

AVALIAÇÃO DE INTERPOLADORES ESTATÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS COMO INSTRUMENTO DE ESTRATIFICAÇÃO DE POVOAMENTOS CLONAIIS DE *Eucalyptus sp*

Honório Kanegae Junior¹, Jose Roberto Scolforo², Jose Marcio de Mello²,
Antônio Donizette de Oliveira²

(recebido: 13 de dezembro de 2005; aceite: 25 de maio de 2006)

RESUMO: A estratificação do povoamento para fins de inventário florestal sucessivo, normalmente, é feita com base em informações cadastrais dos talhões. O tamanho da amostra, geralmente, é condicionada à variabilidade da floresta e à precisão desejada. Desta forma, o controle da variação através da estratificação eficiente tem forte influência sobre a precisão e tamanho da amostra. Assim, objetivou-se com este estudo: avaliar a estratificação propiciada por dois interpoladores espaciais, o estatístico representado pela krigagem e pelo determinístico representado pelo inverso do quadrado da distância; avaliá-los em relação a amostragem casual simples e a estratificação tradicional baseada em dados cadastrais, na redução da variância da média e erro de amostragem; e definir o número ótimo de estratos quando se utiliza os interpoladores espaciais. Para a geração dos estratos, estudou-se 4 diferentes variáveis dendrométricas: volume, área basal, altura dominante e índice de sítio em 2 diferentes idades: 2,5 anos e 3,5 anos. Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que a krigagem do volume por hectare obtido aos 3,5 anos de idade reduziu em 47% a variância média do povoamento e 32% o erro de amostragem do inventário, quando comparado com a amostragem casual simples. O interpolador IDW do volume aos 3,5 anos de idade, reduziu em 74% a variância média do povoamento e 48% o erro de amostragem do inventário. Apesar do método IDW apresentar uma elevada eficiência, ele não garante que a eficiência seja mantida caso uma nova amostragem fosse realizada sobre os mesmos projetos, ao contrário da krigagem geoestatística. Em povoamentos florestais que não apresentem dependência espacial, pode-se utilizar o método IDW com grande eficiência sobre a estratificação tradicional. O método de estratificação menos eficiente é aquele baseado no controle da idade, espécie e espaçamento (STR), contribuindo com 17% de redução da variabilidade média e 13% de redução no erro de amostragem. O número ótimo de estratos que minimiza a variância amostral é 6 para ambos os interpoladores.

Palavras-chave: Interpoladores, variabilidades espacial, geoestatística.

EVALUATION OF STATISTIC AND DETERMINISTIC INTERPOLATORS AS INSTRUMENT OF *Eucalyptus sp* CLONE STANDS STRATIFICATION

ABSTRACT: The stands stratification for successive forest inventory is usually based on stands cadastral information, such as the age, the species, the spacing, and the management regime, among others. The size of the sample is usually conditioned by the variability of the forest and by the required precision. Thus, the control of the variation through the efficient stratification has strong influence on sample precision and size. This study evaluated: the stratification propitiated by two spatial interpolators, the statistician one represented by the krigage and the deterministic one represented by the inverse of the square of the distance; evaluated the interpolators in relation to simple random sampling and the traditional stratification based on cadastral data, in the reduction of the variance of the average and sampling error; and defined the optimal number of strata when spatial interpolators are used. For the generation of the strata, it was studied 4 different dendrometric variables: volume, basal area, dominant height and site index in 2 different ages: 2.5 years and 3.5 years. It was concluded that the krigage of the volume per hectare obtained at 3.5 years of age reduced in 47% the stand average variance and in 32% the inventory sampling error, when compared to the simple random sampling. The volume interpolator IDW, at 3.5 years of age, reduced in 74% the stand average variance and in 48% the inventory sampling error. The less efficient stratificator was the one based on age, species and spacing. In spite of the IDW method having presented high efficiency, it doesn't guarantee that the efficiency be maintained, if a new sampling is accomplished in the same projects, contrarily to the geostatistic krigage. In forest stands that don't present spatial dependence, the IDW method can be used with great efficiency in the traditional stratification. The less efficient stratification method is the one based on the control of age, species and spacing (STR), contributing with 17% of the average variability reduction and with 13% of the sampling error reduction. The optimal number of strata that minimizes the variance is 6 for both interpolators.

Key words: Interpolators, spatial variability, Geostatistic.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o sistema de amostragem sucessiva mais utilizado é o Inventário Florestal Contínuo - IFC, o qual faz uso de parcelas permanentes, instaladas quando os estratos atingem 2 ou 3 anos.

Normalmente, estes estratos são estabelecidos para a floresta com base em informações cadastrais, tais como a idade, a espécie e o espaçamento (PÉLLICO NETTO & BRENA, 1997). Estas são então remeidas em períodos que variam de um a dois anos.

¹ Engenheiro Florestal, MsC – Votorantim Celulose e Papel S/A – Rodovia SP 255 – Km 41,2 – 14.210-000 – Luis Antônio, SP.

² Professor da Universidade Federal de Lavras/UFLA – Departamento de Ciências Florestais – Cx. P. 3037 – 37.200-000 – Lavras, MG – jscolforo@ufla.br; josémarcio@ufla.br; donizete@ufla.br

A definição do tamanho da amostra para o IFC é normalmente condicionada à variabilidade da floresta e à precisão desejada para o acompanhamento do crescimento. O controle ideal da variação é o fator determinante para se ter uma boa relação entre custo e representatividade. No final, esta relação é quem determina a precisão do inventário. Assim, a estratificação tem forte influência sobre a precisão e o tamanho da amostra (SCOLFORO & MELLO, 1997).

Uma técnica que merece estudos, como uma possível e eficiente alternativa para controlar a variação existente na floresta, é dos interpoladores espaciais, sobretudo aquele que considera a autocorrelação entre as unidades amostrais. Espera-se com o uso de técnicas desta natureza produzir mapas que controlem, de forma eficaz a variabilidade das florestas plantadas. Desta forma, pode-se estabelecer um método objetivo e eficiente para estratificação da floresta que propicie o aumento da precisão do inventário e, ou, a redução de seu custo.

Assim, objetivou-se com este estudo: avaliar a estratificação propiciada por dois interpoladores espaciais, o estatístico representado pela krigagem, e o determinístico, representado pelo inverso do quadrado da distância; avaliá-los em relação a amostragem casual simples e a estratificação tradicional baseada em dados cadastrais, na redução da variância da média e erro de amostragem; e definir o número ótimo de estratos quando se utiliza os interpoladores espaciais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

Os dados do presente estudo foram oriundos de florestas plantadas de *Eucalyptus sp.*, em 3 regiões do Estado de São Paulo, Luiz Antônio, Vale do Paraíba e Capão Bonito.

Na região de Luiz Antônio, de acordo com Golfari et al. (1978), a precipitação média anual é de 1.000 mm; temperatura média anual de 22 °C e altitude de 970 metros acima do nível do mar e os solos predominantes são os Neossolos Quartzarênicos (areias quartzosas).

Na região do Vale do Paraíba a precipitação média anual é de 1.200 mm; temperatura média anual de 20 °C e altitude de 950 m acima do nível do mar e os solos predominantes são os Argissolos (Podzólico Vermelho Amarelo).

A região de Capão Bonito é caracterizada por precipitação média anual de 1.600 mm; temperatura média anual de 19 °C e altitude de 655 metros acima do nível do mar e solo predominante é o Latossolo Vermelho Distrófico.

2.2 Obtenção e preparo de dados

Foram analisados 23 projetos florestais de 2,5 a 5,5 anos de idade, plantados entre 1997 e 1998, totalizando 12.511,48 hectares. Cada projeto contou com pelo menos 3 medições anuais, nas parcelas permanentes do Inventário Florestal Contínuo. A intensidade amostral é de aproximadamente de uma parcela a cada dez hectares, sendo que estas apresentam forma retangular e tamanho de 630 m².

Os volumes gerados, por parcela, foram obtidos a partir de equação de volume individual específica para cada projeto. As alturas dominantes utilizadas foram obtidas pela média aritmética das 6 árvores de maior diâmetro tomado a 1,30 metros de altura na árvore – DAP das parcelas. O índice de sítio foi obtido pelo ajuste do modelo de Chapman e Richards em sua forma polimórfica, para cada espécie tomando-se como idade índice 84 meses. A Área Basal foi obtida soma das áreas transversais de cada árvore, tomando-se para tal, os DAP's medidos na parcela.

2.3 Estudo variográfico

Existem vários modelos de ajuste aplicáveis a diferentes fenômenos com continuidade espacial. Estes modelos, chamados de modelos autorizados, devem fornecer soluções estáveis para o estimador linear – krigagem. Isto significa que a matriz de covariância utilizada na krigagem possa ser invertida. Esta condição limita o conjunto de funções usadas na modelagem do semivariograma experimental. Na Tabela 1 são apresentadas as expressões dos modelos utilizados neste estudo, conforme mencionados por Isaaks & Srivastava (1989).

2.4 Krigagem geoestatística

A estimativa de pontos não avaliados [$\hat{z}(x_0)$] foi efetuada a partir da krigagem pontual (VIEIRA, 2000) de acordo com a seguinte expressão:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

em que $\hat{z}(x_0)$ é a estimativa no ponto não amostrado (x_0) , λ_i é o peso que cada valor avaliado recebe, conforme a estrutura de dependência espacial do modelo e $z(x_i)$ é o valor do ponto amostrado. Os pesos λ_i foram obtidos a partir da resolução do sistema de equações de krigagem na forma matricial:

$$[\lambda] = [C]^{-1} \cdot [b]$$

em que $[C]^{-1}$ é o inverso da matriz de semivariância entre pontos amostrados e $[b]$ é o vetor de semivariâncias entre os pontos amostrados e o ponto a ser estimado.

2.5 Estratificadores testados

Na Tabela 2, são apresentados os códigos e as descrições dos estratificadores testados neste estudo. Dentre estes foram considerados o volume (V), a área basal (G), a altura média das árvores dominantes (Hd) e o índice de sítio (IS) associados a

interpoladores determinísticos, como o inverso da distância, e o interpolador estatístico krigagem. Também foi testada a estratificação tradicional baseada em informações cadastrais. Para que se pudesse avaliar a eficiência ou o grau de redução da variabilidade dos estratificadores supra citados, foi incluída no estudo a amostragem casual simples.

Como critério para seleção do melhor estratificador, efetuou-se o cálculo das variâncias da média (s_y^2) e do erro de amostragem ($E\%$) para cada medição. Calculada as variâncias e erros de cada medição, o melhor estratificador foi definido como sendo aquele que apresentou os menores valores.

Comparou-se separadamente os estratificadores krigagem versus ACS e STR e o IDW contra a ACS e STR. Esta separação na comparação se deu pelo fato de que o IDW é um interpolador viciado (soma dos pesos não é necessariamente igual a 1) e a krigagem é o único interpolador considerado exato (soma dos pesos é igual a 1), não sendo portanto comparáveis.

Tabela 1 – Modelos e expressões matemáticas utilizadas na construção dos semivariogramas experimentais.

Table 1 – Models and mathematical expressions used in the construction of the experimental semivariograms.

Modelo	Expressão matemática
Exponencial	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, h = 0 \\ \tau^2 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{ h }{\phi}\right) \right], h \neq 0 \end{cases}$
Esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, h = 0 \\ \tau^2 + \sigma^2 \left[1,5 \left(\frac{ h }{\phi}\right) - 0,5 \left(\frac{ h }{\phi}\right)^3 \right], 0 \leq h \leq \phi \\ C_0 + C_1, h > \phi \end{cases}$
Circular	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, h = 0 \\ \tau^2 + \sigma^2 \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \left(\phi \sqrt{1 - \left(\frac{ h }{\phi}\right)^2} + \arcsen\left(\frac{ h }{\phi}\right) \right) \right) \right], 0 \leq h \leq \phi \\ C_0 + C_1, h > \phi \end{cases}$

em que τ^2 é o efeito pepita, σ^2 é a variação estruturada, h são os "lags" de distância e ϕ é o alcance do modelo.

2.6 Obtenção dos estratos IDW e Krigagem

Para a obtenção dos estratos krigagem e IDW, inicialmente todas as parcelas que serviram de base para o estudo foram georeferenciadas digitalizando-se sua localização conforme os mapas de amostragem da empresa. Estes mapas foram georeferenciados e apresentam-se na escala 1:10.000 e possuem a localização de cada uma das parcelas através de coordenadas de acesso em metros.

Localizadas todas as parcelas em mapa digital, efetuou-se uma união entre a tabela de dados geográficos e a tabela de variáveis de inventário (Volume, Área Basal, Hd e IS) para cada projeto e medição, criando-se *layers* ou planos de informação geográficos de pontos amostrados com as respectivas variáveis de estudo. Utilizou-se para tal o módulo *Geoestatistical Analyst* do software *ArcGis 8.3* da ESRI, do qual obteve-se as interpolações pelos métodos IDW com potência 2 (Inverso do Quadrado das Distâncias) e krigagem, para cada medição e variável (volume, área basal, Hdom e IS).

De posse dos *layers* dos estratos, efetuou-se seu cruzamento com os *layers* de parcelas com as

respectivas medições, resultando no agrupamento das parcelas em cada medição nos diferentes estratos testados. Isto feito, procedeu-se o processamento dos dados amostrais de cada medição para a obtenção dos valores médios e variâncias dentro de cada estrato. De posse da área de cada estrato e de suas estatísticas, aplicou-se os estimadores de amostragem estratificada para a obtenção da média e desvios de cada povoamento.

Efetuando-se as interpolações pelos métodos IDW com potência 2 (Inverso do Quadrado das Distâncias) e krigagem, para cada medição e variável (volume, área basal, Hd e IS) foram definidos os *layers* de mapas vetoriais de 4 classes de estratos e a área em hectares de cada estrato florestal.

2.7 Determinação do número ótimo de estratos

Foram gerados 2, 4, 6, 8 e 10 estratos, por classe de área basal/ha e determinou-se a variância média resultante de cada um deles. Como critério de escolha, optou-se pela classe que promovesse significativa redução da variância com o menor número de classes ou estratos possível.

Tabela 2 – Estratificadores utilizados no estudo.

Table 2 – Stratifications used in the study.

Código	Estratificador
ACS	Amostragem Casual Simples (Testemunha)
STR	Estratificação Clássica (idade+espécie+espaçamento)
IdwV1	IDW do volume/ha na 1ª medição
IdwV2	IDW do volume/ha na 2ª medição
IdwG1	IDW da área basal/ha na 1ª medição
IdwG2	IDW da área basal/ha na 2ª medição
IdwHd1	IDW da altura média das árvores dominantes na 1ª medição
IdwHd2	IDW da altura média das árvores dominantes na 2ª medição
IdwIS1	IDW do índice de sítio na 1ª medição
IdwIS2	IDW do índice de sítio na 2ª medição
KoV1	Krigagem do volume/ha na 1ª medição
KoV2	Krigagem do volume/ha na 2ª medição
KoG1	Krigagem da área basal/ha na 1ª medição
KoG2	Krigagem da área basal/ha na 2ª medição
KoHd1	Krigagem da altura das árvores dominantes na 1ª medição
KoHd2	Krigagem da altura das árvores dominantes na 2ª medição
KoIS1	Krigagem do índice de sítio na 1ª medição
KoIS2	Krigagem do índice de sítio na 2ª medição

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação dos interpoladores como estratificadores

Na Figura 1 é ilustrado o mapa resultante da interpolação do volume/ha das parcelas amostrais do projeto C523, utilizando-se o método krigagem e IDW com 4 estratos ou classes.

Na Figura 2 ilustra-se o resultado da krigagem realizada no projeto C740 com as variáveis volume, área basal, altura dominante e índice de sítio, obtidas em 2ª medição ou 3,5 anos de idade, resultando em 4 classes de valores. Observa-se por esta figura, que a krigagem quando reduzida a apenas 4 classes de predição das variáveis pode ser utilizada como sendo os estratos utilizados nos inventários sucessivos.

A variância total, de cada projeto está resumida na Tabela 3 para a krigagem e na Tabela 4 para o inverso do quadrado da distância. Já as Tabelas 5 e 6 apresentam de forma resumida para os mesmos interpoladores, os erros totais de cada projeto e tratamentos. De maneira geral, observa-se que os estratificadores testados apresentaram reduções na variabilidade amostral e no erro de amostragem, quando comparadas com a amostragem casual simples, embora em diferentes intensidades.

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados uma síntese do somatório das estatísticas de cada tratamento, posição no rank e eficiência, ou seja, o

produto da divisão da estatística da ACS pela estatística dos demais tratamentos.

De acordo com estes resultados percebe-se uma grande eficiência dos estratos obtidos pelos interpoladores testados em controlar a variabilidade existente nos povoamentos, quando comparados com a ACS e com o método tradicional de estratificação. Pela Tabela 7, os melhores estratificadores do método IDW foram aqueles baseados em volume e área basal da 2ª medição (3,5 anos), seguido da área basal e volume da 1ª medição (2,5 anos). Esta eficiência chegou em 3,8 vezes na variância média, ou seja, o interpolador IDWV2 reduziu em 74% a variância média de populações não estratificadas.

Com relação ao erro de amostragem, o método IDWV2 proporcionou uma redução média de 48% em relação à ACS.

Observando-se os dados da Tabela 8, os melhores estratificadores, baseados em krigagem geoestatística, foram aqueles baseados em volume da 2ª medição (3,5 anos) e área basal da 1ª medição (2,5 anos) seguido pela área basal da 2ª medição e volume da 1ª medição. A eficiência do melhor estratificador chegou a 1,9 vezes na variância média, ou seja, o método foi capaz de reduzir em 47% a variância média em relação a ACS. Com relação ao erro de amostragem, observou-se que o melhor método foi capaz de reduzir em 32% o erro de amostragem.

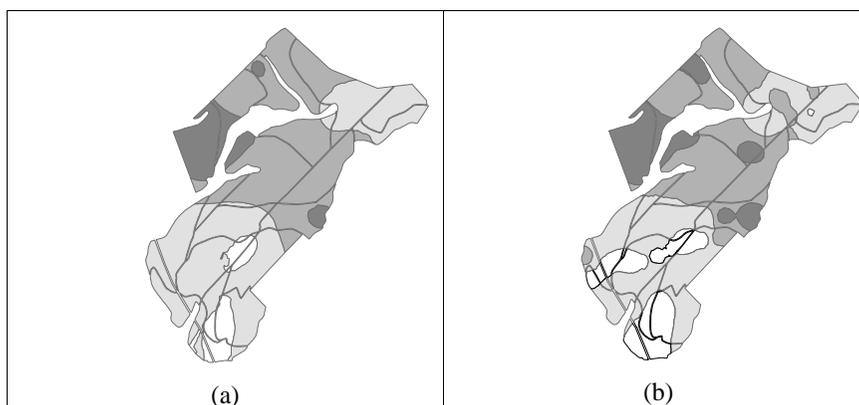


Figura 1 – Ilustração da interpolação krigagem (a) e IDW (b) utilizando-se o volume/ha obtido na 2ª medição do projeto C523.

Figure 1 – Illustration of krigagem (a) and IDW (b) interpolations using volume/ha obtained in the second measurement of the project C523.

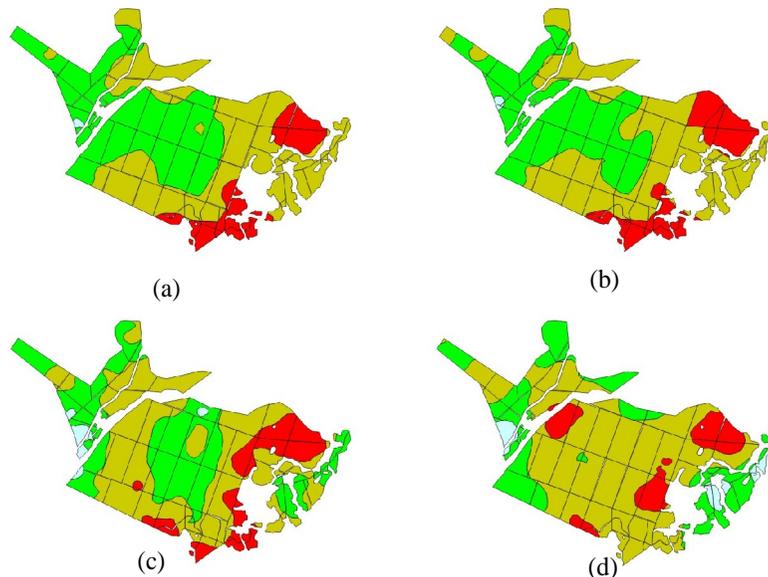


Figura 2 – Ilustração da krigagem utilizando-se o volume (a), a área basal (b), a altura dominante (c) e o índice de sítio (d) obtida na 2ª medição do projeto C740.

Figure 2 – Illustration of the krigagem using volume (a), basal area (b), the dominant height (c) and site index (d) obtained in the second measurement of project C740.

Observa-se ainda que o método de estratificação menos eficiente é aquele baseado no controle da idade, espécie e espaçamento (STR), contribuindo com 17% de redução da variabilidade média e 13% de redução no erro de amostragem. Este resultado mostra que a forma tradicional de estratificação não foi eficiente, ficando claro a necessidade de se avaliar outros métodos que se utilizam da relação entre as unidades amostrais, tais como os interpoladores espaciais.

Estes resultados mostram ainda que em povoamentos ou estratos que não apresentam dependência espacial, pode-se utilizar o método IDW com grande eficiência sobre a estratificação tradicional. Na Figura 3 apresenta-se a comparação dos erros de amostragem resultantes de projetos cujo grau de dependência espacial foi baixo e conseqüentemente o interpolador estatístico KoV2 não foi capaz de controlar a variabilidade total da amostragem (ACS) comparando-os com a estratificação pelo método IdwV2, evidenciando a eficiência deste método quando o grau de dependência espacial é pequeno ou nulo.

Observa-se ainda que o método IDW apresenta um elevado valor de eficiência por ele ser

determinístico, ou seja, ele é eficiente apenas para a amostragem em estudo, não garantindo que a eficiência seja mantida caso houvessem inúmeras amostragens sobre o mesmo projeto.

3.2 Definição do número de estratos a serem utilizados

No processo de interpolação pode-se definir qual o número de classes resultantes da variável a ser interpolada. Quanto maior for o número de classes maior será o detalhamento visual da interpolação resultante. Entretanto, maior será a dificuldade de operacionalização destes estratos, ou seja, maior a dificuldade em lançar parcelas amostrais dentro dos mesmos. Na Figura 4 ilustra-se a interpolação IDW obtida com 2 com 10 estratos de área basal/ha.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados da soma da variância amostral de todas as medições dos projetos analisados para 5 diferentes quantidades de estratos, pelo método da krigagem e IDW. O valor de 0 estratos (0C) corresponde à variância amostral da ACS. Somando-se as variâncias de cada estrato obteve-se o comportamento da variância total na medida que se aumenta o número de estratos.

Tabela 3 – Variação total dos diferentes tratamentos referentes a todas as medições dos projetos avaliados pelo interpolador krigagem.

Table 3 – Total variation of different treatments referring to all measurements of the appraised projects for krigage interpolator.

Projeto	Area	n	Med	ACS	STR	KoV1	KoV2	KoG1	KoG2	KoIS1	KoIS2	KoHd1	KoHd2
C131	638,36	67	5	37,9	23,2	16,9	14,3	19,5	16,9	26,9	33,2	18,6	20,7
C141	1509,79	149	4	17,9	12,9	12,9	8,6	12,1	9,8	14,6	14,2	14,0	12,8
C155	488,78	59	4	34,7	30,6	28,3	25,1	25,8	21,3	29,1	24,7	31,2	19,3
C523	635,40	63	4	53,2	35,9	25,2	22,6	28,3	26,1	31,4	28,7	30,7	28,6
C534	251,59	25	4	48,0	33,8	28,2	15,0	11,6	17,0	45,8	39,1	40,6	27,0
C537	231,52	24	3	6,5	6,9	1,9	2,2	2,6	6,1	6,5	6,7	4,0	6,9
C541	513,41	55	4	46,8	37,6	39,4	36,3	41,6	29,5	36,3	44,1	42,6	40,5
C731	544,38	52	3	12,9	8,0	4,9	4,5	6,9	5,5	11,5	8,5	8,9	8,2
C740	1629,30	165	3	9,2	6,0	5,0	4,9	4,9	4,8	7,7	7,6	5,3	4,3
C741	288,41	29	3	20,8	18,8	20,5	20,9	21,1	21,4	21,3	20,9	20,4	19,2
C872	307,62	30	3	26,4	12,7	9,6	5,8	4,5	3,5	9,7	10,3	8,3	9,5
C876	561,03	52	4	53,3	21,0	31,1	24,3	31,3	26,4	46,4	41,1	24,0	22,0
F134	341,90	34	3	51,0	51,0	36,3	31,7	33,7	11,1	41,3	39,0	48,1	36,0
F138	194,47	18	3	109,3	109,3	55,9	52,0	55,6	94,9	85,1	109,3	82,7	109,3
F156	236,23	23	3	73,5	73,5	55,9	33,5	58,1	39,7	52,6	46,7	53,2	59,5
F549	992,14	111	3	16,8	10,5	15,6	9,0	10,7	9,0	15,9	14,7	16,2	14,5
F551	673,87	64	4	49,2	43,9	50,7	22,3	36,0	27,6	35,6	31,4	35,8	16,6
F640	432,54	39	3	17,9	13,3	11,7	7,5	11,6	8,8	17,9	18,2	14,7	15,2
F662	309,95	32	3	74,2	52,7	31,2	9,3	24,3	9,1	22,0	26,1	52,5	29,1
F669	554,26	78	3	30,7	27,8	20,8	10,8	20,6	11,2	28,6	24,0	24,2	16,1
F750	761,38	87	3	29,4	25,7	10,3	5,4	10,7	5,9	15,9	16,8	17,4	17,2
F839	190,18	25	3	34,3	34,0	34,7	34,5	34,5	34,1	35,5	31,1	33,6	34,0
F852	224,98	20	3	105,3	109,4	114,6	105,3	96,2	105,3	111,2	105,3	88,7	96,0
Total	12511,48	1301		959,2	798,4	661,6	505,5	602,1	544,9	748,8	741,6	715,7	662,4
Rank				10	9	4	1	3	2	8	7	6	5
Eficiência				1,0	1,2	1,4	1,9	1,6	1,8	1,3	1,3	1,3	1,4

Tabela 4 – Variação total dos diferentes tratamentos referentes a todas as medições dos projetos avaliados pelo interpolador IDW.

Table 4 – Total variation of different treatments referring to all measurements of the appraised projects for the interpolator IDW.

Projeto	Area	n	Med	ACS	STR	IdwV1	IdwV2	IdwG1	IdwG2	IdwIS1	IdwIS2	IdwHD1	IdwHD2
C131	638,36	67	5	37,9	23,2	13,8	11,3	15,6	10,8	26,2	29,4	17,4	21,3
C141	1509,79	149	4	17,9	12,9	9,0	5,1	8,7	4,9	14,4	10,7	12,7	11,2
C155	488,78	59	4	34,7	30,6	21,8	16,2	19,7	15,6	23,3	18,8	25,4	16,6
C523	635,40	63	4	53,2	35,9	21,9	13,4	18,4	13,4	25,8	25,7	27,8	22,2
C534	251,59	25	4	48,0	33,8	29,0	11,9	13,2	16,9	41,4	28,9	38,8	25,1
C537	231,52	24	3	6,5	6,9	1,8	1,5	1,8	1,9	5,7	5,8	3,4	4,8
C541	513,41	55	4	46,8	37,6	33,8	26,9	35,1	33,8	38,3	39,6	39,1	30,8
C731	544,38	52	3	12,9	8,0	5,6	3,9	5,1	4,1	11,6	10,0	9,7	9,0
C740	1629,30	165	3	9,2	6,0	3,3	3,0	3,5	2,8	7,7	7,3	4,2	4,4
C741	288,41	29	3	20,8	18,8	11,2	7,5	9,1	8,4	16,6	16,7	17,8	18,6
C872	307,62	30	3	26,4	12,7	4,4	4,4	4,0	3,4	9,5	10,0	10,6	10,1
C876	561,03	52	4	53,3	21,0	21,7	18,6	22,9	18,4	45,6	36,4	24,2	20,7
F134	341,90	34	3	51,0	51,0	12,8	9,1	9,9	10,7	52,7	38,6	38,2	32,7
F138	194,47	18	3	109,3	109,3	37,7	7,4	13,7	6,5	56,1	32,0	59,6	60,1
F156	236,23	23	3	73,5	73,5	9,4	9,7	10,1	11,7	58,2	36,5	51,1	42,1
F549	992,14	111	3	16,8	10,5	8,6	6,6	7,3	6,5	13,3	13,0	14,4	10,1
F551	673,87	64	4	49,2	43,9	34,6	19,8	32,4	17,2	34,0	28,0	37,3	28,8
F640	432,54	39	3	17,9	13,3	11,7	6,0	11,0	6,1	19,8	18,5	14,2	15,9
F662	309,95	32	3	74,2	52,7	31,6	9,6	22,9	8,7	22,2	26,6	56,6	28,2
F669	554,26	78	3	30,7	27,8	23,0	13,7	21,9	9,4	24,5	22,4	24,1	14,6
F750	761,38	87	3	29,4	25,7	7,5	6,1	8,4	6,4	17,6	15,5	17,1	15,1
F839	190,18	25	3	34,3	34,0	16,4	17,6	19,0	12,2	29,7	38,8	28,4	36,7
F852	224,98	20	3	105,3	109,4	25,7	19,9	36,3	23,9	90,9	83,8	86,9	83,2
Total	12511,48	1301		959,2	798,4	396,3	249,2	349,9	253,7	685,2	593,1	659,0	562,1
Rank				10	9	4	1	3	2	8	6	7	5
Eficiência				1,0	1,2	2,4	3,8	2,7	3,8	1,4	1,6	1,5	1,7

Tabela 5 – Erro total dos diferentes tratamentos referentes a todas as medições dos projetos avaliados pelo interpolador krigagem.*Table 5* – Total error of different treatments referring to all measurements of the appraised projects for krigagem interpolator.

Projeto	Area	n	Med	ACS	STR	KoV1	KoV2	KoG1	KoG2	KoSI1	KoSI2	KoHd1	KoHd2
C131	638,36	67	5	22,6	16,8	13,3	13,1	14,8	14,7	19,0	20,9	14,4	16,8
C141	1509,79	149	4	11,2	9,4	8,9	7,8	8,6	8,4	10,2	10,2	9,4	9,5
C155	488,78	59	4	23,0	21,6	20,0	19,6	19,1	17,9	21,0	19,6	21,0	17,8
C523	635,40	63	4	36,3	28,5	21,3	20,5	22,6	24,5	25,6	23,8	24,5	23,6
C534	251,59	25	4	37,4	30,7	22,9	21,2	16,6	22,8	33,1	31,8	32,2	27,2
C537	231,52	24	3	7,6	7,8	3,3	4,2	4,1	7,1	7,6	7,9	5,9	7,8
C541	513,41	55	4	27,9	24,9	22,5	25,2	23,1	23,2	23,4	27,3	25,2	25,9
C731	544,38	52	3	13,5	10,5	7,7	8,1	9,4	9,3	12,6	11,1	10,4	10,6
C740	1629,30	165	3	11,9	9,4	8,1	8,3	8,3	8,4	11,2	11,1	8,4	8,2
C741	288,41	29	3	18,7	17,5	18,1	18,4	18,5	18,9	18,9	18,8	18,2	18,3
C872	307,62	30	3	19,9	13,1	11,6	9,5	7,7	6,8	12,2	12,5	11,0	11,9
C876	561,03	52	4	29,7	19,1	20,7	19,3	20,8	18,9	27,4	26,4	19,1	18,6
F134	341,90	34	3	16,5	16,5	13,9	13,1	13,9	8,4	15,0	14,2	16,0	13,5
F138	194,47	18	3	37,2	37,2	23,0	23,9	23,4	33,6	30,8	37,2	28,6	37,2
F156	236,23	23	3	26,9	26,9	21,8	15,9	23,0	19,2	21,2	19,8	21,4	23,8
F549	992,14	111	3	11,9	9,4	11,2	9,0	8,8	8,7	11,3	11,1	11,3	11,0
F551	673,87	64	4	19,3	18,7	19,6	13,4	16,8	15,7	16,0	16,0	15,8	11,9
F640	432,54	39	3	16,6	13,0	9,8	11,0	10,5	11,6	16,4	16,7	12,9	14,6
F662	309,95	32	3	26,0	22,7	13,7	10,4	12,6	10,0	13,5	16,2	19,8	15,2
F669	554,26	78	3	17,4	16,6	13,6	10,6	13,7	10,9	16,6	15,7	14,7	12,2
F750	761,38	87	3	13,2	12,2	7,3	5,8	7,5	6,1	9,6	9,7	9,9	9,7
F839	190,18	25	3	19,8	19,5	19,3	19,8	19,1	19,2	20,0	18,7	18,7	18,7
F852	224,98	20	3	27,7	27,9	29,0	27,7	25,6	27,7	28,4	27,7	24,9	26,4
Total	12511,48	1301		492,2	429,6	360,8	335,9	348,5	352,2	420,9	424,4	393,7	390,3
Rank				10	9	4	1	2	3	7	8	6	5
Eficiência				1,0	1,1	1,4	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,3	1,3

Tabela 6 – Erro total dos diferentes tratamentos referentes a todas as medições dos projetos avaliados pelo interpolador IDW.*Table 6 – Total error of the different treatments referring to all the measurements of the appraised projects for the interpolator IDW.*

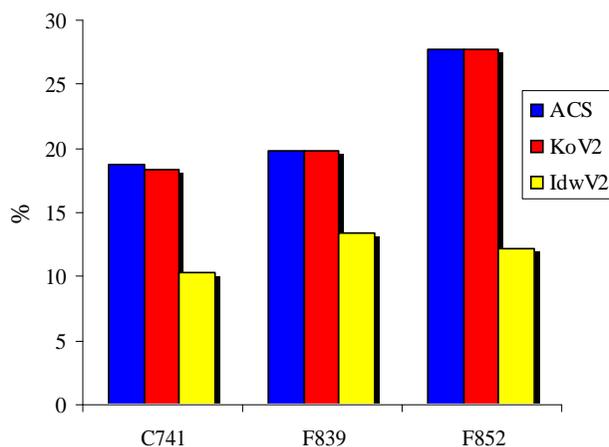
Projeto	Area	n	Med	ACS	STR	Idw V1	Idw V2	Idw G1	Idw G2	Idw S1	Idw S2	Idw Hd1	Idw Hd2
C131	638,36	67	5	22,6	16,8	11,5	12,2	13,1	11,7	19,1	20,3	14,1	16,5
C141	1509,79	149	4	11,2	9,4	7,3	6,2	7,1	6,0	10,2	9,0	8,8	8,9
C155	488,78	59	4	23,0	21,6	16,5	16,6	16,3	15,6	18,8	16,8	18,5	16,2
C523	635,40	63	4	36,3	28,5	19,6	16,7	18,3	17,2	24,9	24,1	23,6	21,4
C534	251,59	25	4	37,4	30,7	22,9	19,2	16,6	23,0	30,3	25,9	29,7	26,1
C537	231,52	24	3	7,6	7,8	3,2	3,6	3,3	4,3	7,0	7,4	5,4	6,5
C541	513,41	55	4	27,9	24,9	20,1	22,2	20,2	23,5	24,3	26,4	23,1	24,2
C731	544,38	52	3	13,5	10,5	8,2	7,7	7,9	8,3	12,7	11,7	10,9	11,1
C740	1629,30	165	3	11,9	9,4	6,0	6,4	6,4	6,5	11,2	11,0	7,3	8,2
C741	288,41	29	3	18,7	17,5	10,7	10,3	9,7	11,1	16,1	17,1	16,6	18,0
C872	307,62	30	3	19,9	13,1	7,2	7,6	7,1	6,8	12,0	12,2	12,1	12,0
C876	561,03	52	4	29,7	19,1	16,6	16,7	17,3	16,4	26,7	23,9	19,0	17,8
F134	341,90	34	3	16,5	16,5	7,4	7,1	7,0	8,2	16,8	14,2	13,8	12,9
F138	194,47	18	3	37,2	37,2	14,7	9,7	10,1	10,3	21,2	23,0	23,1	25,1
F156	236,23	23	3	26,9	26,9	8,7	8,9	8,7	9,5	22,2	17,7	20,6	19,3
F549	992,14	111	3	11,9	9,4	7,4	8,0	6,8	7,8	10,3	10,6	10,5	9,1
F551	673,87	64	4	19,3	18,7	14,8	12,9	14,6	11,5	16,6	15,8	16,2	15,3
F640	432,54	39	3	16,6	13,0	9,8	9,9	9,8	10,6	17,3	17,1	12,7	14,5
F662	309,95	32	3	26,0	22,7	13,7	9,9	12,3	9,8	13,8	16,1	19,8	15,2
F669	554,26	78	3	17,4	16,6	14,6	13,5	14,3	10,3	15,5	15,6	14,8	11,7
F750	761,38	87	3	13,2	12,2	5,9	5,9	6,5	6,4	10,0	9,4	9,6	9,1
F839	190,18	25	3	19,8	19,5	11,9	13,4	12,6	11,5	18,7	21,0	17,1	19,7
F852	224,98	20	3	27,7	27,9	12,3	12,2	12,5	13,9	24,8	24,8	23,8	24,0
Total	12511,48	1301		492,2	429,6	271,0	256,9	258,4	260,2	400,6	390,9	371,2	362,9
Rank				10	9	4	1	2	3	8	7	6	5
Eficiência				1,0	1,1	1,8	1,9	1,9	1,9	1,2	1,3	1,3	1,4

Tabela 7 – Somatório das estatísticas, ranqueamento e eficiência dos tratamentos testados para o interpolador IDW.**Table 7** – Sum of the statistics, ranking and efficiency of the tested treatments for the IDW interpolator.

Método	Variância média			Erro de amostragem (%)		
	Total	Rank	Eficiência	Total	Rank	Eficiência
IdwV2	249,2	1	3,8	256,9	1	1,9
IdwG2	253,7	2	3,8	260,2	3	1,9
IdwG1	349,9	3	2,7	258,4	2	1,9
IdwV1	396,3	4	2,4	271,0	4	1,8
IdwHd2	562,1	5	1,7	362,9	5	1,4
IdwIS2	593,1	6	1,6	390,9	7	1,3
IdwHd1	659,0	7	1,5	371,2	6	1,3
IdwIS1	685,2	8	1,4	400,6	8	1,2
STR	798,4	9	1,2	429,6	9	1,1
ACS	959,2	10	1,0	492,2	10	1,0

Tabela 8 – Somatório das estatísticas, ranqueamento e eficiência dos tratamentos testados para o interpolador krigagem.**Table 8** – Sum of the statistics, ranking and efficiency of the tested treatments for the krigagem interpolator.

Método	Variância média			Erro de amostragem (%)		
	Total	Rank	Eficiência	Total	Rank	Eficiência
KoV2	505,5	1	1,9	335,9	1	1,5
KoG2	544,9	2	1,8	352,2	3	1,4
KoG1	602,1	3	1,6	348,5	2	1,4
KoV1	661,6	4	1,4	360,8	4	1,4
KoHd2	662,4	5	1,4	390,3	5	1,3
KoHd1	715,7	6	1,3	393,7	6	1,3
KoIS2	741,6	7	1,3	424,4	8	1,2
KoIS1	748,8	8	1,3	420,9	7	1,2
STR	798,4	9	1,2	429,6	9	1,1
ACS	959,2	10	1,0	492,2	10	1,0

**Figura 3** – Comparativo dos erros de amostragem entre os métodos KoV2 e IdwV2 com relação a ACS de 3 projetos cujo grau de dependência espacial foi baixo pela análise semivariográfica do método KoV2.**Figure 3** – Comparison of sampling errors among the KoV2 and IdwV2 methods in relation to ACS of 3 projects whose degree of space dependence was low according to the semivariographic analysis of the method KoV2.

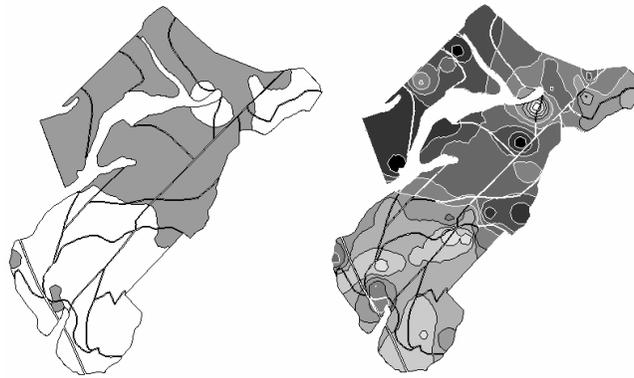


Figura 4 – Resultados da interpolação IDW com 2 e 10 estratos de área basal/ha do projeto C523.

Figure 4 – Results of the IDW interpolation with 2 and 10 strata of basal area /ha of project C523.

Tabela 9 – Variâncias amostrais totais em função do número de estratos, utilizando-se o método krigagem com volume/ha da 2ª medição.

Table 9 – Total sampling variances in function of the number of strata, using krigagem method with volume/ha of the second measurement.

Projeto	Área (ha)	Med	Número de estratos					
			0C	2C	4C	6C	8C	10C
C131	638,36	5	2509,7	1503,8	987,5	803,2	777,5	622,1
C141	1509,79	4	2630,8	1687,1	1273,3	981,8	945,2	930,4
C155	488,78	4	2018,9	1381,8	1303,3	1133,3	1058,0	983,7
C523	635,40	4	3375,0	1700,5	1483,8	1392,0	871,7	1063,7
C534	251,59	4	1206,9	819,5	412,1	411,9	208,6	298,3
C537	231,52	3	157,8	88,8	55,8	65,2	73,0	58,5
C541	513,41	4	2593,2	2393,1	2491,2	2015,6	1579,0	2249,6
C731	544,38	3	673,1	342,3	255,2	147,0	156,6	168,2
C740	1629,30	3	1540,5	1049,9	816,6	709,3	639,5	593,7
C741	288,41	3	591,0	593,0	599,0	612,9	607,8	610,7
C872	307,62	3	797,7	268,0	182,2	84,4	74,7	73,5
C876	561,03	4	2762,8	1771,1	1420,8	967,1	1087,7	993,6
F134	341,90	3	1744,0	736,0	363,6	203,4	132,8	122,2
F138	194,47	3	1428,2	1002,8	702,9	1034,2	673,1	496,9
F156	236,23	3	1255,9	727,5	604,5	535,2	277,3	374,2
F549	992,14	3	1881,5	978,7	996,9	621,3	613,6	560,2
F551	673,87	4	3994,3	2018,7	1863,5	1220,9	1337,8	1298,9
F640	432,54	3	702,8	391,4	304,6	240,2	157,1	151,1
F662	309,95	3	2430,9	890,9	345,4	182,1	201,0	165,8
F669	554,26	3	2419,2	1537,0	1464,8	1178,2	1049,5	1119,9
F750	761,38	3	2457,3	968,5	463,4	439,7	357,5	283,0
F839	190,18	3	865,6	1001,7	887,5	879,4	844,5	909,6
F852	224,98	3	2118,4	2119,3	2118,4	2234,4	2119,3	2190,1
Total	12511,48		42155,5	25971,3	21396,3	18092,6	15842,9	16317,5
Eficiência			1,0	1,6	2,0	2,3	2,7	2,6

Tabela 10 – Variâncias amostrais totais em função do número de estratos utilizando-se o método IDW com área basal/ha da 2ª medição.

Table 10 – Total sampling variances in function of the number of strata, using IDH method with volume/ha of the second measurement.

Projeto	Área (ha)	Med	Número de estratos					
			0C	2C	4C	6C	8C	10C
C131	638,36	5	2509,7	1546,2	721,5	731,5	732,5	687,1
C141	1509,79	4	2630,8	1435,2	743,7	680,9	451,2	392,6
C155	488,78	4	2018,9	1275,5	1008,4	597,6	923,0	794,1
C523	635,40	4	3375,0	1582,8	883,0	732,5	733,4	554,1
C534	251,59	4	1206,9	730,7	451,2	394,2	275,6	267,7
C537	231,52	3	157,8	78,5	50,2	37,1	32,5	35,9
C541	513,41	4	2593,2	2073,1	2052,4	1398,1	1200,6	1538,8
C731	544,38	3	673,1	319,3	230,4	190,1	185,1	205,5
C740	1629,30	3	1540,5	923,4	479,5	493,7	455,3	363,9
C741	288,41	3	591,0	296,1	244,9	150,9	138,7	151,6
C872	307,62	3	797,7	282,3	109,7	102,2	66,4	81,0
C876	561,03	4	2762,8	1593,9	1028,5	710,5	882,7	830,6
F134	341,90	3	1744,0	730,7	391,8	261,5	182,4	175,5
F138	194,47	3	1428,2	320,8	108,6	142,3	108,6	118,0
F156	236,23	3	1255,9	410,5	215,1	189,5	263,8	161,6
F549	992,14	3	1881,5	919,9	789,2	485,9	453,9	360,2
F551	673,87	4	3994,3	1939,6	1419,2	1263,4	1018,7	1074,5
F640	432,54	3	702,8	380,5	245,0	249,6	199,6	109,3
F662	309,95	3	2430,9	890,5	337,8	309,6	176,7	181,7
F669	554,26	3	2419,2	1261,8	829,5	668,9	550,8	449,9
F750	761,38	3	2457,3	1067,9	544,3	390,1	367,9	323,0
F839	190,18	3	865,6	668,6	323,8	400,2	354,3	261,6
F852	224,98	3	2118,4	801,3	501,5	411,4	244,2	337,8
Total	12511,48		42155,5	21529,1	13709,1	10991,7	9998,1	9456,0
Eficiência			1,0	2,0	3,1	3,8	4,2	4,5

Observa-se que de maneira geral, quando se aumenta o número de estratos a variância amostral tende a diminuir, como era de se esperar. Entretanto, em certos projetos, como o C523 e o C541, o aumento de 8 para 10 estratos provocou um aumento na variância. Isto pode ser explicado pelo fato de que ao se aumentar o número de estratos, reduz-se o número de parcelas para o cálculo da variância interna de cada estrato o que acaba elevando a variância resultante.

Percebe-se que, na medida que se aumenta o número de estratos, a variância diminui, existindo uma tendência de estabilização da variância a partir de 6 estratos, para ambos os métodos. Entretanto, a utilização desta quantidade de estratos poderia levar

a dificuldades operacionais para a sua manutenção ao longo de todo o ciclo da floresta, principalmente em áreas menores. Desta forma, optou-se por processar todos os dados, utilizando-se 4 estratos, uma vez que este número se mostra mais operacional e, ainda, muito eficiente no controle da variabilidade.

4 CONCLUSÕES

O interpolador inverso da distância ao quadrado utilizando-se como variável o volume/ha obtido aos 3,5 anos promoveu uma redução de 3,8 vezes na variância média total dos dados analisados, ou seja, reduziu em 74% a variância das populações não estratificadas. Como consequência, o controle provocou uma redução de 48% no erro de amostragem.

A krigagem geoestatística utilizando-se como variável o volume/ha obtido aos 3,5 anos promoveu uma redução de 1,9 vezes na variância média total dos dados analisados, ou seja, reduziu em 47% a variância das populações não estratificadas e 32% no erro de amostragem.

O método de estratificação menos eficiente é aquele baseado no controle da idade, espécie e espaçamento (STR), contribuindo com 17% de redução da variabilidade média e 13% de redução no erro de amostragem.

Apesar do método IDW apresentar uma elevada eficiência, ele não garante que a eficiência seja mantida, caso uma nova amostragem fosse realizada sobre os mesmos projetos, ao contrário da krigagem geoestatística.

Em povoamentos florestais, que não apresentam dependência espacial, pode-se utilizar o método IDW com maior eficiência em relação a estratificação tradicional.

O número ótimo de estratos para se trabalhar com os interpoladores espaciais testados, situa-se

entre 4 e 6, sendo que a utilização de 4 estratos se mostra mais operacional.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: 2ª aproximação**. [S.l.]: Centro de Pesquisas Florestais da Região do Cerrado, 1978. 66 p. (Série técnica, 11).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistic**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: [s.n.], 1997. 316 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA-FAEPE, 1997. 344 p.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. (Tópicos em Ciências do Solo).