78	861,03	91,48	0,023	100,00
		Exponencial	0,00	2,35	168,45	92,55	-0,006	100,00
		Gaussiano	0,66	1,96	403,76	92,08	-0,023	74,66
	13	Esférico	2,19	0,00	275,66	91,33	0,009	0,22
		Exponencial	2,19	0,00	23,68	91,33	0,009	0,10
		Gaussiano	2,19	0,00	41,33	91,33	0,009	0,15
	6	Esférico	1,50	0,01	314,65	82,76	0,022	0,37
		Exponencial	1,51	0,00	32,18	82,76	0,022	0,11
		Gaussiano	1,51	0,00	57,20	82,76	0,022	0,11
6,5	9	Esférico	1,46	1,10	701,33	223,11	-0,006	42,96
		Exponencial	0,00	2,49	125,74	223,60	-0,006	100,00
		Gaussiano	1,64	0,88	294,06	223,45	-0,010	34,93
	2	Esférico	0,45	1,18	523,59	194,82	0,010	72,58
		Exponencial	0,00	1,59	144,23	196,49	0,014	100,00
		Gaussiano	0,59	1,01	242,37	195,23	0,010	63,08
	6	Esférico	1,07	0,29	386,03	190,15	-0,015	21,49
		Exponencial	1,35	0,00	9,47	190,29	0,006	0,23
		Gaussiano	1,18	0,18	186,14	190,22	-I	13,25
3,2	1	Esférico	1,24	0,53	404,00	403,05	0,000	29,99
		Exponencial	0,63	1,13	82,15	403,73	-0,002	64,00
		Gaussiano	1,31	0,46	187,61	403,09	0,000	25,98
	7	Esférico	1,53	0,45	491,10	416,76	-0,006	22,75
		Exponencial	1,38	0,59	148,57	417,57	-0,004	29,99
		Gaussiano	1,61	0,37	256,87	416,69	-0,024	18,80
	9	Esférico	0,82	0,59	533,36	367,42	0,001	41,99
		Exponencial	0,40	0,98	116,24	369,08	0,003	70,72
		Gaussiano	0,94	0,46	263,47	368,23	0,001	32,76
2,3	1	Esférico	0,98	0,85	368,47	555,13	0,003	46,31
		Exponencial	0,49	1,34	111,77	555,42	0,001	73,12
		Gaussiano	1,19	0,65	204,37	555,12	0,002	35,27
	4	Esférico	1,12	0,61	500,00	545,10	-0,003	35,18
		Exponencial	0,79	0,93	141,40	545,53	-0,001	53,94
		Gaussiano	1,16	0,56	220,57	544,35	0,000	32,47
	10	Esférico	0,84	0,65	500,00	515,56	-0,001	43,63
		Exponencial	0,59	0,90	148,10	518,56	0,000	60,17
		Gaussiano	0,94	0,56	243,09	515,32	0,001	37,14
1,8	7	Esférico	1,09	0,66	533,84	694,50	0,000	37,55
		Exponencial	0,85	0,90	165,84	696,11	0,000	51,54
		Gaussiano	1,19	0,55	251,16	694,18	0,000	31,68
	5	Esférico	1,13	0,64	545,15	697,47	-0,001	36,12
		Exponencial	0,94	0,82	181,20	699,51	-0,001	46,70
		Gaussiano	1,22	0,54	261,98	697,06	0,000	30,56
	10	Esférico	1,06	0,73	556,07	694,66	-0,001	40,85
		Exponencial	0,73	1,04	157,06	695,64	-0,001	58,91
		Gaussiano	1,18	0,59	261,71	694,82	-0,001	33,16

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; \overline{ER} é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: o símbolo “I” representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 19. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	1	Esférico	4,34	0,01	247,23	107,09	0,003	0,14
		Exponencial	4,35	0,00	0,00	107,09	0,000	0,00
		Gaussiano	4,34	0,01	97,40	107,09	0,003	0,23
	9	Esférico	11,98	0,00	950,35	130,39	-0,005	0,00
		Exponencial	11,96	0,02	37,00	130,39	-0,005	0,19
		Gaussiano	11,95	0,03	3,58	130,39	-0,005	0,22
	3	Esférico	0,00	8,88	500,00	123,32	-0,005	100,00
		Exponencial	8,80	0,02	51,37	123,36	-0,005	0,28
		Gaussiano	0,00	8,83	199,71	123,34	-0,007	100,00
6,5	9	Esférico	0,00	9,85	299,99	304,74	0,000	100,00
		Exponencial	0,00	9,80	65,51	304,93	-0,004	100,00
		Gaussiano	0,00	10,01	165,50	304,62	-0,007	100,00
	6	Esférico	8,46	0,01	37,22	296,51	0,001	0,14
		Exponencial	8,47	0,00	0,00	296,51	-0,003	0,00
		Gaussiano	8,45	0,02	28,47	296,51	-0,002	0,18
	6	Esférico	0,00	11,43	217,60	313,87	-0,006	100,00
		Exponencial	11,42	0,03	31,31	314,01	-0,003	0,26
		Gaussiano	0,00	11,45	95,38	313,97	-0,005	100,00
3,2	2	Esférico	7,23	1,52	318,20	593,07	-0,004	17,38
		Exponencial	6,50	2,26	85,43	593,33	-0,003	25,79
		Gaussiano	7,64	1,11	174,03	593,13	-0,003	12,71
	3	Esférico	7,29	1,49	581,60	591,78	-0,005	16,99
		Exponencial	6,19	2,57	127,35	592,16	-0,003	29,34
		Gaussiano	7,53	1,26	284,20	591,85	-0,003	14,34
	8	Esférico	10,19	0,02	150,69	611,88	0,003	0,18
		Exponencial	10,21	0,00	0,00	611,88	0,000	0,00
		Gaussiano	0,00	10,21	64,53	611,42	0,003	100,00
2,3	2	Esférico	5,98	4,78	450,44	839,61	-0,005	44,44
		Exponencial	3,70	6,96	128,91	840,78	-0,005	65,27
		Gaussiano	7,01	3,80	239,35	839,92	-0,005	35,12
	3	Esférico	3,60	5,10	263,34	813,31	-0,005	58,57
		Exponencial	0,00	8,69	76,04	813,35	-0,005	100,00
		Gaussiano	0,00	8,59	90,32	812,89	-0,007	100,00
	9	Esférico	4,00	5,48	214,78	832,65	0,000	57,82
		Exponencial	0,00	9,49	60,20	833,11	-0,004	100,00
		Gaussiano	4,92	4,56	107,20	832,94	-0,007	48,05
1,8	1	Esférico	7,70	2,44	352,31	1.084,19	0,001	24,08
		Exponencial	5,72	4,42	96,08	1.083,96	-0,003	43,58
		Gaussiano	7,87	2,26	158,22	1.084,03	-0,002	22,31
	5	Esférico	7,51	1,71	499,99	1.063,33	-0,006	18,51
		Exponencial	6,20	2,96	115,17	1.063,50	-0,003	32,31
		Gaussiano	7,75	1,45	228,74	1.063,32	-0,005	15,78
	8	Esférico	7,22	2,38	401,24	1.070,51	-0,004	24,83
		Exponencial	5,63	3,96	108,15	1.070,85	-0,003	41,28
		Gaussiano	7,63	1,98	201,30	1.070,49	-0,003	20,57

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 20. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	6	Esférico	4,02	6,17	447,70	126,64	0,009	60,55
		Exponencial	10,16	0,03	35,86	126,65	0,010	0,27
		Gaussiano	10,13	0,05	100,18	126,65	0,010	0,48
	7	Esférico	0,00	9,63	363,93	125,37	0,009	100,00
		Exponencial	9,66	0,02	45,49	125,50	0,010	0,25
		Gaussiano	0,00	9,67	163,19	125,46	0,004	100,00
	8	Esférico	10,27	0,07	253,40	127,00	0,007	0,69
		Exponencial	10,31	0,03	1,04	127,00	0,007	0,28
		Gaussiano	10,30	0,04	71,48	127,00	0,007	0,39
6,5	1	Esférico	0,00	10,69	566,97	294,91	-0,012	100,00
		Exponencial	0,00	10,87	245,81	298,81	-0,008	100,00
		Gaussiano	1,64	9,09	278,71	295,42	-0,009	84,69
	3	Esférico	3,44	11,02	467,23	323,35	0,004	76,23
		Exponencial	0,00	14,65	156,33	324,43	0,003	100,00
		Gaussiano	4,67	9,85	230,47	323,43	0,001	67,84
	9	Esférico	0,37	12,98	624,65	305,14	-0,010	97,26
		Exponencial	0,00	13,03	237,86	310,33	-0,003	100,00
		Gaussiano	2,85	10,88	326,77	305,52	-0,002	79,23
3,2	8	Esférico	3,57	10,39	529,81	610,75	-0,008	74,40
		Exponencial	0,45	13,23	163,32	614,84	-0,010	96,68
		Gaussiano	5,88	8,11	282,13	612,48	-0,007	57,97
	9	Esférico	3,08	7,76	580,12	579,73	-0,010	71,57
		Exponencial	1,13	9,62	184,68	585,54	-0,011	89,51
		Gaussiano	4,63	6,75	319,52	580,95	-0,009	59,31
	5	Esférico	3,10	8,74	520,56	598,19	-0,008	73,80
		Exponencial	0,34	11,79	182,38	602,79	-0,007	97,22
		Gaussiano	5,14	7,14	293,77	598,79	-0,007	58,13
2,3	5	Esférico	3,83	8,48	553,84	824,40	-0,001	68,90
		Exponencial	1,42	10,65	177,64	829,48	0,000	88,21
		Gaussiano	5,76	6,49	293,77	827,09	-0,002	52,98
	1	Esférico	3,38	8,64	555,53	815,20	-0,002	71,86
		Exponencial	2,92	15,47	499,99	824,34	-0,003	84,13
		Gaussiano	5,14	6,86	286,98	816,82	-0,002	57,19
	6	Esférico	3,73	9,26	560,00	828,04	-0,001	71,29
		Exponencial	3,36	16,06	500,00	837,41	-0,002	82,69
		Gaussiano	5,59	6,98	275,97	829,63	-0,001	55,55
1,8	1	Esférico	2,82	8,87	557,69	1.020,01	-0,005	75,88
		Exponencial	2,44	15,35	500,00	1.029,91	-0,012	86,28
		Gaussiano	4,76	6,91	299,94	1.023,88	-0,006	59,23
	5	Esférico	3,12	9,52	571,35	1.035,59	-0,005	75,33
		Exponencial	2,59	16,50	499,99	1.044,22	-0,010	86,41
		Gaussiano	4,94	7,08	274,44	1.038,42	-0,005	58,89
	10	Esférico	3,15	9,67	578,59	1.037,72	-0,003	75,44
		Exponencial	2,60	16,63	499,99	1.046,28	-0,007	86,47
		Gaussiano	5,15	6,85	282,06	1.041,53	-0,003	57,06

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 21. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	1	Esférico	0,00	15,34	734,71	133,70	0,007	100,00
		Exponencial	0,00	14,78	186,22	134,75	-0,025	100,00
		Gaussiano	0,00	16,04	368,54	133,69	0,003	100,00
	7	Esférico	0,00	12,08	500,68	130,34	-0,003	100,00
		Exponencial	0,00	12,17	86,97	130,73	0,006	100,00
		Gaussiano	0,00	12,15	234,30	130,50	-0,002	100,00
	5	Esférico	13,38	0,18	1.624,38	133,24	0,011	1,35
		Exponencial	13,54	0,03	7,10	133,24	0,011	0,19
		Gaussiano	13,54	0,03	791,31	133,24	0,011	0,21
6,5	2	Esférico	0,00	15,39	621,93	311,74	-0,003	100,00
		Exponencial	0,00	16,74	326,68	315,65	-0,002	100,00
		Gaussiano	2,54	12,81	304,88	312,01	-0,018	83,43
	4	Esférico	0,00	12,59	620,02	300,34	-0,009	100,00
		Exponencial	0,00	14,82	334,90	307,89	-0,008	100,00
		Gaussiano	0,00	14,50	295,26	297,65	-0,035	100,00
	5	Esférico	0,00	11,46	599,47	296,85	-0,010	100,00
		Exponencial	0,00	14,13	351,55	303,97	-0,008	100,00
		Gaussiano	0,79	12,03	305,94	295,17	-0,001	93,85
3,2	1	Esférico	0,00	14,21	574,18	570,15	-0,017	100,00
		Exponencial	0,00	15,52	342,84	577,31	-0,012	100,00
		Gaussiano	2,49	11,63	280,79	571,81	-0,013	82,34
	9	Esférico	1,09	12,22	633,15	567,25	-0,009	91,82
		Exponencial	0,00	13,69	283,30	574,34	-0,007	100,00
		Gaussiano	3,48	10,54	341,21	570,06	-0,009	75,18
	7	Esférico	1,56	12,31	593,19	590,75	-0,005	88,73
		Exponencial	1,21	19,44	499,99	598,60	-0,002	94,15
		Gaussiano	4,25	10,93	342,58	591,35	-0,006	71,99
2,3	10	Esférico	0,48	13,64	583,97	776,92	-0,002	96,58
		Exponencial	0,00	14,73	321,81	781,45	-0,004	100,00
		Gaussiano	3,27	10,15	297,82	781,48	-0,004	75,62
	2	Esférico	0,30	14,36	607,04	772,44	0,000	97,98
		Exponencial	0,00	14,83	329,09	779,76	-0,002	100,00
		Gaussiano	3,41	10,76	327,12	779,53	-0,004	75,95
	5	Esférico	0,97	12,50	569,32	785,02	0,002	92,77
		Exponencial	0,63	20,37	499,99	796,16	0,005	97,01
		Gaussiano	3,78	10,16	321,60	789,96	0,000	72,89
1,8	7	Esférico	0,09	13,58	570,56	958,18	-0,003	99,35
		Exponencial	0,00	14,98	360,46	967,23	-0,005	100,00
		Gaussiano	3,00	10,34	308,30	969,38	-0,002	77,52
	13	Esférico	0,60	12,55	583,04	967,63	-0,002	95,44
		Exponencial	0,10	20,23	499,98	976,68	-0,004	99,50
		Gaussiano	3,09	9,40	293,17	975,03	-0,003	75,24
	8	Esférico	0,23	13,66	582,94	963,12	-0,003	98,36
		Exponencial	0,00	14,37	333,33	972,33	-0,005	100,00
		Gaussiano	3,03	9,99	298,94	973,11	-0,004	76,70

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 22. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	6	Esférico	0,00	1.706,87	530,44	244,10	I	100,00
		Exponencial	1.686,08	4,91	36,64	244,23	0,018	0,29
		Gaussiano	937,72	754,52	231,41	244,22	0,019	44,59
	5	Esférico	1.475,78	0,15	743,84	241,10	0,022	0,01
		Exponencial	1.472,57	3,35	24,11	241,10	0,022	0,23
		Gaussiano	1.475,88	0,05	809,21	241,10	0,022	0,00
	9	Esférico	2.407,51	26,90	351,42	252,61	-0,004	1,10
		Exponencial	2.427,01	7,40	33,29	252,61	-0,004	0,30
		Gaussiano	2.423,75	10,66	109,90	252,61	-0,004	0,44
6,5	6	Esférico	2.185,58	0,03	560,51	618,60	0,007	0,00
		Exponencial	2.182,23	3,37	4,19	618,60	0,007	0,15
		Gaussiano	2.185,25	0,36	299,57	618,60	0,007	0,02
	1	Esférico	1.162,07	1.363,81	500,00	624,27	0,000	53,99
		Exponencial	0,00	2.506,70	122,21	624,84	-0,005	100,00
		Gaussiano	268,51	2.255,87	188,37	624,06	-0,008	89,36
	8	Esférico	0,00	2.760,34	434,48	625,83	-0,011	100,00
		Exponencial	0,00	2.785,32	155,49	628,42	-0,008	100,00
		Gaussiano	0,00	2.808,73	208,42	625,65	-0,012	100,00
3,2	7	Esférico	1.366,47	978,86	526,48	1.237,27	-0,006	41,74
		Exponencial	995,35	1.321,33	146,27	1.239,41	-0,004	57,04
		Gaussiano	1.604,38	762,59	290,33	1.237,79	-0,005	32,22
	4	Esférico	1.016,89	1.829,44	500,00	1.245,68	-0,006	64,27
		Exponencial	690,64	2.164,64	178,86	1.249,45	-0,006	75,81
		Gaussiano	1.372,21	1.542,11	271,20	1.245,79	-0,006	52,91
	9	Esférico	1.255,58	1.080,47	629,78	1.228,78	-0,005	46,25
		Exponencial	1.041,69	1.277,84	206,25	1.231,59	-0,005	55,09
		Gaussiano	1.450,05	915,86	328,87	1.228,97	-0,005	38,71
2,3	8	Esférico	476,68	1.757,35	344,67	1.692,64	-0,007	78,66
		Exponencial	0,00	2.236,16	125,00	1.695,12	-0,006	100,00
		Gaussiano	845,20	1.385,00	177,46	1.693,33	-0,007	62,10
	10	Esférico	1.246,73	1.305,93	536,03	1.719,01	-0,003	51,16
		Exponencial	442,14	2.024,69	126,50	1.720,80	-0,002	82,08
		Gaussiano	1.505,94	1.024,06	266,26	1.719,89	-0,002	40,48
	4	Esférico	1.027,65	1.417,91	583,26	1.699,79	-0,003	57,98
		Exponencial	423,77	1.857,06	143,18	1.701,78	-0,003	81,42
		Gaussiano	1.291,61	1.055,39	270,19	1.700,72	-0,004	44,97
1,8	7	Esférico	1.043,99	1.413,68	535,16	2.186,96	-0,002	57,52
		Exponencial	459,58	1.908,64	148,65	2.188,56	-0,003	80,59
		Gaussiano	1.305,51	1.079,59	251,70	2.188,30	-0,001	45,26
	12	Esférico	1.309,55	1.291,25	574,52	2.208,91	-0,002	49,65
		Exponencial	728,29	1.758,95	146,24	2.210,29	-0,003	70,72
		Gaussiano	1.500,62	1.009,98	247,81	2.209,52	-0,003	40,23
	2	Esférico	1.176,70	1.305,24	592,68	2.192,42	-0,003	52,59
		Exponencial	784,69	1.574,10	166,60	2.195,65	-0,003	66,73
		Gaussiano	1.404,32	1.006,85	275,10	2.193,26	-0,003	41,76

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo “I” representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 23. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem sistemática em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	1	Esférico	0,0	21.360,7	725,37	300,32	-0,028	100,00
		Exponencial	0,0	21.972,1	183,77	302,78	-0,015	100,00
		Gaussiano	0,0	23.003,6	389,05	299,88	-0,046	100,00
	13	Esférico	0,0	13.559,2	532,70	291,89	-0,017	100,00
		Exponencial	13.698,2	40,2	82,68	292,41	-0,003	0,29
		Gaussiano	0,0	13.673,4	243,49	292,17	-0,019	100,00
	6	Esférico	0,0	27.372,8	429,75	308,24	-0,021	100,00
		Exponencial	27.631,1	61,4	8,24	308,54	-0,019	0,22
		Gaussiano	0,0	27.631,2	177,32	308,48	-0,021	100,00
6,5	10	Esférico	16.214,0	14.257,0	499,99	769,41	-0,025	46,79
		Exponencial	0,0	30.075,0	104,96	769,77	-0,010	100,00
		Gaussiano	8.508,6	21.902,2	194,22	769,24	-0,021	72,02
	6	Esférico	25.464,9	87,8	97,20	761,21	-0,012	0,34
		Exponencial	25.524,6	28,0	6,35	761,21	-0,012	0,11
		Gaussiano	25.530,0	22,7	27,98	761,21	-0,012	0,09
	4	Esférico	1.736,7	21.031,5	400,80	751,27	-0,006	92,37
		Exponencial	0,0	22.757,8	130,58	752,31	-0,003	100,00
		Gaussiano	10.312,6	12.487,8	231,99	751,69	-0,009	54,77
3,2	7	Esférico	24.451,7	7.274,9	547,55	1.548,88	-0,005	22,93
		Exponencial	21.140,5	10.275,7	127,56	1.549,73	-0,005	32,71
		Gaussiano	26.236,4	5.496,3	286,98	1.549,15	-0,004	17,32
	5	Esférico	24.189,9	8.552,6	586,37	1.551,00	-0,002	26,12
		Exponencial	20.033,2	12.482,2	151,10	1.551,99	-0,001	38,39
		Gaussiano	26.036,9	6.726,6	303,20	1.551,19	-0,001	20,53
	6	Esférico	14.730,6	8.690,8	474,45	1.510,25	-0,006	37,11
		Exponencial	6.360,2	16.955,6	110,02	1.511,36	-0,006	72,72
		Gaussiano	16.206,1	7.219,7	233,71	1.510,38	-0,006	30,82
2,3	4	Esférico	14.866,2	17.789,9	510,99	2.132,39	-0,007	54,48
		Exponencial	9.622,9	22.642,4	163,80	2.135,24	-0,003	70,18
		Gaussiano	18.553,5	14.762,2	278,61	2.132,86	-0,006	44,31
	6	Esférico	14.398,5	14.713,0	527,80	2.116,63	-0,011	50,54
		Exponencial	7.503,7	20.788,3	138,40	2.119,08	-0,007	73,48
		Gaussiano	17.068,4	11.823,3	258,91	2.116,90	-0,009	40,92
	2	Esférico	14.332,8	17.141,1	457,78	2.131,34	-0,009	54,46
		Exponencial	7.249,2	23.842,0	136,96	2.133,27	-0,006	76,68
		Gaussiano	17.864,9	13.960,4	243,54	2.131,70	-0,008	43,87
1,8	11	Esférico	16.166,5	14.464,9	500,00	2.736,70	-0,007	47,22
		Exponencial	5.574,3	24.278,2	116,78	2.736,59	-0,004	81,33
		Gaussiano	17.965,5	11.867,7	213,20	2.736,64	-0,004	39,78
	2	Esférico	15.539,7	13.122,7	447,67	2.729,34	-0,001	45,78
		Exponencial	8.695,1	19.838,7	129,81	2.730,01	-0,003	69,53
		Gaussiano	17.580,6	11.074,4	216,95	2.729,05	-0,003	38,65
	15	Esférico	14.916,9	13.748,1	500,00	2.708,78	-0,008	47,96
		Exponencial	9.392,6	19.183,8	153,21	2.710,83	-0,003	67,13
		Gaussiano	17.006,7	11.629,8	240,77	2.708,20	-0,005	40,61

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

APÊNDICE C – Resultados da análise de dependência espacial, referente ao Capítulo 1, das variáveis analisadas para o processo de amostragem em conglomerados, nas diferentes intensidades amostrais.

Tabela 24. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	11	Esférico	0,27	0,56	786,00	63,55	-0,035	67,42
		Exponencial	0,19	0,63	264,85	64,57	-0,024	77,05
		Gaussiano	0,35	0,50	389,19	63,57	-0,022	59,22
	5	Esférico	0,00	1,51	134,85	85,87	I	100,00
		Exponencial	1,51	0,00	27,80	86,06	0,028	0,23
		Gaussiano	0,00	1,51	59,34	85,94	0,038	100,00
	18	Esférico	0,29	0,43	956,23	61,83	-0,015	59,54
		Exponencial	0,14	0,53	200,10	61,86	-0,019	79,07
		Gaussiano	0,32	0,35	313,20	61,39	-0,020	52,15
5,4	9	Esférico	1,03	0,45	551,92	236,18	-0,004	30,16
		Exponencial	0,00	1,49	88,65	235,18	0,002	100,00
		Gaussiano	0,00	1,49	102,66	234,81	0,003	100,00
	12	Esférico	0,00	1,79	272,07	241,92	0,004	100,00
		Exponencial	0,00	1,84	117,80	245,23	0,007	100,00
		Gaussiano	0,00	1,82	128,52	239,93	0,001	100,00
	13	Esférico	0,29	1,02	265,25	224,64	0,001	77,78
		Exponencial	0,00	1,29	86,31	225,32	-0,011	100,00
		Gaussiano	0,59	0,72	152,78	224,68	0,001	54,79
3,2	2	Esférico	0,48	0,96	381,82	370,46	0,003	66,91
		Exponencial	0,00	1,45	117,77	372,09	-0,001	100,00
		Gaussiano	0,69	0,78	207,97	370,41	0,005	53,01
	16	Esférico	0,43	1,05	269,14	384,97	0,001	70,93
		Exponencial	0,00	1,49	90,33	385,20	-0,001	100,00
		Gaussiano	0,62	0,87	137,29	384,92	0,001	58,17
	27	Esférico	0,76	0,74	420,81	383,57	-0,003	49,63
		Exponencial	0,04	1,44	92,03	384,51	-0,003	97,34
		Gaussiano	0,89	0,61	199,75	384,06	0,000	40,68
2,3	19	Esférico	1,19	0,67	500,00	559,27	-0,001	36,04
		Exponencial	0,64	1,21	117,47	559,31	-0,001	65,49
		Gaussiano	1,23	0,62	204,21	558,72	0,000	33,50
	22	Esférico	1,07	0,56	430,53	540,45	-0,001	34,2
		Exponencial	0,40	1,22	89,67	540,55	-0,001	75,5
		Gaussiano	1,14	0,48	193,66	540,50	0,001	29,7
	25	Esférico	0,68	0,96	512,41	514,40	0,002	58,6
		Exponencial	0,29	1,33	153,71	515,64	0,002	82,3
		Gaussiano	0,83	0,80	239,94	514,41	0,003	48,9

Em que: IA é a intensidade amostral em hectares por unidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; AIC é o Critério de Informação de Akaike; BIC é o Critério de Informação Bayesiano; ER é o Erro Médio Reduzido; S_{er} é o Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo I representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 25. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável área basal (G) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	6	Esférico	2,78	1,86	700,00	110,31	I	40,14
		Exponencial	0,00	4,41	85,01	110,15	0,078	100,00
		Gaussiano	3,26	1,32	370,33	110,51	I	28,78
	12	Esférico	2,30	2,97	400,14	113,23	-0,002	56,35
		Exponencial	1,30	4,00	128,06	113,65	0,009	75,51
		Gaussiano	3,02	2,27	216,14	113,34	-0,007	42,86
	27	Esférico	5,02	7,19	316,43	134,14	-0,041	58,85
		Exponencial	0,00	12,18	80,93	134,55	-0,066	100,00
		Gaussiano	6,51	5,69	155,72	134,29	-0,007	46,65
5,4	4	Esférico	10,65	0,27	588,38	384,46	I	2,48
		Exponencial	0,00	10,90	37,37	384,15	-0,002	100,00
		Gaussiano	10,77	0,15	279,03	384,47	I	1,41
	6	Esférico	5,86	2,52	388,25	363,16	-0,008	30,06
		Exponencial	4,26	4,08	97,38	363,42	-0,011	48,94
		Gaussiano	6,28	2,10	179,50	363,33	-0,008	25,03
	19	Esférico	4,12	1,88	470,66	337,83	0,010	31,31
		Exponencial	3,33	2,68	154,00	337,73	0,008	44,54
		Gaussiano	4,25	1,74	203,22	337,72	0,007	29,00
3,2	15	Esférico	6,99	3,72	499,99	624,09	-0,006	34,71
		Exponencial	0,00	10,90	102,79	621,00	-0,005	100,00
		Gaussiano	8,44	2,19	381,23	623,78	-0,011	20,60
	20	Esférico	2,73	5,06	296,77	582,97	0,005	64,99
		Exponencial	0,00	7,68	88,25	582,80	-0,009	100,00
		Gaussiano	2,66	5,04	125,86	582,74	0,000	65,48
	23	Esférico	3,35	4,41	271,93	587,74	-0,001	56,81
		Exponencial	2,45	5,34	96,89	588,86	-0,001	68,57
		Gaussiano	4,76	3,02	157,00	587,98	-0,003	38,79
2,3	7	Esférico	3,55	4,79	230,37	808,62	0,000	57,43
		Exponencial	1,06	7,31	72,23	809,13	-0,003	87,29
		Gaussiano	4,97	3,38	128,55	808,83	-0,001	40,45
	22	Esférico	6,14	2,65	333,26	823,69	-0,004	30,18
		Exponencial	3,72	5,08	84,03	824,34	-0,003	57,74
		Gaussiano	6,68	2,14	173,84	823,78	-0,002	24,24
	24	Esférico	0,00	9,03	175,30	828,19	-0,005	100,00
		Exponencial	0,00	9,05	60,65	829,56	-0,005	100,00
		Gaussiano	0,00	9,03	83,08	828,31	-0,005	100,00

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo "I" representa valores infinitos (Inf: Infinito), indicando números muito grandes ou o limite matemático (R CORE TEAM, 2013).

Tabela 26. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura total (Ht) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	4	Esférico	0,18	14,89	586,53	126,23	-0,007	98,8
		Exponencial	0,00	14,14	273,90	127,15	-0,021	100,0
		Gaussiano	3,31	10,59	275,45	127,44	0,032	76,2
	15	Esférico	1,81	6,21	236,34	124,47	-0,027	77,5
		Exponencial	0,00	8,04	74,40	124,98	-0,045	100,0
		Gaussiano	3,49	4,58	129,77	124,60	-0,035	56,8
	18	Esférico	0,00	6,97	690,15	106,86	0,012	100,0
		Exponencial	0,00	8,26	455,41	108,63	0,006	100,0
		Gaussiano	1,06	6,65	388,06	106,09	-0,009	86,3
5,4	8	Esférico	5,48	6,69	399,58	382,98	0,005	55,0
		Exponencial	0,00	12,07	97,54	383,29	-0,002	100,0
		Gaussiano	5,52	6,58	161,36	382,67	0,003	54,4
	19	Esférico	0,00	9,37	544,57	328,28	-0,006	100,0
		Exponencial	0,00	10,48	338,83	331,41	-0,004	100,0
		Gaussiano	0,96	8,37	225,61	327,47	-0,008	89,8
	21	Esférico	0,00	9,64	365,76	351,06	0,000	100,00
		Exponencial	0,00	10,89	205,79	356,28	0,002	100,00
		Gaussiano	1,36	9,37	193,70	350,08	0,008	87,36
3,2	10	Esférico	1,26	11,69	586,40	580,17	-0,007	90,28
		Exponencial	0,88	18,67	499,99	587,13	-0,006	95,50
		Gaussiano	1,21	8,42	151,06	581,03	-0,005	87,40
	20	Esférico	1,64	11,38	552,11	593,25	-0,006	87,41
		Exponencial	0,967	20,51	499,99	601,06	-0,005	95,50
		Gaussiano	2,633	8,209	183,39	594,04	0,000	75,72
	30	Esférico	0,00	12,44	398,78	594,19	-0,007	100,00
		Exponencial	0,27	24,51	499,99	605,48	-0,003	98,91
		Gaussiano	1,66	10,47	177,33	594,20	-0,004	86,34
2,3	13	Esférico	2,90	8,75	543,93	806,38	-0,004	2,90
		Exponencial	2,49	15,73	499,99	815,53	-0,004	2,49
		Gaussiano	4,69	6,56	269,05	808,83	-0,003	4,69
	19	Esférico	2,84	10,42	617,38	811,12	-0,003	78,60
		Exponencial	2,25	16,82	499,99	816,96	-0,009	88,20
		Gaussiano	4,35	7,01	240,22	811,28	-0,005	61,70
	23	Esférico	2,52	10,22	563,16	808,76	-0,008	80,21
		Exponencial	2,26	17,33	499,99	820,73	-0,009	88,47
		Gaussiano	4,67	7,29	276,72	812,00	-0,007	60,95

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 27. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável altura média das árvores dominantes (Hd) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem casual simples em diferentes intensidades amostrais, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	3	Esférico	0,00	8,85	496,15	116,36	-0,038	100,00
		Exponencial	0,00	9,28	275,16	117,41	-0,021	100,00
		Gaussiano	0,00	8,12	186,23	111,85	-0,084	100,00
	18	Esférico	0,00	7,96	751,87	108,56	-0,030	100,00
		Exponencial	0,00	12,11	665,65	111,40	0,001	100,00
		Gaussiano	0,33	8,92	336,41	103,49	0,000	96,43
	19	Esférico	0,00	9,67	821,78	110,31	-0,008	100,00
		Exponencial	0,00	11,94	572,33	112,50	-0,015	100,00
		Gaussiano	1,36	10,24	500,00	109,54	-0,009	88,30
5,4	20	Esférico	0,00	9,61	619,92	320,74	-0,006	100,00
		Exponencial	0,00	12,13	438,77	326,67	-0,008	100,00
		Gaussiano	1,06	9,85	278,53	320,46	-0,002	90,25
	23	Esférico	0,00	9,61	537,03	330,62	-0,007	100,00
		Exponencial	0,00	12,36	340,28	342,69	-0,007	100,00
		Gaussiano	1,16	10,15	263,82	330,00	-0,010	89,78
	25	Esférico	0,00	14,95	540,33	358,27	-0,005	100,00
		Exponencial	0,00	14,81	263,31	365,32	-0,002	100,00
		Gaussiano	2,70	12,26	255,12	361,88	0,001	81,97
3,2	1	Esférico	0,00	16,17	570,39	587,70	-0,003	100,00
		Exponencial	0,00	17,10	342,84	592,59	-0,003	100,00
		Gaussiano	3,09	11,38	257,46	593,63	-0,004	78,66
	28	Esférico	0,00	11,79	496,41	566,92	-0,005	100,00
		Exponencial	0,00	15,03	344,59	578,33	-0,005	100,00
		Gaussiano	1,68	12,58	257,53	564,64	-0,005	88,21
	29	Esférico	0,00	14,14	533,94	580,97	0,010	100,00
		Exponencial	0,00	14,81	300,28	588,82	0,005	100,00
		Gaussiano	0,92	11,73	184,76	581,54	-0,012	92,73
2,3	3	Esférico	0,46	11,62	538,69	758,51	-0,002	96,16
		Exponencial	0,00	13,33	318,55	761,14	-0,003	100,00
		Gaussiano	2,58	9,09	263,17	759,56	-0,001	77,86
	6	Esférico	0,00	13,19	607,80	736,55	-0,004	100,0
		Exponencial	0,00	14,67	397,02	743,84	-0,005	100,0
		Gaussiano	2,14	9,58	256,61	743,16	-0,007	81,7
	21	Esférico	0,40	14,18	590,63	772,73	-0,005	97,3
		Exponencial	0,00	14,30	309,19	777,01	-0,005	100,0
		Gaussiano	3,17	9,75	281,69	778,11	-0,005	75,5

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.

Tabela 28. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável volume de madeira (V) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	ER	IDE(%)
16,4	2	Esférico	1.755,6	240,9	341,25	258,36	0,055	12,1
		Exponencial	1.346,2	646,9	60,51	258,37	N	32,5
		Gaussiano	1.689,1	305,0	121,84	258,34	N	15,3
	12	Esférico	0,0	8,5	681,93	110,46	-0,015	100,0
		Exponencial	0,0	10,9	517,19	111,98	-0,011	100,0
		Gaussiano	0,7	10,5	341,69	108,94	-0,020	93,8
	22	Esférico	748,6	1.279,7	500,00	254,55	-0,026	63,1
		Exponencial	406,7	1.616,9	156,66	255,22	-0,018	79,9
		Gaussiano	997,0	1.051,8	263,21	254,62	-0,019	51,3
5,4	4	Esférico	1.740,7	1.055,4	554,60	777,76	-0,010	37,7
		Exponencial	0,0	2.785,2	91,05	777,52	-0,009	100,0
		Gaussiano	1.971,5	811,1	271,66	778,20	-0,006	29,1
	7	Esférico	245,7	1.797,8	500,00	730,86	0,001	88,0
		Exponencial	0,0	1.887,6	184,50	730,88	0,004	100,0
		Gaussiano	182,9	1.611,9	150,80	730,98	0,001	89,8
	10	Esférico	1.595,4	747,6	618,79	765,45	0,009	31,91
		Exponencial	1.326,1	961,9	128,21	766,57	0,008	42,04
		Gaussiano	1.750,8	572,3	287,78	765,83	0,009	24,64
3,2	10	Esférico	859,2	986,2	533,81	1.227,62	-0,002	53,4
		Exponencial	337,0	1.436,0	132,74	1.228,03	0,001	81,0
		Gaussiano	1.008,7	783,1	233,92	1.227,69	0,002	43,7
	18	Esférico	377,1	1.480,1	339,65	1.226,98	0,006	79,69
		Exponencial	20,0	1.897,5	134,45	1.228,97	0,002	98,96
		Gaussiano	693,3	1.202,4	187,00	1.226,17	0,003	63,43
	27	Esférico	616,9	1.595,8	389,89	1.247,53	-0,001	72,12
		Exponencial	0,0	2.165,8	116,30	1.250,18	-0,002	100,00
		Gaussiano	870,6	1.325,8	185,12	1.247,63	-0,001	60,36
2,3	19	Esférico	1.011,4	1.427,3	500,00	1.713,76	-0,019	58,5
		Exponencial	0,0	2.309,5	114,05	1.712,28	-0,006	100,0
		Gaussiano	886,0	1.386,1	157,34	1.711,49	-0,004	61,0
	20	Esférico	646,6	1.267,3	437,51	1.671,09	-0,002	66,2
		Exponencial	237,9	1.670,1	145,64	1.674,05	-0,003	87,5
		Gaussiano	933,2	1.029,7	245,39	1.671,74	-0,003	52,5
	25	Esférico	688,2	1.648,4	500,00	1.689,51	0,001	70,5
		Exponencial	609,8	3.130,8	499,99	1.697,99	-0,008	83,7
		Gaussiano	650,7	1.464,7	160,95	1.687,96	0,001	69,2

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial. Nota: O símbolo N representa valores não numéricos (NaN: Not a Number), indicado indefinições matemáticas.

Tabela 29. Parâmetros, estatísticas de ajuste e índice de dependência espacial dos modelos de semivariância para a variável número de árvores por hectare (N) de eucalipto, em simulações realizadas pela amostragem em conglomerados em diferentes intensidades amostrais.

IA	Simulação	Modelo	C ₀	C	A	AIC	BIC	ER	S _{er}	IDE(%)
16,4	11	Esférico	7.538,7	9.113,0	705,1	304,55	309,26	-0,012	1,082	54,73
		Exponencial	5.445,1	11.282,4	218,1	305,24	309,95	-0,016	1,089	67,45
		Gaussiano	9.185,4	7.758,3	395,3	304,60	309,31	-0,012	1,084	45,79
	21	Esférico	30.126,7	25.974,6	500,0	336,22	340,93	-0,021	1,286	46,30
		Exponencial	0,0	55.580,8	102,6	335,84	340,56	-0,034	1,219	100,00
		Gaussiano	0,0	56.902,0	118,4	335,08	339,79	-0,018	1,328	100,00
	28	Esférico	11.431,8	8.252,4	500,0	311,50	316,21	0,108	1,958	41,92
		Exponencial	11.189,4	8.833,5	250,3	311,79	316,51	0,089	1,699	44,12
		Gaussiano	12.441,9	7.409,0	265,7	311,21	315,92	0,039	2,095	37,32
8	8	Esférico	14.604,6	10.818,9	330,9	938,61	947,71	-0,002	1,052	42,55
		Exponencial	7.529,7	17.801,2	84,4	939,47	948,58	0,000	1,055	70,27
		Gaussiano	17.338,8	8.045,9	169,9	938,98	948,09	-0,002	1,060	31,70
	25	Esférico	11.394,1	7.198,9	360,2	916,38	925,49	0,003	1,057	38,72
		Exponencial	8.920,6	9.496,0	90,7	917,60	926,71	0,004	1,061	51,56
		Gaussiano	12.937,6	5.678,7	183,6	916,59	925,70	0,002	1,059	30,50
	26	Esférico	22.807,1	9.958,8	527,4	956,71	965,82	-0,015	1,123	30,39
		Exponencial	0,0	32.336,1	74,0	956,39	965,50	-0,013	1,115	100,00
		Gaussiano	19.489,0	12.896,3	146,3	956,52	965,63	0,003	1,156	39,82
3,2	8	Esférico	9.273,6	16.414,1	321,4	1.553,38	1.564,53	-0,004	1,043	63,90
		Exponencial	0,0	25.380,6	90,5	1.554,59	1.565,74	-0,005	1,026	100,00
		Gaussiano	11.909,6	13.570,0	152,6	1.553,72	1.564,87	-0,004	1,049	53,26
	10	Esférico	14.852,0	5.928,3	345,3	1.537,95	1.549,10	-0,004	1,033	28,53
		Exponencial	11.274,5	9.547,6	94,9	1.538,80	1.549,95	-0,004	1,030	45,85
		Gaussiano	16.388,6	4.468,7	196,3	1.538,03	1.549,18	-0,003	1,032	21,43
	19	Esférico	10.897,1	9.067,4	410,1	1.525,48	1.536,63	-0,002	1,031	45,42
		Exponencial	8.409,6	11.531,5	125,3	1.528,37	1.539,52	-0,001	1,035	57,83
		Gaussiano	12.750,1	7.243,2	208,8	1.525,87	1.537,02	-0,002	1,033	36,23
2,3	19	Esférico	13.178,9	14.614,7	398,0	2.128,55	2.140,95	-0,003	1,040	52,58
		Exponencial	3.355,4	24.152,4	106,3	2.128,98	2.141,38	-0,005	1,032	87,80
		Gaussiano	14.726,4	12.686,1	175,7	2.128,09	2.140,49	-0,005	1,041	46,28
	22	Esférico	16.366,0	11.361,3	347,3	2.139,16	2.151,56	-0,003	1,031	41,0
		Exponencial	10.803,9	17.109,5	106,5	2.140,92	2.153,32	-0,002	1,028	61,3
		Gaussiano	19.072,0	8.946,6	197,1	2.139,18	2.151,57	-0,004	1,028	31,9
	26	Esférico	18.800,2	10.071,8	500,0	2.142,64	2.155,04	-0,002	1,042	34,9
		Exponencial	4.257,3	23.814,1	84,2	2.142,21	2.154,61	-0,003	1,025	84,8
		Gaussiano	18.486,5	9.651,7	174,0	2.141,97	2.154,37	-0,004	1,033	34,3

Em que: IA é a intensidade amostral; C₀ é o efeito pepita; C é a contribuição; A é o alcance; ER é o Erro Médio Reduzido; AIC é o Critério de Informação de Akaike; IDE(%) é o Índice de Dependência Espacial.