

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO E
AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE
EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO E DA ADUBAÇÃO,
VISANDO A COLHEITA PRECOCE PARA UTILIZAÇÃO EM
BIOENERGIA**

ÉDER APARECIDO GARCIA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP

Junho - 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO E
AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE
EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO E DA ADUBAÇÃO,
VISANDO A COLHEITA PRECOCE PARA UTILIZAÇÃO EM
BIOENERGIA**

ÉDER APARECIDO GARCIA
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças
Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP
Junho – 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO UNESP -FCA - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G216c Garcia, Éder Aparecido, 1983-
Caracterização física e química do solo e avaliação do desenvolvimento de plantas de eucalipto em função do espaçamento e da adubação, visando a colheita precoce para utilização em bioenergia / Éder Aparecido Garcia. - Botucatu : [s.n.], 2010
xiii, 98 f.: il., color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2010.

Orientador: Kléber Pereira Lanças

Co-orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

Inclui bibliografia.

1. Silvicultura. 2. Eucalipto. 3. Geoestatística. 4. Adubação. I. Lanças, Kléber Pereira. II. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO E AVALIAÇÃO DO
DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO
ESPAÇAMENTO E DA ADUBAÇÃO, VISANDO A COLHEITA PRECOCE
PARA UTILIZAÇÃO EM BIOENERGIA.**

ALUNO: ÉDER APARECIDO GARCIA

ORIENTADOR: PROF. DR. KLÉBER PEREIRA LANÇAS
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA



PROFA. DRA. MARIA HELENA MORAES

Data da Realização: 18 de junho de 2010.

“Esforça-te e tem bom ânimo; não pases, nem te espantes, porque o Senhor,
teu Deus, é contigo, por onde quer que andares”.

(Js. 1:9)

DEDICO

Aos meus pais, Herondino Aparecido Garcia e Devanilda Bernardo Garcia.

OFEREÇO

À minha querida e amada esposa,
Rosiane Vaz de Lima Garcia e ao meu filho Lucas Vaz de Lima Garcia.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pela força.

Aos meus pais, minha esposa e companheira Rosiane.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Rural, especialmente ao Maury pela ajuda nas análises físicas do solo.

Aos professores orientadores Kleber Pereira Lanças e Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela amizade, paciência e apoio em todos os momentos da condução do projeto.

À Universidade Estadual Paulista, pela oportunidade dada a mim.

Ao Valdir Aparecido Antunes, gerente da empresa Santo Amaro Reflorestamento, pelo apoio ao projeto.

Aos colegas Fabrício, Indiamara, Guilherme, Montanha, Buri, Fernando, Frescal, Natália, Guilherme (Dose), Roni e tantos outros que colaboraram de alguma forma na realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro.

Aos coordenadores do curso de pós-graduação em Ciência Florestal.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação pela ajuda no bom andamento das formalizações durante o curso.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO	01
2 SUMMARY	03
3 INTRODUÇÃO	05
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	08
4.1 Compactação do solo	08
4.2 Compactação em solos florestais	09
4.3 Desenvolvimento de raízes e características físicas do solo	10
4.4 Resistência do solo à penetração	12
4.5 Índice de cone	14
4.6 Sistema de posicionamento geográfico e mapeamento da compactação do solo	15
4.7 Atributos químicos do solo e variabilidade espacial	16
4.8 Geoestatística aplicada à ciência florestal	19
4.9 O desenvolvimento das árvores, a adubação e o espaçamento	20
5 MATERIAL E MÉTODOS	25
5.1 Caracterização da área experimental	25
5.2 Levantamento histórico preliminar da área	27
5.3 Amostragem do solo	27

5.4 Resistência à penetração	28
5.5 Disposição do experimento no campo	29
5.6 Caracterização química e física do solo	31
5.6.1 Densidade de partículas, densidade do solo e porosidade total	31
5.6.2 Umidade do solo	32
5.6.3 Textura do solo	32
5.6.4 Determinação de macro e micronutrientes	32
5.7 Avaliação do crescimento da floresta	33
5.7.1 Coleta de dados	33
5.7.2 Diâmetro, altura e volume	34
5.8 Análises estatísticas	35
5.8.1 Solo e geoestatística	35
5.8.2 Dendrometria e inventário	36
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.1 Resistência a penetração	37
6.2 Características físicas do perfil do solo	44
6.3 Variabilidade espacial dos atributos químicos	50
6.4 Avaliação do crescimento do diâmetro e da altura durante doze meses	63
6.5 Aspecto dendrométrico das árvores	68
6.6 Área basal, altura e incremento periódico	71
6.6.1 Área basal aos seis meses de idade	71
6.6.2 Incremento periódico mensal da área basal	72
6.6.3 Incremento periódico mensal da altura	75
6.7 Análise descritiva e de variância aos 12 meses de idade	78
6.7.1 Análise descritiva	78
6.7.2 Análise de variância e teste de médias	80
6.8 Volume com casca	82
7 CONCLUSÕES	85
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
01 – Mapa de ocupação do solo botucatuense.....	26
02 – Mapa de classes de solos no município de Botucatu.....	26
03 – Ferramenta da Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) utilizada na obtenção de amostras utilizadas na determinação de atributos do solo.....	28
04 – Penetrômetro hidráulico eletrônico.....	29
05 – Esquema da distribuição das parcelas na área experimental	31
06 – Régua graduada utilizada na medição da altura das mudas (A), até os nove meses de idade, paquímetro digital para mensuração do diâmetro (B) e clinômetro digital (C) para as medições de altura a partir do décimo mês.....	34
07 – Valores médios de resistência à penetração (índice de cone) com respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).....	39
08 – Semivariogramas da resistência à penetração nos quais o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²).....	41

09 – Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 10 cm.....	42
10 – Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 10 a 20 cm.....	42
11 – Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 20 a 30 cm.....	43
12 – Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 30 a 40 cm.....	43
13 – Mapa de isocompactação do solo à profundidade maior que 40 cm.....	44
14 – Perfil do solo avaliado.....	45
15 – Gráfico com valores médios de densidade do solo (g/cm^3) em quatro faixas de profundidade no perfil, com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).....	45
16 – Umidade do solo em função da profundidade.....	47
17 – Umidade do solo em função da adubação.....	47
18 – Valores médios de densidade de partículas (g/cm^3) nas quatro faixas de profundidade amostradas no perfil do solo com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).....	48
19 – Valores médios de porosidade total (%) nas quatro faixas de profundidade amostradas no perfil do solo com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).....	48
20 – Diferentes tonalidades de cores na amostragem em profundidade. Na imagem A, as amostras do solo seco ao ar, em B, o solo em repouso com solução de NAOH 90,1 N) para posteriores análises texturais.....	49
21 – As médias dos valores (5) de argila, areia e silte nas diferentes faixas de profundidade com respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).....	50
22 – Semivariograma da matéria orgânica, na profundidade de 0-20 cm, no	

qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma.....	58
23 – Semivariograma do magnésio, na profundidade de 20-40 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma	58
24 – Semivariograma da CTC, na profundidade de 0-20 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma	59
25 – Semivariograma da CTC, na profundidade de 20-40 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma.....	59
26 – Semivariograma do boro, na profundidade de 20-40 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma.....	59
27 – Semivariograma do manganês, na profundidade de 20-40 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma.....	60
28 – Semivariograma do zinco, na profundidade de 20-40 cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (% ²). Gráfico de validação do semivariograma.....	60
29 – Mapa do teor de matéria orgânica do solo (g.dm ⁻³), na profundidade de 0 a 20cm (27A) e mapa do teor de magnésio no solo (mmolc.dm ⁻³), na profundidade de 20 a 40cm (27B).....	61
30 – Mapa da CTC do solo, na profundidade de 0 a 20cm (28A) e mapa da CTC do solo, na profundidade de 20 a 40cm (28B).....	61
31 – Mapa de boro no solo (mg.dm ⁻³) na profundidade de 20 a 40cm (29A) e	

mapa de manganês no solo (mg.dm^{-3}) na profundidade de 20 a 40cm (29B).....	62
32 – Mapa de zinco no solo (mg.dm^{-3}) na profundidade de 20 a 40cm.....	62
33 – Diâmetro do colo médio na dosagem 1 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	66
34 – Diâmetro do colo médio na dosagem 2 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	66
35 – Diâmetro do colo médio na dosagem 3 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	67
36 – Altura média (m) na dosagem 1 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	67
37 – Altura média (m) na dosagem 2 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	68
38 – Altura média (m) na dosagem 3 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.....	68
39 – Parcela C3, ou seja, espaçamento de 2,8x1,5m na super-dosagem, aos seis meses de idade.....	69
40 – Ilustração das parcelas com espaçamento mais adensado (2,8 x 0,5m) nas dosagens mínima (A1) e máxima (A3) de adubação, aos seis meses de idade.....	69
41 – Ilustração das parcelas com espaçamento mais adensado (2,8 x 0,5m) na sub-dosagem (A1) e com arranjo de 2,8 x 1,5m na dosagem usual da empresa (C2), aos seis meses de idade.....	70

42 – Ilustração das parcelas com espaçamento de 2,8 x 1,5m (C2) e de 2,8 x 2,5m (E2), ambas na dosagem intermediária ou nível 2 de aplicação de adubo.....	70
43 – Ilustração das parcelas com espaçamento de 2,8 x 1,0m (B3) e de 2,8 x 2,0m (D3), ambas no nível (3) de aplicação de adubo, ou seja, uma super-dosagem em relação àquela aplicada usualmente pela empresa.....	71
44 – Área basal (m ² /ha), aos seis meses de idade, nos diferentes espaçamentos e doses de adubação.....	72
45 – Incremento periódico mensal em termos de área basal (m ² /ha), as letras A, B, C, D e E indicam os espaçamentos (2,8 x 0,5; 2,8 x 1,0; 2,8 x 1,5; 2,8 x 2,0 e 2,8 x 2,5 m), os números 1, 2 e 3 referem-se às doses sub-dose, dose usual e super-dose.....	75
46 – Incremento periódico mensal da altura (m), as letras A, B, C, D e E indicam espaçamentos (2,8 x 0,5 m; 2,8 x 1,0 m; 2,8 x 1,5 m; 2,8 x 2,0 m e 2,8 x 2,5 m), os números 1, 2 e 3 referem-se às doses sub-dose, dose usual e super-dose.....	78
47 – Volume médio, com casca, por hectare, de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , em função dos espaçamentos (A: 2,8 x 0,5 m; B: 2,8 x 1,0 m; C: 2,8 x 1,5 m; D: 2,8 x 2,0 m e E: 2,8 x 2,5 m.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
01 – Classificação dos teores de macronutrientes no solo segundo o IAC (2009).....	33
02 – Classificação da acidez (pH) e da saturação de bases (V%) segundo o IAC (2009).....	33
03 – Classificação dos teores de micronutrientes (mg/dm ³) segundo o IAC (2009).....	33
04 – Resultados da análise descritiva dos dados de resistência à penetração (KPa).....	38
05 – Média, mediana e intervalo de confiança do Índice de Cone (IC) com $\alpha = 0,05$	38
06 – Resultados das análises geoestatísticas do índice de cone.....	40
07 – Análise de variância da umidade do solo.....	56
08 – Resumo da análise descritiva dos atributos químicos do solo e avaliação do grau de variabilidade (GV) de cada atributo.....	51
09 – Forma de distribuição dos dados dos atributos químicos do solo ao se	

considerar os valores dos coeficientes de	
curtose.....	52
10 – Análise de variância do pH.....	54
11 – Análise de variância da matéria orgânica.....	54
12 – Análise de variância do fósforo.....	54
13 – Análise de variância da H + Al.....	54
14 – Análise de variância do potássio.....	54
15 – Análise de variância do cálcio.....	55
16 – Análise de variância do magnésio.....	55
17 – Análise de variância da soma de bases.....	55
18 – Análise de variância da CTC.....	55
19 – Análise de variância do V% (saturação por bases).....	55
20 – Análise de variância do boro.....	56
21 – Análise de variância do cobre.....	56
22 – Análise de variância do ferro	56
23 – Análise de variância do manganês	56
24 – Análise de variância do zinco.....	56
25 – Resultados das análises geoestatísticas dos atributos químicos do solo.....	57
26 – Equações para a estimativa da altura média (m), H, em função da idade (meses) , I, durante o primeiro ano após o plantio.....	64
27 – Equações para a estimativa do diâmetro do colo médio (m), D, em função da idade (meses), I, durante o primeiro ano após o plantio.....	65
28 – Área basal calculada com o diâmetro do colo e variação.....	74
29 – Altura nas diferentes idades por tratamento e variação.....	77
30 – Análise descritiva do DAP (cm) aos doze meses de idade.....	79
31 – Análise descritiva da altura (m) aos doze meses de	

idade.....	79
32 – Análise de variância da altura, aos 12 meses de idade.....	80
33 – Análise de variância do DAP, aos 12 meses de idade.....	81
34 – Valores médios de altura do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i> , aos 12 meses de idade, em função da adubação e do espaçamento.....	81
35 – Valores médios do DAP do <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i> , aos 12 meses de idade, em função da adubação e do espaçamento.....	81
36 – Volume médio individual (m ³) de madeira, com casca, de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i> aos doze meses de idade.....	82
37 – Coeficientes da equação de volume de madeira com casca do povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , aos 12 meses de idade, pelo modelo de Spurr.....	83

1 RESUMO

O efeito dos espaçamentos (A) 2,8 x 0,5 m, (B) 2,8 x 1,0 m, (C) 2,8 x 1,5 m, (D) 2,8 x 2,0 m e (E) 2,8 x 2,5 m com três níveis de adubação (1=sub-dose; 2=dose da empresa* e 3=superdose) realizados no plantio e aos 60, 140 e 360 dias de idade, no crescimento de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, em área de Latossolo vermelho amarelo textura média, foi avaliado neste trabalho por meio de inventário contínuo que consistiu em medições mensais de altura total, diâmetro da base e DAP (diâmetro a altura do peito). Um estudo de caracterização da área experimental foi feito com utilização das análises descritivas e de variância e da geoestatística dos atributos químicos do solo e da resistência à penetração. Os valores médios de resistência a penetração, por faixa de profundidade, denominados índices de cone, foram obtidos nas faixas de 0-20 e de 20-40 cm, com forte grau de dependência espacial, independente da profundidade. Outros atributos físicos do solo foram avaliados, sendo: densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total e textura do solo. Não houve diferença significativa para a porosidade total apesar de, na camada de 0-30 cm, ter ocorrido uma maior acomodação de partículas do solo por causa do manejo e das atividades de colheita e extração florestal. Um estudo da variabilidade espacial de micronutrientes, macronutrientes, acidez, matéria orgânica, dentre outros, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, foi realizado pois todos estes fatores edáficos podem influenciar nos tratamentos; apenas a matéria orgânica (0-20cm), Mg (20-40cm), CTC (em ambas profundidades), B, Mn e Zn, estes últimos na faixa de 20 a 40 cm, apresentaram validação positiva dos modelos de

semivariograma e resultaram interpolação. Os teores de macronutrientes foram considerados, em sua maioria, baixos para a cultura do eucalipto. A interação entre espaçamento e adubação foi avaliada por meio de regressão linear simples para a comparação das doses de adubação em cada espaçamento adotado; além disso, foram interpretadas tabelas de incremento periódico mensal em termos de área basal (m^2/ha) e de altura total (m). Tanto o incremento periódico como as curvas de regressão mostraram que nem sempre é necessário utilizar uma grande dose para alcançar altas produtividades. Os maiores incrementos foram encontrados nos tratamentos do espaçamento A ($2,8 \times 0,5 \text{ m}$), tanto em termos de altura como em termos de área basal. A partir dos oito meses de idade foram coletados, adicionalmente, dados de DAP e determinou-se o volume médio, com casca, das árvores em cada tratamento aos 12 meses de idade. Uma análise de variância e teste de médias das variáveis DAP e altura mostrou que os maiores valores em termos de altura e DAP, no povoamento de *Eucalyptus urograndis*, aos doze meses de idade, ocorreram na dosagem 2 de adubação com os espaçamentos $2,8 \times 1,0 \text{ m}$, $2,8 \times 1,5 \text{ m}$ e $2,8 \times 2,0 \text{ m}$. O maior volume médio por hectare ($108.6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$) ocorreu no espaçamento $2,8 \times 0,5 \text{ m}$ na maior dosagem e, neste mesmo tratamento, foi detectada a maior variância de volume individual devido a intensidade de competição. Equações de volume foram ajustadas para estimar volume individual com casca de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, modelos estes com alto coeficiente de determinação porém com β_0 pouco significativo. Ao se considerar o volume de madeira estimado por área, os espaçamentos adensados, como o $2,8 \times 0,5 \text{ m}$, podem ser produtivos para fins bioenergéticos.

Palavras-chave: silvicultura; inventário; geoestatística.

2 SUMMARY

SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION AND EUCALYPTUS PLANTS DEVELOPMENT EVALUATION AS A FUNCTION OF SPACEMENT AND FERTILIZATION TO EARLY HARVEST FOR BIOENERGY USAGE. Botucatu, 2010, 98f. Dissertation (Master Science in Forest Science) – Agronomical Science College, Universidade Estadual Paulista

Author: ÉDER APARECIDO GARCIA

Advisor: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Co-advisor: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

The effect of spacement (A) 2.8 x 0.5 m, (B) 2.8 x 1.0 m, (C) 2.8 x 1.5 m, (D) 2.8 x 2.0 m (E) 2.8 x 2.5 m with three levels of fertilization (1 = subdose, 2 = standard dose and 3 = overdose) performed during the planting season and at 60, 140 and 360 days after planting clones of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, in a Oxisol soil with medium texture, were evaluated in this study using continuous inventory which consisted of monthly height measurements, base diameter and DBH (diameter at breast height). A characterization study of the experimental area was done with use of descriptive analysis and variance and geostatistics of soil chemical properties and soil penetration resistance. The soil resistance average values by layer - soil cone index - were higher in the ranges of 0-20 cm and 20-40 cm, with a strong spatial dependence degree, regardless depth. Other soil physical properties were evaluated:

soil density, particle density, total porosity and soil texture. There was no significant difference although the total porosity in the layer of 0-30 cm have shown a greater accommodation of soil particles due to the management and harvest and forest extraction. A study of spatial variability of micronutrients, macronutrients, acidity, organic matter, among others, at 0-20 and 20-40 cm, was done in order to understand how that all these edaphic factors may interfere the treatments; only the organic matter (0-20 cm), Mg (20-40 cm), CTC (both depths), B, Mn and Zn (20-40 cm), showed positive validation with semivariogram models and interpolation. Macronutrient contents were considered mostly low for the eucalyptus crop. The interaction between spacing and fertilization was assessed by simple linear regression to compare the fertilization rates in each spacement used, moreover, monthly tables were interpreted in terms of basal area (m^2/ha) and total height (m). The periodic increment and the linear regression showed that it is not always necessary to apply an over dose to achieve high yields. The largest increases were found in treatments with the spacement 2.8×0.5 m, both in terms of height and basal area. After eight months of age, DBH data were collected and average volume with bark was determined in each treatment after 12 months old. An analysis of variance and test of mean for DBH and height showed that the highest values in terms of height and DBH for *Eucalyptus urograndis* at twelve months old, occurred with the standard dose of fertilizer spaced 2.8×1.0 m, 2.8×1.5 m and 2.8×2.0 m. The highest average volume per hectare (108.6 cubic meters. Ha^{-1}) occurred in 2.8×0.5 m spacement with the over dose of fertilizer and in this same treatment, we detected the largest variance of individual volume due to the intensity of competition. Volume equations were adjusted for volume with independent bark of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, these models had high coefficients of determination but with β_0 negligible. Considering the volume of timber estimated by area, the dense spacing as 2.8×0.5 m can be productive for bioenergy.

Keywords: forestry, inventory, geostatistics

3 INTRODUÇÃO

Os plantios florestais de eucalipto, no Brasil, são dos mais produtivos do mundo e destinam-se principalmente à produção de celulose, serraria e também para fins energéticos. Em estados mais industrializados ou em outros com muita atividade siderúrgica, é grande a demanda de madeira para energia, havendo um aumento ano após ano, por isso a maior produtividade dos sítios florestais torna-se fundamental.

O setor florestal está em plena expansão, sendo que a taxa de crescimento da área de florestas plantadas com eucalipto no Brasil, entre 2004 e 2009, foi de 41,1%. O estado de São Paulo é o segundo no ranking, com 23% da área total de florestas plantadas com eucalipto, ficando apenas atrás de Minas Gerais, este com 29%. Cerca de 64,7% das áreas florestais comerciais são plantadas com espécies do gênero *Eucalyptus*, além disso, há uma intensa demanda por biomassa proveniente de florestas energéticas. Os segmentos florestais de lenha e carvão, tendo como ano-base 2008, consumiram juntos cerca de 62,8 milhões de metros cúbicos, porém com queda entre 2008 e 2009 devido a crise econômica (ABRAF, 2010).

Do ponto de vista da temática global sobre mecanismos de desenvolvimento limpo e seqüestro de carbono, as florestas brasileiras são extremamente vantajosas devido às características edafoclimáticas e tecnologias silviculturais nacionais. Na década de 1980 o incremento ficava em torno de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$ e, agora, fica entre 30 e 40 $\text{m}^3/\text{ha} \cdot \text{ano}$, dependendo da espécie e da capacidade produtiva (ABRAF, 2010). Floresta

energética é um termo criado para identificar plantios florestais destinados à produção de energia principalmente de eucalipto, com maiores áreas no País, e de bracatingais, especialmente na região sul. As florestas energéticas geram produção de biomassa através do crescimento vegetativo sendo que, do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo da matéria orgânica, origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada para geração de energia. As plantações de florestas energéticas podem conter benefícios de duas maneiras, através do seqüestro de carbono realizado no crescimento das plantas e através da redução de emissões por consequência da substituição da matriz energética dos combustíveis fósseis pela biomassa. A prática do uso de madeira de plantações florestais para fins energéticos é bem aceito como mecanismo de desenvolvimento limpo podendo ser integrado ao mercado de crédito de carbono.

Para que a madeira seja colhida de forma precoce para a produção de briquetes, uma grande produtividade ($\text{m}^3/\text{ha. ano}$) ou alta produção torna-se necessária para o abastecimento da fábrica, buscando não comprometer muito as qualidades físicas da madeira, tais como a densidade e seu poder calorífico. Neste contexto, a adubação e o espaçamento podem influenciar na dinâmica de crescimento das árvores alterando as características anatômicas da madeira e suas propriedades, tais como a densidade, o poder calorífico, o teor de carbono fixo e o teor de lignina. As árvores com menor área útil competem mais pelos recursos naturais promovendo maior incremento em altura do que em diâmetro, todavia, espaçamentos mais adensados podem gerar maior produção por área e adiantamento da idade de corte o que promoveria amortização do maior custo de implantação.

A compactação do solo é um dos problemas físicos que podem comprometer a produtividade, seus efeitos podem persistir por vários anos, dependendo das características do local, reduzindo a penetração das raízes, diminuindo a aeração e a capacidade de absorção de nutrientes, comprometendo o estabelecimento das mudas. A densidade do solo pode estar relacionada com a qualidade da muda e, para níveis de compactação severa do solo, reduz a altura e o sistema radicular das plantas.

Os métodos geoestatísticos são utilizados como ferramenta para a elaboração de mapas de qualidade do solo, fundamentais para o manejo nutricional e de implantação florestal. Desta maneira, os trabalhos de pesquisa em caracterização dos solos florestais devem ter como desafio buscar modelos e ferramentas necessárias para o

monitoramento do solo e da produtividade silvicultural, visando o estabelecimento de plantios florestais sustentáveis.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o solo cultivado historicamente com eucalipto e avaliar a influencia da adubação e do espaçamento para o incremento da produtividade das florestas energéticas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Compactação do solo

A compactação é um fenômeno relacionado às deformações físicas do solo, em função da área de contato do rodado e da intensidade de tráfego; sendo o primeiro afetado pelo tipo ou pela calibração da pressão dos pneus e o segundo, à intensidade da atividade, estreitamente ligada ao planejamento (FENNER, 2006).

As principais forças que causam a compactação em solos florestais originam-se de máquinas utilizadas nas atividades de manejo e colheita da madeira. A pressão das rodas concentra-se não somente no solo imediatamente abaixo do rodado, mas também em profundidades consideráveis no perfil do solo (DANFORS, 1974).

Não só a pressão estática causa compactação do solo, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração de tratores arrastando implementos e pela patinagem dos seus pneus (HORN et al., 1995 apud STRECK et al., 2004).

A compactação do solo interfere na densidade do solo que é expressa pela quantidade de massa do solo seco por unidade de volume do solo, pode ser usada como indicador de compactação porque sofre alterações com as modificações do espaço poroso, em solos arenosos fica entre 1,2 e 1,9g/cm³ (Reinert e Reichert, 2006). Já a densidade de

partículas não varia com o manejo do solo mas, sim, com a composição química e mineralógica, tal como o teor de matéria orgânica que é inversamente proporcional à densidade de partículas. A relação entre os dois tipos de densidade fornece a porosidade total do solo que pode ser definida como sendo a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo. Quanto maior a porosidade, melhor a condição respiratória da vida biológica do solo (Reinert e Reichert, 2006).

4.2 Compactação em solos florestais

Silva et al. (2007) mostrou que a maior parte da compactação causada por máquinas florestais ocorre nas primeiras passadas, estes autores encontraram valores máximos de resistência à penetração de 8,65 e 6,46 MPa nos experimentos de intensidade de tráfego e carga, respectivamente.

Áreas de empilhamento de madeira e trânsito dos implementos de colheita e extração sofreram maior degradação em plantio de *Pinus taeda* estudado por Dedeczek et al. (2000). A maior resistência à penetração encontrada por estes autores foi na linha de plantio, a 20 cm de profundidade. Ainda de acordo com Dedeczek et al. (2000), mais de 50% da variação em altura dos pinus, em diferentes sistemas de preparo de solo, foi devido à alteração da resistência do solo na linha e que, na entrelinha, ela também é responsável, na mesma proporção, pelo desenvolvimento das plantas.

Borges et al. (1986), citado por Martins et al. (2002), afirmam que densidades maiores de 1,15 g/cm³, em solos de textura mais argilosa, diminuiram os teores de nutrientes na parte aérea de plantas de *Eucalyptus* sp. Martins et al. (2002) encontraram maiores valores de resistência à penetração, entre 20 e 40 cm de profundidade, na seguinte ordem decrescente: pinus, eucalipto, seringueira, mata nativa.

As deformações físicas do solo e as alterações biológicas decorrentes do tráfego podem afetar todo o ecossistema florestal e sua produtividade. Flocker e Nielsen (1962), citados por Fenner (1999), em uma análise de crescimento de plantas em solos com vários graus de compactação e estresse de umidade, verificaram que a absorção de nutrientes não foi diretamente afetada pela compactação, mas, sim, pela baixa disponibilidade de água.

Somente a primeira passagem é capaz de causar de 50 a 75% da compactação ocorrida depois de 25 viagens com máquinas florestais (ADAM e FROELHLICH, 1981; FENNER, 1999). Mais importante ainda é saber que, segundo Kardell (1978), citado por Fenner (1999), foram necessários de 5 a 10 anos para a reconstituição de solos compactados em experimentos no sul da Suécia.

Nos trabalhos de Horn et al. (2007) realizados em área da Floresta Negra, na Alemanha, os valores de precompressão nos solos florestais foram da ordem de 20-50 kPa e de 25-50 kPa, a 20 cm e 40 cm de profundidade, respectivamente. O estresse de compressão avaliado por esta pesquisa foi definido como a força interna do solo, que é resultado dos processos pedogenéticos, efeito de atividades antrópicas e condução hidráulica do solo. Foram analisados solos sob operações florestais com diversas máquinas, dentre elas, o harvester Caterpillar 580 e um forwarder Timberjack 510, que sempre resultaram incremento significativo nos valores de precompressão, na linha de tráfego.

4.3 Desenvolvimento de raízes e características físicas do solo

A produtividade das plantações florestais é influenciada pelas propriedades do solo culminando na eficiência do crescimento e distribuição das raízes. As propriedades químicas e físicas do solo adequadas propiciam condição favorável para o melhor desenvolvimento do sistema radicular (CASAGRANDE, 2002). As raízes mais finas são responsáveis pela absorção de água e nutrientes., sendo esse processo prejudicado quando o solo está compactado. O sistema radicular, nestas condições, ganha em espessura e, conseqüentemente, apresentando uma menor área de absorção (GONÇALVES et al., 1990).

Em solos com bastante umidade, os tratamentos de compactação não afetaram a concentração de nutrientes nas folhas de pinus. Mas em condições de solo seco, para o tratamento considerado com alta compactação (76% do máximo valor de densidade), essa influencia ocorreu (BLOUIN et al., 2008). Ainda segundo estes autores, com base nos resultados do trabalho, foi possível observar que a umidade do solo alivia a resistência à penetração; por isso a compactação influencia no crescimento e na biomassa em solo seco e em solos mais úmidos, não.

Os mecanismos de transporte de nutrientes são influenciados pela estrutura do solo, que pode ser afetada pela compactação (SIQUEIRA, 2002). Em solos com elevado grau de compactação, a aeração pode restringir o crescimento das plantas em valores de umidade inferiores àquela correspondente a capacidade de campo (SILVA et al., 2002).

A compactação provoca ajuste das partículas do solo, o que causa modificação no tamanho e na continuidade dos poros, reduzindo a infiltração de água e a aeração do solo, o que acarreta prejuízos para o desenvolvimento radicular. Em ensaio com mudas de eucalipto em solo compactado, com diferentes teores de água, a matéria seca de raízes, matéria seca total e a densidade de raízes foram reduzidas pela compactação do solo na maior umidade ($0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$), condição que provocou redução de até 40% na massa radicular (SILVA et al., 2006).

O número de raízes adventícias de milho foi alterado tanto pela textura quanto pela densidade aparente do solo; em solos mais arenosos, tanto em baixa ($1,07 \text{ g.cm}^{-3}$) com em alta ($1,53 \text{ g.cm}^{-3}$) densidade aparente o número de raízes foi diminuído (ROSOLEM et al., 1999). No caso da cultura do milho, foi encontrado um $Q_{1/2}$, valor que define a resistência ao penetrômetro no qual o crescimento é reduzido a metade do máximo, foi de 1,3 MPa para as raízes adventícias.

Em ensaio com soja, Rosolem et al. (1994) constataram que, embora a compactação impedisse o crescimento em comprimento das raízes, estas se desenvolveram bem na camada superficial do solo, o que garantiu o desenvolvimento das plantas.

No caso de plantas de cobertura (mucuna, crotalária, guandu, feijão de porco) em Argissolo Vermelho, Reinert et al. (2008) detectaram o valor de $1,85 \text{ Mg.m}^{-3}$ como o valor crítico de densidade para o desenvolvimento radicular provocando deformações e concentração de raízes nas camadas superficiais.

Um plantio de milheto teve sua massa seca de raiz reduzida em função do grau de compactação, que é a relação entre a densidade natural do solo e a densidade máxima do solo (JIMENEZ et al., 2008).

O aumento da compactação influenciou negativamente no desenvolvimento do sistema radicular do feijoeiro, sendo o efeito mais expressivo à partir de $1,2 \text{ kg.dm}^{-3}$, a raiz tende a ficar mais grossa com o aumento da restrição ao seu crescimento (GUIMARÃES et al., 2002).

Segundo Gonçalves et al. (2006), as camadas compactadas em subsuperfície prejudicam o desenvolvimento vertical das raízes das plantas ocasionando maior densidade de raízes na camada superficial.

O crescimento aéreo de mucuna e de labe-labe foi reduzido em 17 e 15% por causa do aumento da compactação, sendo a mucuna mais tolerante ao impedimento físico por ter seu incremento radicular reduzido à metade somente a 2,12 MPa de resistência mecânica à penetração (FOLONI et al., 2006).

4.4 Resistência do solo à penetração

Curvas de resistência do solo à penetração são importantes para avaliação da qualidade física do solo; permite identificar áreas com resistência mecânica limitante ao crescimento das raízes e estabelecer a umidade e a densidade do solo críticas para o desenvolvimento de espécies florestais. Além disso, é possível confeccionar mapas nos quais se permite identificar áreas distintas, em relação a atributos físicos e químicos do solo, sendo ferramenta de gerenciamento para práticas de manejo no campo. Bem como estabelecer a capacidade de suporte de carga para diferentes profundidades do solo florestal, semelhante ao trabalho realizado por Assis e Lanças (2005) em diferentes sistemas de manejo, no qual se constatou que em camadas mais profundas, de 10-15 cm, ocorria maior capacidade de suporte do que àquelas mais superficiais, de 0-5 cm.

De acordo com Streck et al. (2004), a resistência mecânica do solo à penetração é a propriedade física que melhor mostra a diferença estatística do efeito causado pelo número de passadas com máquina pelo solo. Além disso, segundo Acosta (2008), é um método fácil, rápido e de baixo custo. O penetrômetro fornece valores de índice de cone (IC), que é relacionado à densidade de solo e inversamente proporcional ao teor de água. Também se avalia a compressibilidade dos solos cuja função é determinar a facilidade com que o solo diminui o volume quando uma determinada pressão é aplicada. Simula-se, desta forma, uma situação de atividades mecanizadas no campo e contribui para determinar capacidade de carga do solo. É possível também mapear o agroecossistema, deste ponto de vista, utilizando-se geoestatística (ACOSTA, 2008).

Cavalieri (2007) avaliou o efeito de diferentes níveis de carga de máquinas no solo, em região de cultivo de beterraba açucareira, na Suécia, sobre algumas propriedades físicas do solo, os tratamentos foram os diferentes níveis de compactação exercidos pela semeadora e pelo pneu do trator. Para tanto foram instalados sensores no solo de maneira que cada passada realizada pela semeadora ou pelo trator sobre os sensores produzia picos de pressão dos quais foram obtidos as pressões máximas exercidas no meio edáfico. As maiores pressões exercidas no solo foram detectadas na camada de 0-10 cm, observou-se também que nos primeiros 12 cm de profundidade a carga do trator gerou, tanto na linha de plantio quanto na entrelinha valores maiores de resistência à penetração.

Molin et al. (2006) investigaram a distribuição vertical e horizontal da compactação do solo através do resultado de mapas interpolados de seu índice de cone, associado ao teor de água, em área sob semeadura direta, o mesmo pode ser adotado em agroecossistemas florestais.

Similar ao cultivo mínimo adotado em silvicultura, na área agrônômica, o sistema de plantio direto tem sido avaliado em diversos trabalhos assim como fizeram a resistência do solo à penetração através da análise multivariada para agrupar intervalos de profundidade cujos valores da resistência apresentam variabilidades semelhantes. Eles destacam que, na faixa de profundidade entre 0-4 cm ocorre a maior transformação no solo decorrente do sistema de plantio direto.

A resistência à penetração, na região oeste do Paraná, foi avaliada por Fidalsk et al. (2006) que detectaram dependência das resistências à penetração nas camadas de 5 a 20 cm de profundidade, não ocorrendo o mesmo nas camadas superficial, menor que 5 cm, e subsuperficiais, em torno de 30 cm de profundidade. Os autores fizeram um semivariograma comum às épocas e camadas de solo no qual o alcance da resistência foi de 17 m, sendo que os valores de resistência obtidos no trabalho de Fidalsk et al. (2006) em Latossolo vermelho eutroférico estão entre 1,0 MPa e 3,0 MPa. Também abordaram a taxa de estratificação do carbono orgânico do solo (QCO) como fator importante para estabilizar os efeitos da compactação devido à semelhança da dependência espacial da resistência à penetração e da QCO.

Silva et al. (2004) estudaram a resistência à penetração em três tipos de solo e em nove profundidades, os semivariogramas das profundidades de 12,5 até 25 cm

tiveram alcance entorno de 3m. Em área de Argissolo vermelho-amarelo, a maioria das profundidades apresentaram moderada dependência espacial da resistência à penetração. No Latossolo vermelho distrófico ocorreu diferentes alcances em distintas camadas, de 5 até 15 cm, alcances entre 18,7 e 25,2 m, nas profundidades de 17,5 cm, 20 cm e 25 cm, o alcance ficou em torno de 13,6 m. No Latossolo vermelho distroférrico, no qual a profundidade de 5 cm gerou alcance de 13 m, já nas faixas de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm, o alcance ficou por volta de 17 m.

Souza et al. (2006) investigaram o efeito do teor de água na variabilidade espacial da resistência à penetração em Latossolo vermelho distrófico, havendo um aumento da resistência da camada de 0-15 cm para a camada de 15-30 cm, passando de 1,99 para 2,93 MPa, na primeira oportunidade de coleta de dados, e de 2,30 para 3,77 MPa, na segunda amostragem. Em condição de solo mais seco, os semivariogramas da resistência à penetração mostraram efeito pepita puro, isso deve ter sido causado pela distância inadequada entre os pontos de amostragem deste atributo. Os resultados evidenciaram duas classes de alcance para a resistência à penetração, na profundidade de 0-15 cm, o alcance foi de 30 a 50 m e nas faixas de 15-30 e 30-45 cm, variou de 19 a 30 m nas duas épocas de coleta de dados.

4.5 Índice de cone

A medida da resistência do solo à penetração serve para identificar o estado de compactação do solo, a média aritmética de valores de resistência à penetração em um determinado intervalo de profundidade é chamado de índice de cone. Os penetrômetros de cone são instrumentos de medida que caracteriza a resistência do solo à penetração por um método uniforme padrão. A pressão necessária para cravar um cone circular de 30 graus até uma determinada profundidade no solo é um índice da resistência do solo chamado de índice de cone (ASAE, 1999). Mapas do índice de cone tem sido uma ferramenta valiosa para a visualização das configurações da resistência do solo à penetração, especialmente em relação ao preparo e ao tráfego efetuado pelas máquinas (CLARK et al. 1993; CLARK, 1994).

A ASAE (1999) define índice de cone (IC) como sendo a força por unidade de área da base (kPa ou kgf/cm^2), necessária para empurrar o penetrômetro no solo, durante um pequeno deslocamento da ponta cônica e determinar que o início da leitura seja

feito no instante em que a base do cone seja introduzida numa velocidade de penetração constante de 30 mm/s. Entretanto, esse índice, normalizado pela ASAE apresenta grandes variações em função das propriedades do solo, tais como teor de água, textura e densidade. Apesar de muitos estudos terem sido feitos, não se tem uma quantificação, universalmente aceita, da influência de uma determinada variação no teor de água sobre a resistência à penetração para diferentes solos, ou seja, se esta resistência varia linearmente, ou não, em função de iguais acréscimos no teor de água. Ainda, se estes acréscimos influenciam o coeficiente de variação dos dados de resistência, obtidos na caracterização de um determinado solo (ROSOLEM et al., 1999). Neste sentido, as ferramentas de geoestatística podem ajudar a identificar a correlação entre dados coletados no campo.

4.6 Sistema de posicionamento geográfico e mapeamento da compactação do solo

Segundo Stafford e Ambler (1994), a execução de operações de campo espacialmente variáveis, como por exemplo, aplicações localizadas e diferenciadas de insumos, mapeamento da produtividade, mapeamento de isocompactação, entre outras, somente pode ser realizada com sucesso se contarem com um sistema de posicionamento adequado.

O equipamento a ser utilizado em programas de georreferenciamento tem que receber o sinal de, pelo menos, quatro satélites que não podem estar muito próximos; este número de satélites permite que se realize o posicionamento em tempo real e sem a necessidade de intervisibilidade entre as estações. Além disto, o GPS pode ser usado sob quaisquer condições climáticas (MONICO, 1998).

Os prejuízos causados pela compactação do solo são indiscutíveis e bem conhecidos na produtividade das culturas (OLIVEIRA et al., 1999). Sendo assim, vários pesquisadores têm se preocupado, ao longo dos anos, em estudar e mensurar o nível de compactação de maneira a, pelo menos, mantê-la controlada (NETO et al., 1999).

Partindo das premissas citadas acima e com o intuito de realizar o mapeamento das características envolvidas visando o gerenciamento e planejamento da correção dos prejuízos causados pela compactação do solo, foi desenvolvido na Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista (FCA-UNESP), um penetrômetro

hidráulico-eletrônico composto por um pistão hidráulico, uma célula de carga e uma haste de aço com uma ponteira cônica de acordo com as especificações da ASAE, 1996 (SANTOS, 1998), no qual foi instalado um Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS).

Lima et al. (2008) indicam os métodos geoestatísticos como boa ferramenta para o estudo da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em locais de colheita mecanizada. Estes autores enfatizam que as mudanças do solo causadas por tráfego de tratores florestais utilizados na colheita e extração de madeira são mais marcantes nas camadas mais superficiais do solo por causa da pressão dos rodados dos tratores.

4.7 Atributos químicos do solo e a variabilidade espacial

Carvalho et al. (2002) realizaram uma avaliação da variabilidade espacial de Ca, pH, Mg, P e K em três tipos de preparo do solo: arado, grade e plantio direto. Para o pH o coeficiente de variação (CV) manteve-se abaixo de 10% e as outras variáveis – Mg, P e K – apresentaram coeficientes de variação acima de 20%, sendo o Ca uma exceção entre os atributos avaliados neste trabalho, já que os CV ficaram entre 10 e 20%. Foi encontrada dependência espacial para a maioria das combinações analisadas sendo estas constituídas pelas diferentes profundidades e tipos de preparo do solo. É afirmado que a profundidade é um fator importante para experimentações com variabilidade espacial de propriedades químicas do solo.

Montanari et al. (2008) coletaram amostras de solo, na profundidade de 0-5 cm, em área de cultivo de cana-de-açúcar, em duas classes de solo (Latosolo e Argissolo), ressaltando que os métodos geoestatísticos são vantajosos por necessitarem de menor número de amostras para estimar atributos químicos do solo com determinada precisão; porém fazem a ressalva de que o número de pontos a serem amostrados precisam ser diferentes de acordo com o tipo de solo já que a pedofoma pode variar com a classe de solo influenciando na dinâmica dos atributos. Também avaliou-se os modelos matemáticos mais adequados para determinar-se as curvas dos semivariogramas; os atributos pH, K, Mg, CTC e V% do Latossolo foram ajustados no modelo esférico e os dados dos atributos Ca e P, ao modelo exponencial, não tendo ocorrido necessariamente o mesmo para os atributos do

Argissolo, no qual pH, Ca, P, CTC e V% ajustaram-se ao modelo esférico, já Mg e K, ao modelo exponencial.

Foram coletadas por Silva et al. (2003) 192 amostras de Argissolo vermelho-amarelo, sob cultivo de milho, em intervalos de 6x2 m, avaliando-se os coeficientes de variação, com maior valor atingido de 111% para o fósforo e se determinou o nível de simetria dos dados, com P, K, pH, Ca, Mg e CTC positivos e matéria orgânica, alumínio e V% negativos. Atributos como P, K e matéria orgânica foram considerados moderadamente dependentes e pH, Ca, Mg, CTC e alumínio trocável foram fortemente dependentes. O alcance atingido pelo fósforo foi o maior, 53,2 m, em torno de 18 m para pH e V% e por volta de 10 m para matéria orgânica, alumínio trocável e cálcio.

Cavalcante et al. (2007) avaliaram atributos químicos em diferentes áreas de manejo e duas profundidades, observando-se que ocorreu diminuição dos valores dos atributos químicos do solo em relação à profundidade. O pH apresentou o menor efeito pepita, possivelmente devido a erros acumulados provavelmente na amostragem. O maior e o menor alcance foram obtidos pelo Ca, 12,7 m, na profundidade de 0 a 10 cm, no sistema de plantio direto e 4,2 m de alcance, na faixa de 10-20 cm, no sistema de preparo convencional. Os maiores alcances, de maneira geral, foram obtidos em áreas de cerrado e de plantio direto. Foi destacado que os valores de alcance dos atributos estão entre 5,6 e 10,5 m no Cerrado e entre 4,2 e 12,7 m no sistema de plantio direto evidenciando maior variabilidade das características do solo em locais de atividade agrícola do que em florestas nativas porque as atividades silviculturais promovem uma condição ambiental mais próxima da encontrada em ambientes florestais originais.

Valores de alcance muito altos foram encontrados por Vettorato (2003) em pontos de amostragem por todo o município de Botucatu, estado de São Paulo, para a caracterização da fertilidade, havendo a necessidade de se optar por diferentes métodos de interpolação dos dados para geração das classificações da fertilidade. A distribuição normal foi detectada apenas nos parâmetros saturação por bases, na profundidade de 0-20 cm, matéria orgânica e Al nas duas profundidades estudadas, 0-20 cm e 40-60 cm. A dependência espacial mais marcante foi encontrada nos atributos P (40-60 cm), Ca (0-20 cm) e K e Mg (ambos nas duas faixas de profundidade). Além disso maiores valores de variância espacial dos atributos

químicos do solo foram configurados na camada mais profunda do solo, provavelmente pela falta de distúrbios causados por processos agrícolas nesta camada.

Ao se avaliar alguns atributos do solo em três profundidades, 0-10, 10-20 e 0-20 cm, o menor coeficiente de variação encontrado por Zanão Júnior et al. (2007) foi para pH (0-20 cm) e o maior para o B (10-20 cm). Com relação ao alcance, o menor foi de 27 m para o boro, à profundidade de 10-20 cm e o maior alcance foi de 352 m para o pH na faixa de 0-10 cm. Nas análises dos semivariogramas foi encontrado o efeito-pepita puro somente da matéria orgânica, nas profundidades de 10-20 e de 0-20 cm, e no semivariograma do boro (0-10 cm).

Couto e Klamt (1999) estudaram a variação espacial de micronutrientes em área sob irrigação nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Os micronutrientes Cu, Mn e Zn chegaram a apresentar $CV > 50\%$. Nas análises geoestatísticas, o Cu não foi dependente espacialmente na faixa de 0-20 cm de profundidade e o B não mostrou dependência espacial nas duas profundidades. O manganês apresentou o melhor ajuste no qual os alcances foram de 385 e 412 m, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente.

Avaliando os macronutrientes e pH de Latossolo vermelho-escuro distrófico sob diferentes tipos de manejo – grade, arado e plantio direto – Silveira et al. (2000) encontraram coeficiente de variação baixo para o pH em todos os tratamentos, o que evidencia baixa variabilidade. Houve maior ocorrência de Ca e Mg nos primeiros 5 cm de profundidade em área de plantio direto (PD), podendo ser resultado da calagem feita na área. Tanto à 0-5 cm quanto na profundidade de 5-20 cm, os maiores valores de P do solo apareceram no plantio direto e, os menores, no tratamento com arado, destacam ainda que o P, no sistema de plantio direto, concentrou-se na parte mais superficial do solo. Com relação aos teores de K, foram encontrados os maiores na camada de 0-5 cm, no sistema de PD, seguidos pela grade e pelo arado, na ordem.

4.8 Geoestatística aplicada à ciência florestal

Atualmente a aplicabilidade e a utilização da geoestatística para a análise de dados no espaço e no tempo estão difundidas em vários ramos da ciência, mas, para isso, é preciso saber a definição de estacionaridade. Diz-se que uma variável é estacionária se o desenvolvimento desse processo no tempo e no espaço ocorrer de maneira homogênea com oscilações aleatórias contínuas em torno de um valor médio; no qual nem a amplitude média e nem as oscilações mudam de forma abrupta (GUIMARÃES, 2004). Depois disso, é analisada a semivariância e elaborados os semivariogramas. A semivariância é uma função e da análise da expressão desta, pode-se imaginar que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, contudo, menor a semivariância. Os gráficos ou semivariogramas são aplicados para auxiliar na interpolação para gerar, então, mapas da variável em questão, num processo denominado krigagem.

A geoestatística exhibe o nível de dependência espacial da variável em estudo, bem como o alcance de cada amostragem, além das relações entre as diversas variáveis (Grupta et al., 1995, citado por Vettorato, 2003).

As variáveis utilizadas para analisar produtividade e perímetro do tronco de dois clones de seringueira por Roque et al. (2006) apresentaram dependência espacial, de maneira que para a variável produtividade ajustou-se o modelo esférico e para a variável perímetro do tronco ajustou-se o modelo exponencial. O alcance de dependência espacial, ou seja, a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente variou de 6,80 a 8,20m para o clone PB235 e o clone RRIM600, respectivamente, para a produtividade. Já os mapas de krigagem mostraram-se com aspecto muito rendilhado por causa dos baixos valores de alcance.

Outro trabalho de investigação na área florestal utilizando geoestatística foi conduzido por Klein et al. (2007) com intuito de avaliar a altura de ipê-roxo (*Tabebuia avellaneda*), os pesquisadores concluíram que o grau de dependência espacial foi considerado moderado a fraco, também foram feitos mapas de disponibilidade de P e K e mapas de contorno de produtividade.

4.9 O desenvolvimento das árvores, a adubação e o espaçamento

O espaçamento praticado no plantio é importante porque afeta a formação das florestas, seus tratos culturais, a qualidade da madeira, sua extração e, por consequência, os custos de produção. Do ponto de vista energético, as pesquisas precisam ser direcionadas no sentido de caracterizar qual a melhor forma de implantar a floresta, com adubação e espaçamento adequados, sem prejudicar as propriedades relacionadas a esse fim, como é o caso do poder calorífico da madeira. Apesar de haver muita competição entre plantas nos plantios adensados (Rech, citado por Cardoso Júnior, 2004), para o objetivo de produção de biomassa é aceitável e, com os dados do presente trabalho, espera-se contribuir para indicação do melhor espaçamento e adubação para produção de biomassa.

A competição entre as árvores inicia-se quando um único fator de crescimento cai abaixo da demanda de cada planta. Em alguns trabalhos a taxa de crescimento relativo (TCR) é adotada como parâmetro para detectar se ocorreu competição entre as plantas, sendo que o início de uma competição fica caracterizada quando as árvores de menor porte têm TCR menor que o resto da população; outro aspecto a ser considerado é que um aumento na fertilidade proporciona crescimento mais rápido, conseqüentemente, ocorre o adiantamento da taxa de concorrência em plantações florestais (FORD, 1984). Por outro lado, a fertilização aumenta a produção e reduz a alocação de metabólitos para as raízes, proporcionando o crescimento de madeira. É importante a aplicação planejada de adubos no meio agrícola e florestal, especialmente em solos mais arenosos, porque estudos têm comprovado que uma porcentagem baixa dos nutrientes aplicados no solo é realmente absorvida na árvore (FISCHER e BINFLEY, 2000).

Numa avaliação de plantas de *Eucalyptus saligna*, no período que compreendeu dos três aos dez anos de idade, com diferentes espaçamentos e doses de adubação, Berger et al. (2002) observaram que o fator adubação não influenciou significativamente a maioria das variáveis por eles avaliadas; em contrapartida, o espaçamento influenciou, de forma marcante, no crescimento em diâmetro e volume comercial sem casca.

A influencia de diferentes doses de potássio e fósforo para o DAP, altura e volume cilíndrico de *Acacia mearnsii*, aos 61 meses de idade, foi avaliada por Andrade et al. (2004) encontraram aumento nos volumes cilíndricos das árvores em relação à

testemunha tanto na presença de doses crescentes de P e ausência de K quanto nos tratamentos com doses crescentes de potássio e ausência de P. Afirmam que a aplicação em conjunto de P e K foi mais eficiente para ganhos em volume da madeira (m^3/ha), embora a interação fósforo x potássio não tenha sido estatisticamente significativa.

Lourenço et al. (1999) coletaram dados de produção, em peso úmido, de *Ilex paraguariensis* em três anos consecutivos, avaliando respostas em função de dosagens crescentes de potássio nesta cultura. O tratamento sem potássio sempre se mostrou significativamente inferior ao tratamento em que se adotou aplicação de cobertura morta. As doses crescentes anuais de potássio foram indicadas como boa prática silvicultural para este tipo de cultura por causa das colheitas anuais da parte aérea da planta causando forte exportação deste nutriente do sítio de produção. No caso de plantios comerciais com espécies de eucalipto, o solo fica favorecido pelo fornecimento de K pela manutenção da palhada decorrente do sistema de cultivo mínimo.

A adubação fosfatada de *Eucalyptus dunnii* resultou em ganhos de volume cilíndrico arbóreo de 38% a 61% da menor para a maior dose de fósforo aplicada em região de Latossolo Vermelho-Amarelo, no estado do Paraná (ANDRADE et al., 2003).

Plantios de *Eucalyptus grandis* em diferentes locais no estado de São Paulo receberam adubação com NPK e foram avaliados a relação entre teores de nutrientes nas folhas e no solo (BELLOTE e FERREIRA, 1993). Os teores foliares de Ca, S, Fe, Mn e Zn apresentaram baixa correlação com o crescimento das árvores. Por outro lado, uma boa correlação positiva foi encontrada entre teores de N e crescimento das árvores, o mesmo ocorrendo com o P. Isso indicou que em locais de baixa produtividade a população responde mais à aplicação de adubos nitrogenados e fosfatados. Não foram detectadas correlações entre teores de B e Ca com a altura dos eucaliptos, contrariando uma resposta fisiológica esperada, Bellote e Ferreira (1993) explicam que este resultado deve-se a diluição destes elementos no material vegetal analisado. Para o potássio, o aumento de seus teores repercutiu mais quando comparado ao Mg no crescimento em altura de *Eucalyptus grandis*. Os teores de P, K e Al no solo influenciaram o crescimento das árvores, destacando que o aumento da oferta de P e K no solo evidenciaram melhor incremento em plantios de *Eucalyptus grandis* em regiões de menor produtividade assim como se espera ocorrer no presente trabalho.

As aplicações de adubos químicos em plantios florestais podem influenciar a forma e o afilamento das árvores, sendo que a forma é a relação entre o diâmetro e a sua distância do topo da árvore e o afilamento é a taxa de alteração do diâmetro com uma unidade de incremento em altura. Procurando descobrir o efeito de doses crescentes de NPK (10-34-06) na forma e afilamento do tronco de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, Ferreira e Silva (2002) aplicaram doses de 0 a 350g/planta no momento do plantio no *E. grandis* e doses de 0 a 400 g/planta no momento do plantio e ao longo da rotação no *E. saligna*. Na análise de regressão para avaliação do afilamento médio de *E. saligna* considerando apenas diâmetro e altura o R^2 foi de 0,984, semelhante ao ocorrido quando se considerou diâmetro, altura, idade e dose de adubo, por outro lado, ao se considerar apenas o diâmetro, a análise de regressão resultou em R^2 de 0,20. Os autores relatam que, apesar das duas espécies de eucalipto estudadas serem semelhantes, apresentaram afilamentos médios distintos para parcelas com mesmo diâmetro médio. Entretanto ocorreu aumento do afilamento médio do sexto para o oitavo ano de idade, para as duas espécies de eucalipto, variação esta acelerada pela aplicação de fertilizantes. O fator de forma não sofreu influência das doses de adubos porque, segundo Ferreira e Silva (2002), a resposta das adubações foi distribuída uniformemente pelo fuste.

Com objetivo de avaliar a biomassa de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos, no estado do Mato Grosso, Rondon (2006) obteve a maior contribuição do tronco, com 74,57%, seguido dos galhos (18,52%) e folhas (6,91%). Com relação à produção de madeira, destacam-se os espaçamentos 3x2m, 3x3m e 4x3m; sendo encontrado no espaçamento de 3x2m o maior acúmulo de biomassa total. Rondon (2006) ressalta que o espaçamento a ser adotado em um plantio florestal interfere diretamente nos custos de implantação por causa do número de mudas e necessidade de adubação. Ainda concorda com Paiva et al. (2000) ao afirmar que o melhor espaçamento é aquele que produz o máximo de madeira, em tamanho, forma e qualidade, com o menor custo.

Em plantio de *Acacia mearnsii*, o crescimento do diâmetro teve influência direta do espaçamento, com o maior diâmetro encontrado no espaçamento de 3x2m e o menor, no espaçamento de 1x1m, evidenciando um contraste. Já a altura total para esta espécie mostrou pouca diferença. Diante de tais resultados, Schneider et al. (2000) constataram que a densidade da população não afeta, de fato, o crescimento em altura do

povoamento; todavia, uma variável como a área basal é inversamente proporcional ao espaçamento, como foi o de 1x1m da acácia, aos nove anos de idade.

Já em experimentações mais antigas, como o de Coelho et al. (1970), os espaçamentos diferentes resultaram em distintos diâmetros para algumas espécies de eucaliptos estudadas, aos quatro anos de idade. A média das alturas para o espaçamento de 3x2m era de 10,97m e para o espaçamento de 3x1,5, de 10,82m. O mesmo fenômeno ocorrendo para diâmetros, sendo a média de 10,72 cm no espaçamento de 3x2 m, enquanto que no espaçamento de 3x1,5 m era de 9,64 cm.

Também comparando espécies, Garcia et al. (1991) avaliaram o desenvolvimento do *Eucalyptus saligna* e do *Eucalyptus grandis* em diferentes espaçamentos. Para o *Eucalyptus saligna*, dentre os espaçamentos, o de 3x2m foi o melhor e o de 3x1,5m o que resultou em maior produtividade e sobrevivência; embora o *E. grandis* tenha apresentado superioridade nos espaçamentos de 3x1m e de 3x1,5m com relação à produtividade. No caso do *E. saligna*, aos dez anos de idade, perdeu cerca de 50% do número de árvores.

Pode-se considerar na avaliação do efeito do espaçamento para o crescimento de árvores as variáveis como superfície, diâmetro e comprimento da copa porque estão relacionadas com o crescimento e produção de matéria seca das culturas florestais. Nutto et al. (2001) estudaram estes parâmetros em povoamentos de *Pinus elliotti*, no Rio Grande do Sul, sugerindo que o comprimento da copa em relação ao DAP foi o modelo que melhor estimou o espaço vital necessário para se obter um determinado diâmetro esperado.

A produção de matéria seca é outra abordagem de destaque; estudando a variação da produção de biomassa, devido ao espaçamento, do *Eucalyptus camaldulensis* e do *E. pellita* em região de cerrado, Leles et al. (2001) constataram que à medida que as plantas são arranjadas de forma mais adensada, a contribuição das raízes para a matéria seca total vai diminuindo. Estes autores observaram também que as espécies respondem de maneira diferenciada na alocação da biomassa em resposta ao espaçamento de plantio adotado. Em outro trabalho conduzido por Oliveira Neto (2003), a produção de matéria seca, por unidade de área, aos 32 meses de idade, aumentou com a aplicação de níveis crescentes de fertilizantes e diminuiu com o aumento do espaçamento entre plantas. Outro resultado importante é o aumento da biomassa média de madeira contribuindo para a biomassa total com o acréscimo de adubação.

Já sob a ótica da fitopatologia, a fertilização e sua influência para a sanidade de plantas de norway spruce (*Picea abies*) foi investigada por Huber et al. (2009), na referida pesquisa constataram que havia uma redução no incremento das árvores que não eram fertilizadas

Silva (2005) avaliou dois clones de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, aos seis anos de idade, constatando que a maior produção, em volume e biomassa de lenho, ocorreu no espaçamento de 6,0 m²/planta, com valores médios de 212 Mg/ha e 92 Mg/ha e reduções de 10% e 18% na produção para os espaçamentos de 10,5 e 15,0 m²/planta. Entende-se por espaçamento a área útil por planta e o arranjo de plantio como sendo a distância entrelinha e entre plantas. Este trabalho de Silva (2005) mostra que plantios florestais adensados podem produzir maior biomassa, mesmo em rotações mais longas; todavia, na metodologia adotada, quando as plantas foram plantadas com menores distâncias entre plantas, a distância entrelinha era maior. Ainda para Stape (1995), citado por Silva (2005), para um mesmo espaçamento, é possível a utilização de diferentes arranjos de plantio, ou seja, diferentes distancias entrelinhas e entre plantas. Dá-se o nome de retangularidade (R, sendo que $R \geq 1$), à relação entre a maior e a menor destas distancias de cada arranjo. Nesta experimentação com clones, houve a interação significativa clone x arranjo de plantio para as variáveis área basal, volume e percentagem de quebra. Não houve diferença significativa para sobrevivência entre os espaçamentos e arranjos estudados (espaçamentos de 6, 10,5 e 15 m²/planta e arranjos de 3, 6 e 9 m estabelecidos para as entrelinhas), todos apresentaram, aos 6 anos de idade, valores maiores que 91%.

Ao avaliar crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* Rodrigues (2009) observou que a aplicação de Cu e Zn em vários tipos de solos do bioma cerrado não influenciou positivamente no crescimento das mudas; o autor explica que as espécies do gênero *Eucalyptus* têm baixa demanda por micronutrientes e facilidade de absorção pelo seu sistema radicular.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Três Sinos, localizada na Rodovia Gastão dal Farra, km 5, no município de Botucatu, estado de São Paulo, numa área de aproximadamente 5,8 ha, sendo a classe de solo Latossolo Vermelho Amarelo, de acordo com o levantamento realizado por Vettorato (2003), com textura média. O local em questão tem sido preparado com técnicas de cultivo mínimo do eucalipto, ou seja, preparo somente da linha de plantio com adubação individual das mudas.

A área experimental está localizada numa altitude aproximada de 875 m e situa-se entre as longitudes 48°24'43" W e 48°26'21" W e entre as latitudes 22°58'10" S e 22°59'25" S, estas coordenadas foram obtidas através dos mapas da região disponível no Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP. A área experimental está posicionada numa região de drenagem do rio Pardo, por isso pertence à bacia do Paranapanema. O clima predominante no município, segundo os critérios adotados por Koppen é Cfa, clima mesotérmico, com temperaturas médias superiores a 10°C, cuja temperatura do mês mais quente é igual ou superior a 22°C e o índice pluviométrico anual está em torno de 1516 mm. A seguir são apresentados, nas figuras 1 e 2, os mapas utilizados na localização e classificação do solo da área do experimento.

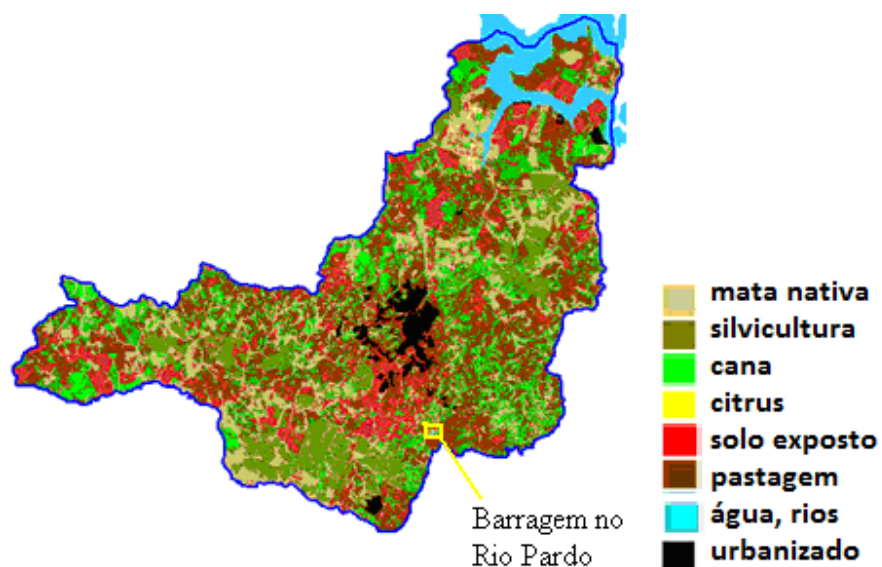


Figura 1. Mapa de ocupação do solo botucatuense (adaptado de Peres, 2006).

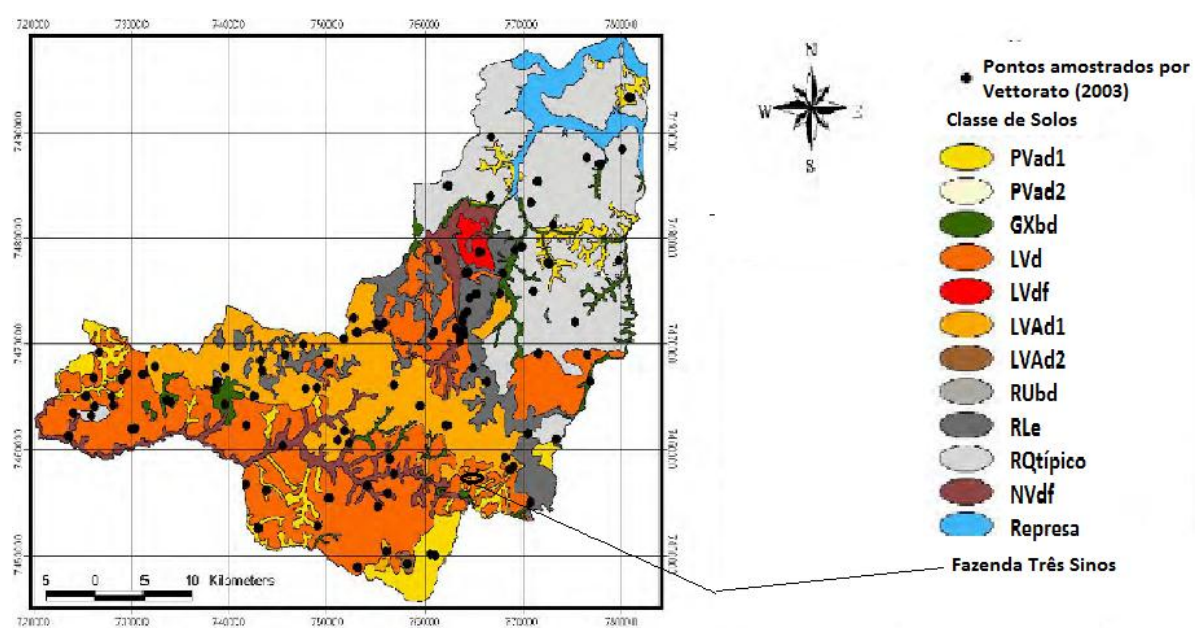


Figura 2. Mapa de classes de solos no município de Botucatu (adaptado de Vettorato, 2003).

A Fazenda Três Sinos está bem próxima da divisa com o município de Pardinho e no mapa de Peres (2006) é possível localizar a barragem no Rio Pardo, a fazenda foi localizada e identificou-se a classe de solo.

5.2 Levantamento histórico preliminar da área

Por meio de fotos aéreas do município de Botucatu, disponibilizadas pelo Laboratório de Fotointerpretação, do Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP, foi possível observar que, em fotos da área do estudo de 1962, a cobertura do solo era predominantemente de vegetação nativa do tipo Campos Sujos e Cerrado. Em 1972, plantava-se nesta área, *Pinus* sp.; nas aerofotos de 2000 observou-se os plantios maciços de *Eucalyptus* spp., que têm sido cultivados a, aproximadamente, vinte anos, segundo informação pessoal do atual gerente da Fazenda Três Sinos.

5.3 Amostragem do solo

A amostragem foi realizada antes da implantação do experimento e consistiu em vinte pontos de coleta de solo para a determinação de nutrientes e da umidade no dia da amostragem da resistência à penetração utilizando-se a Unidade Móvel de Amostragem do Solo (Figura 3), de tal forma que tivesse um ponto de amostragem em cada parcela, nas camadas de 0-20 cm e de 20-40 cm para análises químicas e físicas mais quatro pontos na região central da área experimental, nas mesmas profundidades.



Figura 3. Ferramenta da Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) utilizada para obtenção de anéis com amostras para a determinação de atributos do solo.

5.4 Resistência à penetração

A resistência à penetração foi mensurada, antes do plantio, utilizando-se a UMAS (Unidade Móvel de Amostragem de Solo), desenvolvida pelo Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais, na Faculdade de Ciências Agronômicas, da Universidade Estadual Paulista (NEMPA/FCA/UNESP). A UMAS foi equipada com um sistema informatizado de coleta e armazenamento de dados desenvolvido por Guerra e Lanças (2006) composto por sensores analógicos (célula de carga e potenciômetro) e por um receptor GPS (Sistema de Posicionamento Global). O potenciômetro determinou a profundidade amostrada e a célula de carga registra a força normal aplicada na haste do penetrômetro. O GPS instalado na UMAS forneceu as coordenadas latitude e longitude (graus, minutos e décimos de minuto) e a hora da amostragem de cada ponto. O coletor do sistema registrou os dados por meio de pulsos elétricos (volts) que foram convertidos para força (KPa) através de modelos matemáticos dos sensores.

O penetrômetro hidráulico-eletrônico (Figura 4) foi montado em uma carreta rodoviária, a UMAS, para facilitar o deslocamento até o campo, é composto por um pistão hidráulico acionado pelo sistema hidráulico do trator (controle remoto) para obtenção da pressão necessária para cravar o cone na direção normal ao solo. Estes parâmetros obtidos são utilizados para se realizar as análises estatísticas e de variabilidade espacial dos atributos do solo.



Figura 4. Penetrômetro hidráulico-eletrônico.

Para determinação da resistência à penetração foi feita a coleta de dados a cada 20m, seguindo as linhas de plantio e cerca de 10m de distância entre os pontos no sentido transversal a linha plantio por toda a área experimental, antes da subsolagem e do plantio, sendo este procedimento fundamental para elaboração dos mapas de isocompactação.

5.5 Disposição do experimento no campo

Em uma área de 5,8 ha foram plantadas mudas de clones do híbrido de *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla*, destinado à colheita precoce para produção de briquetes usados na geração de bioenergia, que receberam adubações de plantio e de cobertura.

Os cinco espaçamentos entre plantas ficaram nos valores de 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m e a distância entre as linhas de plantios fixadas em 2,80m para todos os tratamentos.

Os seguintes códigos foram fixados nas parcelas:

A = espaçamento de 2,8 x 0,5 m

B = espaçamento de 2,8 x 1,0 m

C = espaçamento de 2,8 x 1,5 m

D = espaçamento de 2,8 x 2,0 m

E = espaçamento de 2,8 x 2,5 m

1 = dosagem 1: 70 g/planta no plantio de NPK (6-30-6), 25 g/planta aos 60 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%), 35 g/planta aos 140 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%) e 50 g/planta aos 360 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%);

2 = dosagem 2: 140 g/planta no plantio de NPK (6-30-6), 50 g/planta aos 60 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%), 70 g/planta aos 140 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%) e 100 g/planta aos 360 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%);

3 = dosagem 3: 280 g/planta no plantio de NPK (6-30-6), 100 g/planta aos 60 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%), 140 g/planta aos 140 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%) e 200 g/planta aos 360 dias após o plantio com NPK (20-0-20) adicionados os micronutrientes Zn (0,5%) e B (0,3%);

As parcelas receberam os seguintes códigos que foram distribuídos por sorteio: A1; A2; A3; B1; B2; B3; C1; C2; C3; D1; D2; D3; E1; E2 e E3 e esquematizados na figura 5.

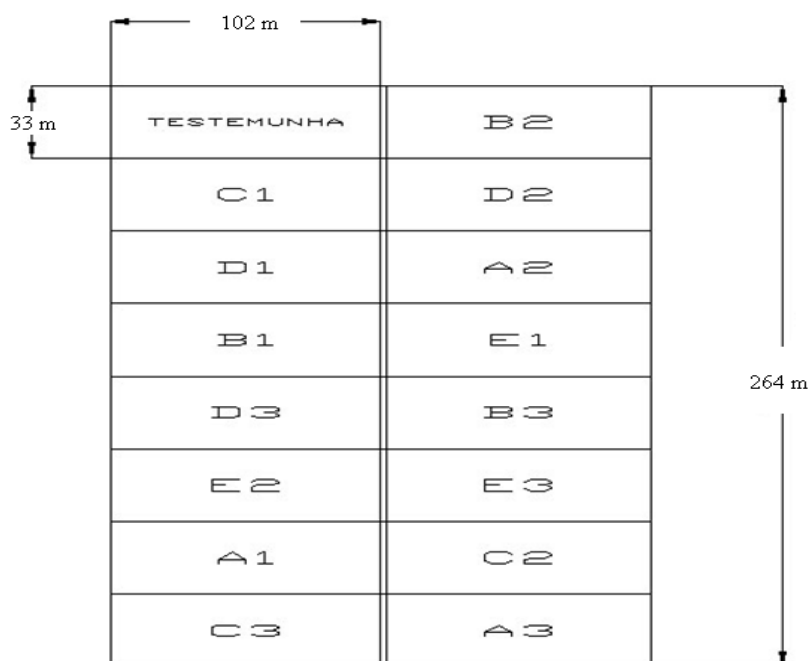


Figura 5. Esquema da distribuição das parcelas na área experimental.

5.6 Caracterização física e química do solo

5.6.1 Densidade de partículas, densidade do solo e porosidade total

As densidades e a porosidade foram determinadas a partir de amostras coletas em cinco perfis do solo nas profundidades de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm e 90-120 cm, de forma que os perfis foram considerados as repetições para obtenção dos valores médios de cada atributo físico analisado.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico através da relação entre a massa de solo e o volume de solo seco. Foi utilizado um balão de 50 ml com 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE), cujo volume é completado com álcool etílico, obtendo-se o volume de solo pela diferença entre o volume do balão e o volume de álcool (EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo ou densidade aparente foi obtida pelo método do anel volumétrico e a relação entre densidade do solo e densidade de partículas gerou a porosidade total (EMBRAPA, 1979).

A porosidade foi calculada pela relação das duas densidades.

5.6.2 Umidade do Solo

A umidade do solo foi determinada pela diferença entre peso úmido e peso seco das amostras de solo coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm; a amostragem foi constituída por três pontos, considerados como repetições, em cada parcela experimental de forma aleatória, após cerca de dez dias sem chuvas na área experimental, no dia 26 de abril de 2010.

5.6.3 Textura do solo

A textura do solo foi obtida pela análise das amostras coletas em cinco perfis do solo nas profundidades de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm e 90-120 cm, de forma que os perfis foram considerados as repetições para obtenção dos valores médios por profundidade. A textura foi analisada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1979) e utilizada para compor a caracterização física do solo assim como a classificação do solo.

5.6.4 Determinação de macro e micronutrientes

As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm, utilizando-se a UMAS (Unidade Móvel de Amostragem do Solo), para a determinação dos macronutrientes, dos micronutrientes e do teor de matéria orgânica. As análises foram executadas pelo Departamento de Recursos Naturais/Ciência do Solo, da FCA/UNESP, seguindo a metodologia proposta por Raij et al. (2001).

As Tabelas 1, 2 e 3 foram utilizadas para fazer uma interpretação dos valores médios de cada atributo químico do solo obtido na análise descritiva para compor o diagnóstico baseado na classificação proposta pelo Instituto Agrônomo de Campinas.

Tabela 1. Classificação dos teores de macronutrientes no solo segundo o IAC (2009)

Teor	K ⁺ (mmolc/dm ³)	P resina (mg/dm ³)	Ca ²⁺ (mmolc/dm ³)	Mg ²⁺ (mmolc/dm ³)
baixo	0,8 -- 1,5	3 -- 5	0 -- 3	0 -- 4
médio	1,6 -- 3,0	6 -- 8	4 -- 7	5 -- 8
alto	3,1 -- 6,0	9 -- 16	> 7	> 8

Tabela 2. Classificação da acidez (pH) e da saturação de bases (V%) segundo o IAC (2009)

Teor	pH (CaCl ₂)	V %
baixo	4,4 -- 5,0	26 -- 50
médio	5,1 -- 5,5	51 -- 70
alto	> 5,6	> 71

Tabela 3. Classificação dos teores de micronutrientes (mg/dm³) segundo o IAC (2009)

Teor	B	Cu	Fe	Mn	Zn
baixo	0 -- 0,2	0 -- 0,2	0 -- 4	0 -- 1,2	0 -- 0,5
médio	0,21 -- 0,60	0,3 -- 0,8	5 -- 12	1,3 -- 5,0	0,6 -- 1,2
alto	> 0,60	> 0,8	> 12	> 5,0	> 1,2

5.7 Avaliação do crescimento da floresta

5.7.1 Coleta de dados

O acompanhamento do desenvolvimento das mudas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* foi realizado por meio de mensurações mensais do diâmetro, com um paquímetro digital (Figura 6B), e da altura, utilizando-se régua graduada (Figura 6A) até o nono mês de idade e, a partir do décimo mês, com clinômetro digital (Figura 6C). Os

dados coletados foram tratados para obter-se o incremento em função dos fatores espaçamento e níveis de adubação. Os procedimentos de campo consistiram na escolha de trinta árvores centrais de cada parcela, metodologia adaptada de Leles et al. (2001).



Figura 6. Régua graduada utilizada na medição da altura das mudas (A), até os nove meses de idade, paquímetro digital para mensuração do diâmetro (B) e clinômetro digital (C) para medições de altura a partir do décimo mês.

5.7.2 Diâmetro, Altura e Volume

As medições do diâmetro do colo foram realizadas mensalmente e, a partir dos oito meses de idade, passaram a ser medidos, de forma adicional, o DAP (diâmetro a altura do peito). O diâmetro do colo foi importante para a avaliação do incremento das árvores desde o primeiro mês de idade. Em compensação, as medições do DAP são imprescindíveis

porque é o elemento mais importante medido em uma árvore, pois fornece a base para outros cálculos dendrométricos (SOARES et al., 2006).

As mensurações de altura foram executadas desde o primeiro mês de idade para a determinação do incremento em função dos tratamentos estudados, descontando-se 10 cm da base que foram considerados com região de toco.

Com os dados de DAP e altura total de cada parcela experimental, aos 12 meses após o plantio, foi calculado o volume cilíndrico corrigido pelo fator de forma 0,63 obtido em inventário exploratório de um povoamento do mesmo clone de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, na Fazenda Três Sinos. A altura total utilizada para o cálculo do volume foi aquela lida no campo descontando-se 0,10 m de toco. O cálculo de volume foi realizado pela fórmula matemática do volume de um cilindro, multiplicado pelo fator de forma, explicado por CAMPOS e LEITE (2006).

5.8 Análises estatísticas

5.8.1 Solo e geoestatística

Vários parâmetros foram adotados na análise dos atributos do solo, como os coeficientes de assimetria e curtose, que são parâmetros descritivos que permeiam a estatística clássica e a geoestatística. A assimetria é o grau de afastamento que uma distribuição apresenta no seu eixo de simetria. Este afastamento pode acontecer do lado esquerdo ou lado direito da distribuição, chamado de assimetria negativa e positiva, respectivamente (ACCIOLY, 2009). A curtose estabelece o grau de achatamento da distribuição ou o quanto uma curva de frequência será achatada em relação à curva normal de referência (PINTO, 2009).

A geoestatística foi uma ferramenta adicional no estudo de atributos do solo espacialmente correlacionados, exatamente porque incorpora a possibilidade de avaliar a variabilidade espacial, ajudando na interpretação e definição de inferências quanto ao seu tamanho (ROQUE, 2003). Desta forma, espera-se verificar a ocorrência de relação entre as amostras, pois através de semivariogramas, que foram utilizados neste estudo, mede-se a variabilidade das diferenças entre as realizações da variável aleatória de interesse, de tal forma

que quanto menor a semivariância, menor a variação dessas diferenças. Esse embasamento é suporte para a confecção de mapas de atributos do solo na área do experimento.

5.8.2 Dendrometria e inventário

O experimento foi conduzido seguindo o delineamento inteiramente casualizado com dois fatores, com três doses de adubação, cinco espaçamentos e trinta repetições; sendo que as repetições consistiram de trinta árvores amostradas no centro de cada parcela com a finalidade de evitar-se o efeito de borda. As curvas de regressão foram adotadas para se determinar diferenças no crescimento e produção das plantas em termos de altura total e de diâmetro do colo. Estatísticas do diâmetro foram realizadas para se obter a área basal e o respectivo incremento em termos de área ocupada por madeira. Os dados de DAP (diâmetro a altura do peito) e de altura relativos ao décimo segundo mês de idade foram avaliados pelas análises descritiva e de variância.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resistência à penetração

Os dados foram gerados à partir de 126 pontos amostrados na área experimental utilizando penetrômetro hidráulico-eletrônico. No dia da amostragem a umidade do solo estava em 9,02% e 7,47% para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente. Os dados de resistência à penetração passaram por um processo de limpeza através do Microsoft Excel, no qual foi feita a subdivisão dos valores em cinco faixas de profundidade (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e >40 cm) considerando o valor médio em cada faixa. Foi feita a conversão das coordenadas de grau para UTM no programa computacional Track Maker para possibilitar a entrada no GS+ para as posteriores análises geoestatísticas. A Tabela 4 mostra os resultados da análise descritiva.

Tabela 4. Resultados da análise descritiva dos dados de resistência à penetração (kPa)

PR (cm)	Análise descritiva							
	M	DP	VAR	MIN	MAX	AS	CT	CV
0-10	955,06	499,14	249138,22	118,00	4239,00	2,35	13,27	52,26
10-20	1663,75	514,50	264731,10	694,00	3313,00	0,45	0,10	30,92
20-30	1687,56	428,74	183818,07	449,00	3193,00	0,77	1,41	25,41
30-40	1454,97	335,10	112293,91	584,00	2583,00	0,67	1,17	23,03
>40	1344,19	372,99	139125,82	406,00	3120,00	1,39	4,42	27,75

PR: profundidade, M: média, DP: desvio-padrão, VAR: variância, MIN: valor mínimo, MAX: valor máximo, AS: coeficiente de assimetria, CT: coeficiente de curtose, CV: coeficiente de variação.

De acordo com Montanari et al. (2008) a variação dos dados, representados pelo coeficiente de variação (CV), podem ser avaliados através do seguinte critério: valores de CV menores ou iguais a 12 correspondem à baixa variação, valores entre 12 e 24 referem-se à média variação e CV maiores ou iguais a 24 estão relacionados aos dados com alta variação. Na Tabela 4 pôde ser observado que apenas os valores de resistência à profundidade de 30-40 cm apresentam grau médio de variação enquanto que no restante das faixas de profundidade ocorre alto grau de variação.

A distribuição dos valores está próxima da normal porque os resultados de mediana estão relativamente próximos da média estimada, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5. Média, mediana e intervalo de confiança do Índice de Cone (IC) com $\alpha = 0,05$

PR (cm)	Média	Mediana	Nº observ.	IC (kPa)
0-10	955,54	910,18	126	177,78
10-20	1664,24	1614,11	126	102,08
20-30	1688,07	1671,75	126	260,99
30-40	1455,47	1415,08	126	224,51
>40	1344,70	1293,79	126	218,22

PR: profundidade.

Na Figura 7 estão apresentados os valores médios de resistência à penetração (KPa) por faixa de profundidade e diferenciados estatisticamente pelo intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).

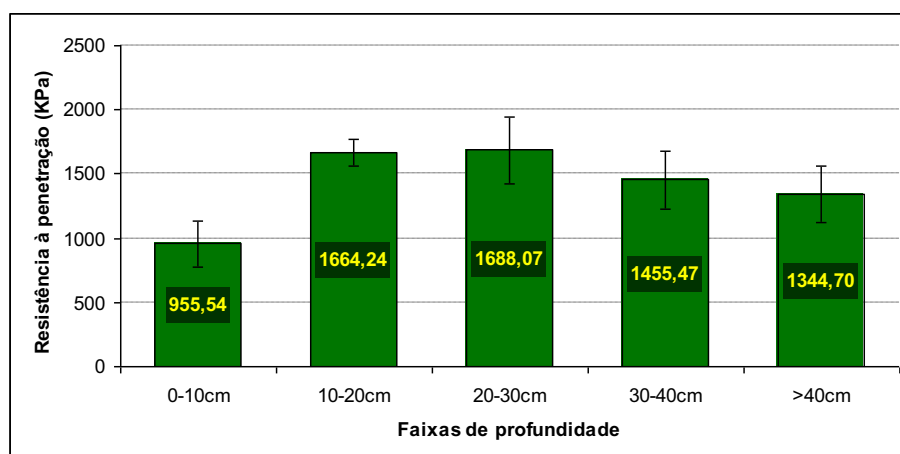


Figura 7. Valores médios de resistência à penetração (índice de cone) com respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha=0,05$).

O gráfico da Figura 7 mostra que não houve diferença entre as profundidades abaixo de 10 cm, porém ocorreu uma tendência de comportamento semelhante do solo nas profundidades 10-20 cm e 20-30 cm, assim como no par 30-40 cm e >40 cm. O valor de 1688,07 kPa na camada intermediária leva a considerar que os resultados deste trabalho concordam com Dedeczek et al. (2000), que encontraram maiores valores de resistência à 20 cm de profundidade, Martins et al. (2002) detectaram maiores valores de resistência nas profundidades de 20 cm e 40 cm e resultados bastante semelhantes aos encontrados por Cardoso et al. (2008) em área de plantio direto em Argissolo, no qual encontraram maiores resistências nas camadas de 10-20 cm (1675,4 kPa) e de 20-30 cm (1796,0 kPa). Lanças et al. (2005b) salientam que o incremento da compactação nas profundidades de 10-20 e 20-30 cm pode ser causado pelo descarregamento do peso de equipamentos de preparo do solo.

Na Tabela 6 estão expostos os parâmetros geoestatísticos, observando-se que os alcances estimados estão sempre acima da distância entre as linhas de amostragem, que foi de 10 m, seguindo-se a linha de plantio e 20 m entre cada ponto amostrado na linha.

Essa definição no campo ocorre por causa da presença intensa de tocos. Isso demonstra que a malha teórica (10x20 m) aplicada na metodologia de amostragem foi suficiente para detectar a variabilidade do atributo físico do solo em estudo.

Tabela 6. Resultados das análises geoestatísticas do índice de cone

Profundidade (cm)	Análises geoestatísticas					
	Modelo	Efeito pepita	Patamar	Alcance	Proporção	R ²
0-10	esférico	1900	241700	15,20	0,99	0,31
10-20	gaussiano	25800	253200	14,89	0,90	0,51
20-30	gaussiano	28200	183000	15,58	0,85	0,56
30-40	gaussiano	100	113700	18,87	1,00	0,79
>40	gaussiano	100	142700	14,89	1,00	0,57

R²: coeficiente de determinação, Efeito Pepita (%²), Patamar (%²) e Alcance (m).

Para a avaliação do grau de dependência espacial da resistência à penetração no solo florestal, na Tabela 6, utilizou-se a proporção, que corresponde à razão entre C (diferença entre o patamar e o efeito pepita) e Co+C (patamar). Adotou-se os critérios de classificação propostos por Zimback (2001) que estabelecem que a proporção menor ou igual a 0,25 é resultado de fraco grau de dependência, entre 0,25 e 0,75, média dependência e, maior ou igual a 0,75, forte grau de dependência espacial. Visto que todos os resultados de proporção apresentados na Tabela 6 estão inclusive, acima de 0,85, pode-se inferir que a dependência espacial é muito forte.

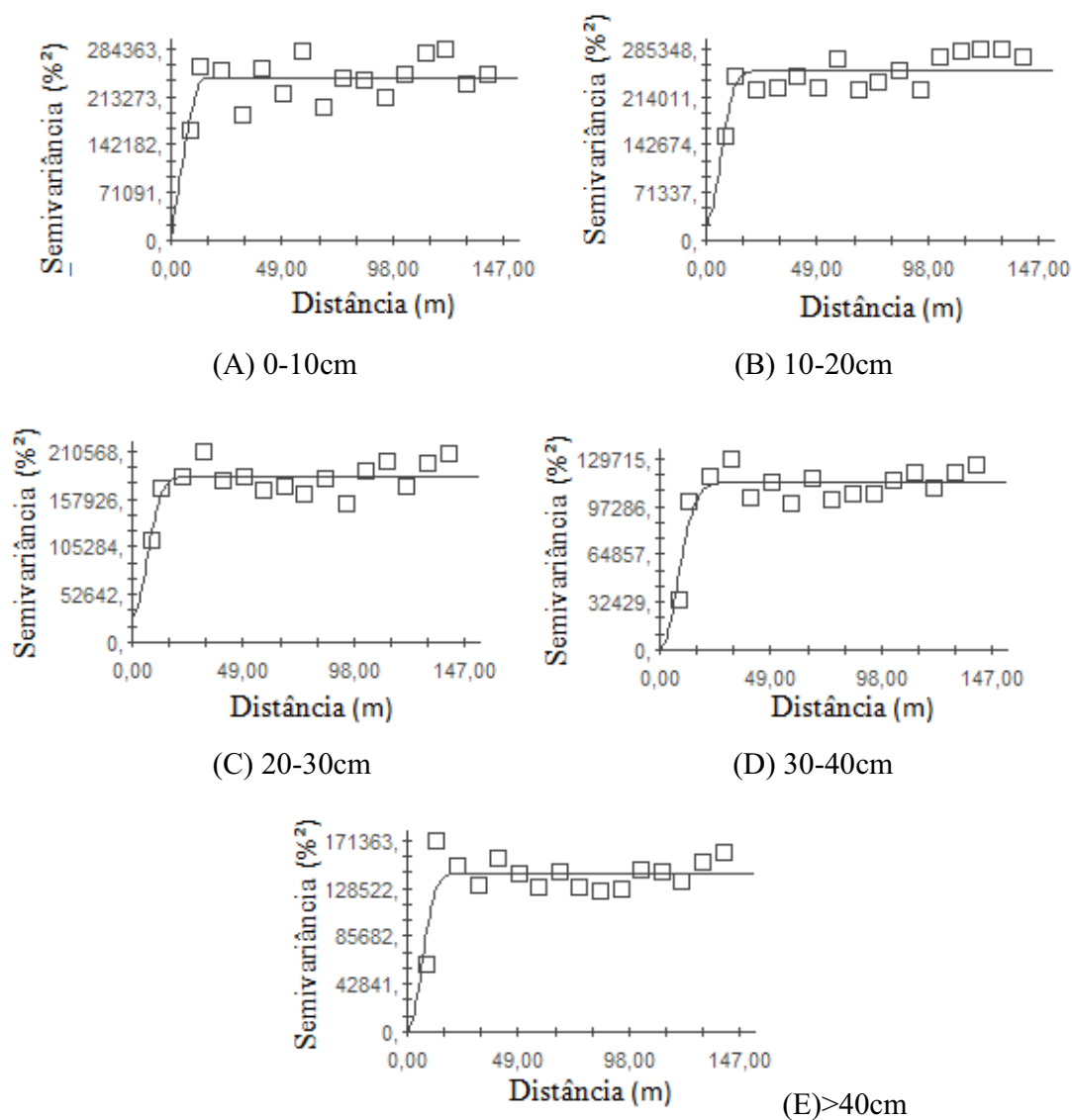


Figura 8. Semivariogramas da resistência à penetração nos quais o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão valores de semivariância (%²).

Em todos os semivariogramas ocorreu o patamar (C_0+C), como pode ser verificado na figura 8. O modelo matemático adotado foi o gaussiano, com exceção da profundidade de 0-10 cm, na qual o melhor modelo foi o esférico, apesar de ter sido o modelo em que se obteve maior dificuldade de ajuste visto o R^2 de apenas 0,31 (Tabela 6).

Com o correto ajuste matemático dos modelos que melhor explicavam a distribuição espacial foi possível realizar uma interpolação no GS+ para geração de mapas de isocompactação de cada faixa de profundidade avaliada (Figuras 9 a 13). As coordenadas estão no sistema UTM, em metros, e localizam-se na zona 22k.

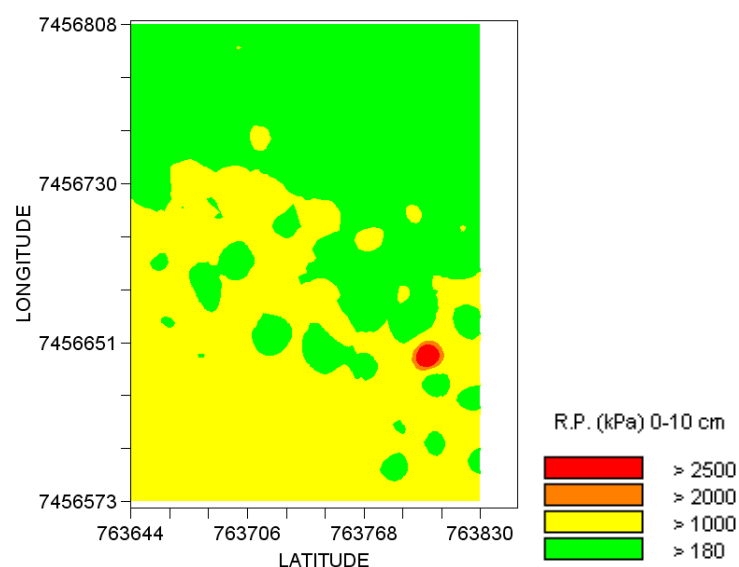


Figura 9. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 10 cm.

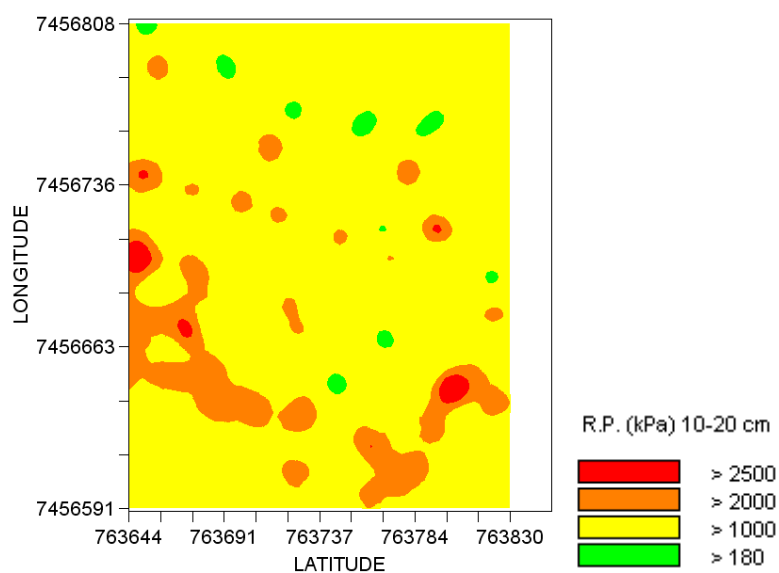


Figura 10. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 10 a 20 cm.

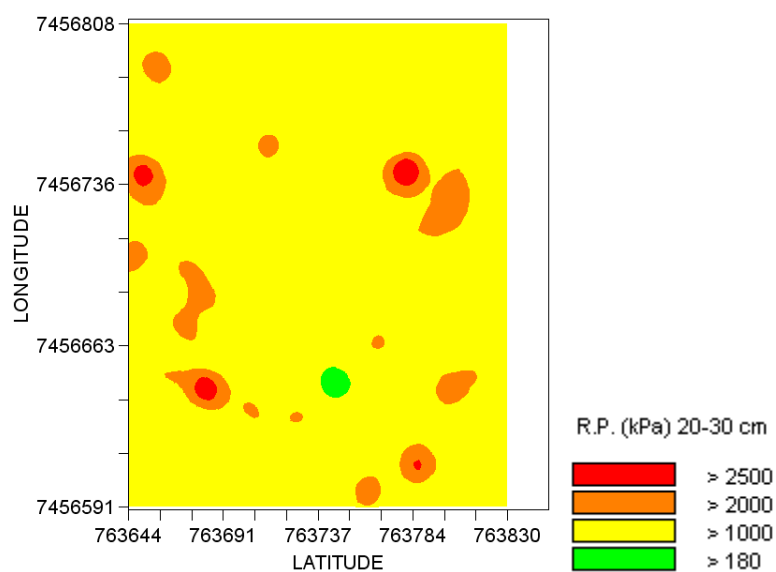


Figura 11. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 20 a 30 cm.

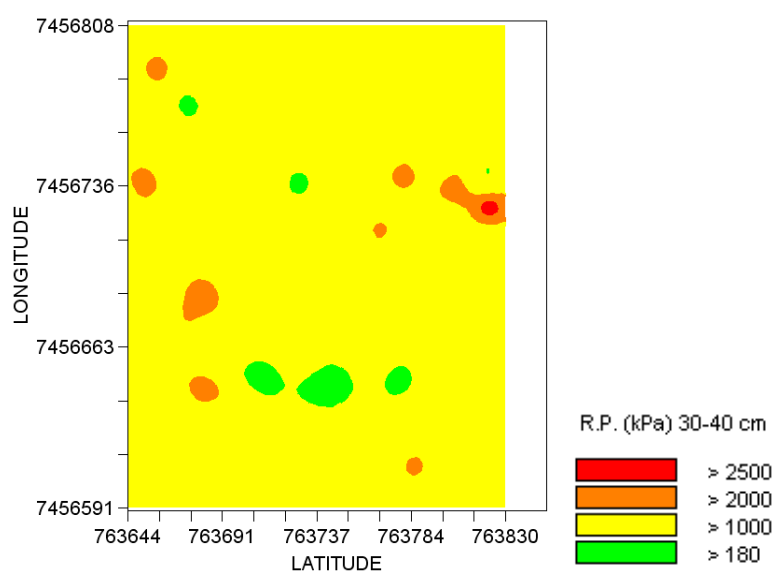


Figura 12. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 30 a 40 cm.

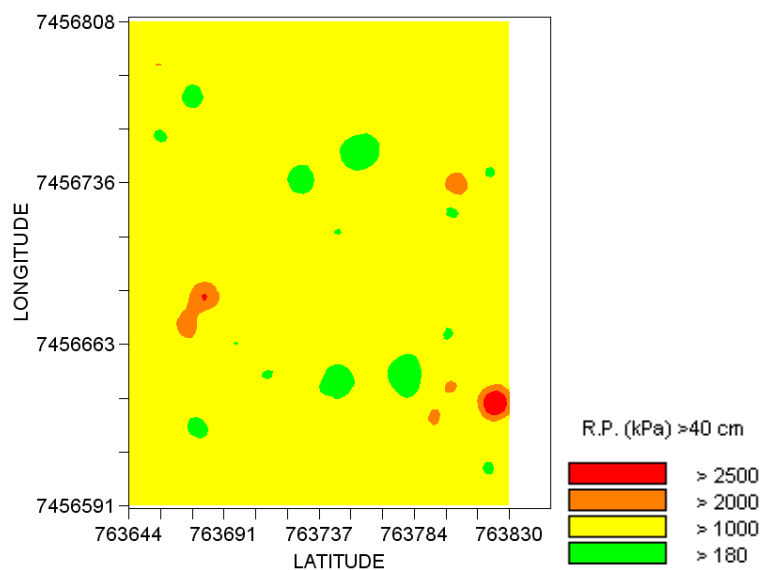


Figura 13. Mapa de isocompactação do solo à profundidade maior que 40 cm.

Os mapas apresentados da Figura 9 até a 13 mostram que na área avaliada não ocorrem maiores problemas com qualquer tipo de impedimento físico do solo para culturas florestais como o eucalipto haja visto que a literatura tem recomendado 2 MPa como um valor crítico, valor este raro nos resultados apresentados pelos mapas originados da interpolação pela krigagem.

6.2 Características físicas do perfil do solo

O perfil do solo (Figura 14) foi avaliado até a profundidade de 120 cm, nas faixas de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm e 90-120 cm. Os parâmetros físicos foram obtidos nos laboratórios de Dinâmica do Solo e de Mecânica do Solo do Departamento de Engenharia Rural da FCA-Unesp. Os parâmetros do solo foram determinados (densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total) utilizando-se as metodologias propostas pela EMBRAPA (1979).



Figura 14. Perfil do solo avaliado.

Os valores médios de densidade do solo (Figura 15) foram de $1,49 \text{ g.cm}^{-3}$, $1,48 \text{ g.cm}^{-3}$, $1,42 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ nos intervalos de profundidade de 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm e 90-120 cm, respectivamente, seguidos pelos seguintes intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$): 0,045; 0,023; 0,068 e 0,075. Na Figura 15 é possível notar que não houve diferença estatística dos valores de densidade do solo em função da profundidade. Os valores de densidade do solo, em todas as faixas de profundidade estão entre 1,2 e $1,9 \text{ g/cm}^3$ o que lhe confere a característica de solo de textura mais arenosa (Reinert e Reichert, 2006).

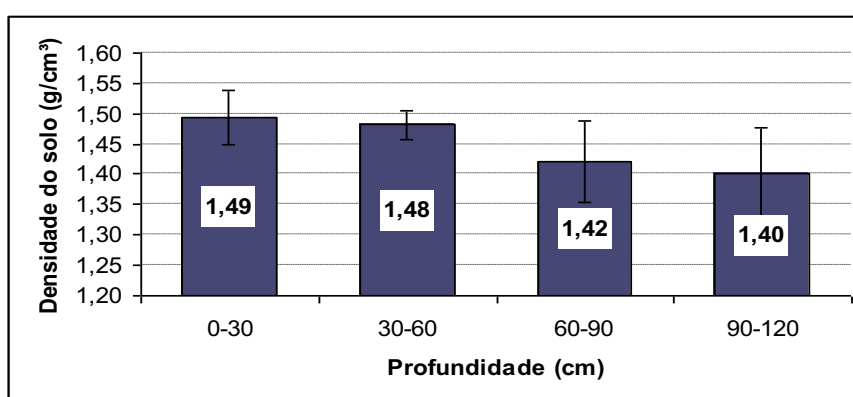


Figura 15. Gráfico com valores médios de densidade do solo (g/cm^3) em quatro faixas de profundidade no perfil, com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).

A umidade foi obtida por meio da diferença entre os pesos úmido e seco das amostras coletadas em cada tratamento após um período de cerca de dez dias sem chuva na área experimental, apresentando-se os resultados na Tabela 7.

Tabela 7. Análise de variância da umidade do solo

Efeito	G.L.	S.Q.	Q.M.	F ($\alpha=0,05$)	p-valor
E	4	8,84	2,21	1,13	0,35
A	2	33,69	16,85	8,64*	0,00
P	1	30,51	30,51	15,65*	0,00
E x A	8	31,47	3,93	2,02	0,06
E x P	4	2,81	0,70	0,36	0,84
A x P	2	9,86	4,93	2,53	0,09
E x A x P	8	11,18	1,40	0,72	0,68
Resíduo	59	115,04	1,95		
Total	88	243,40			

E: espaçamento; A: adubação; P: profundidade; E x A: interação espaçamento e adubação; E x P: interação espaçamento e profundidade; A x P: interação adubação e profundidade; E x A x P: interação espaçamento, adubação e profundidade. * Efeitos significativos, ao nível de 5% de probabilidade.

Apenas os fatores profundidade e adubação foram significativos para a umidade do solo, sendo que a umidade média na profundidade de 0-20 cm foi distinta da profundidade de 20-40 cm. Com relação ao fator adubação, não houve diferença das umidades das parcelas com dose 1 e com dose 2, já as parcelas com dose 3 foram diferentes destas outras, com as doses 1 e 2 (Figuras 16 e 17). Ou seja, nas parcelas com dose três de adubação, as árvores podem ter desenvolvido maior copa, culminando em maior aporte de folhas e galhos para o solo além de, provavelmente, ter diminuído a evaporação da água do solo por meio da formação de um microclima mais úmido.

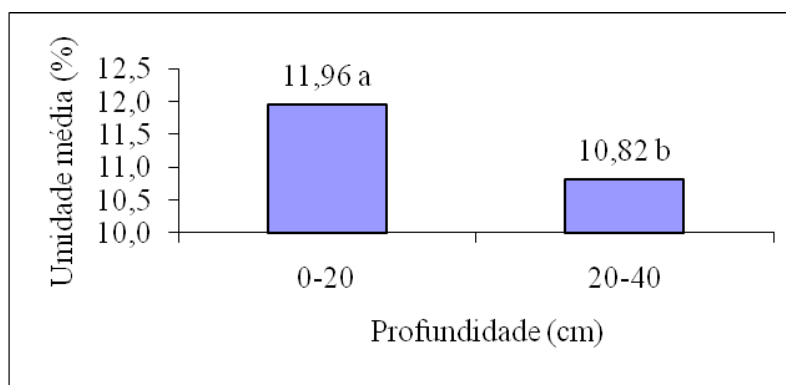


Figura 16. Umidade do solo em função da profundidade.

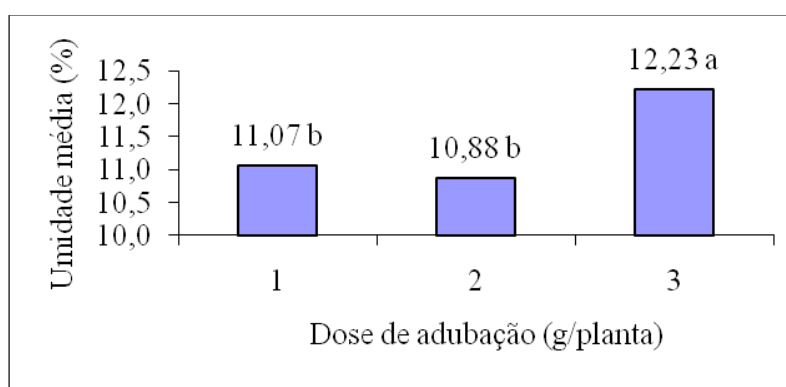


Figura 17. Umidade do solo em função da adubação

Os dados de densidade de partículas foram obtidos pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1979) e são apresentados na Figura 18. Os valores médios de densidade de partículas foram de 2,73 g.cm⁻³, 2,80 g.cm⁻³, 2,68 g.cm⁻³ e 2,63 g.cm⁻³ nos intervalos de 0-30, 30-60, 60-90 e 90-120 cm de profundidade, respectivamente, seguidos pelos intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$) de 0,054; 0,087; 0,054 e 0,042.

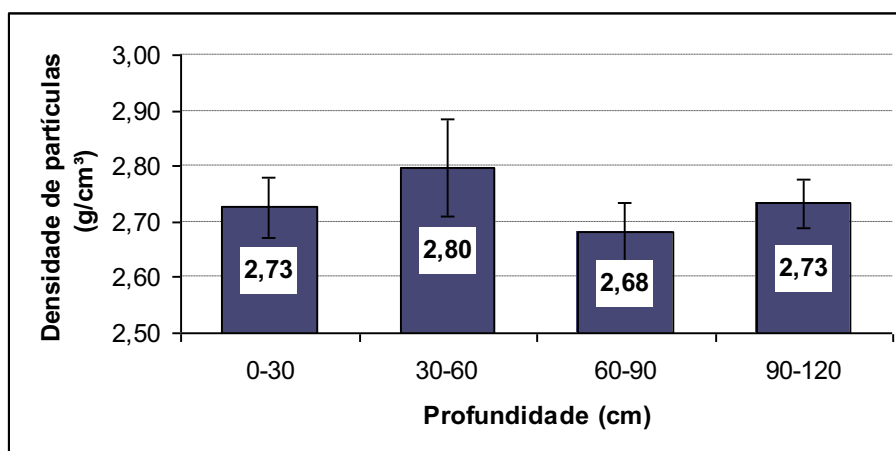


Figura 18. Valores médios de densidade de partículas (g/cm^3) nas quatro faixas de profundidade amostradas no perfil do solo com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).

A densidade de partículas foi um parâmetro que não apresentou nem diferença estatística, nem tendência entre as profundidades pelo perfil do solo. Pela relação entre densidade do solo (aparente) e densidade de partículas (real) foi possível obter a porosidade do solo nas diferentes profundidades como é apresentado na figura 17.

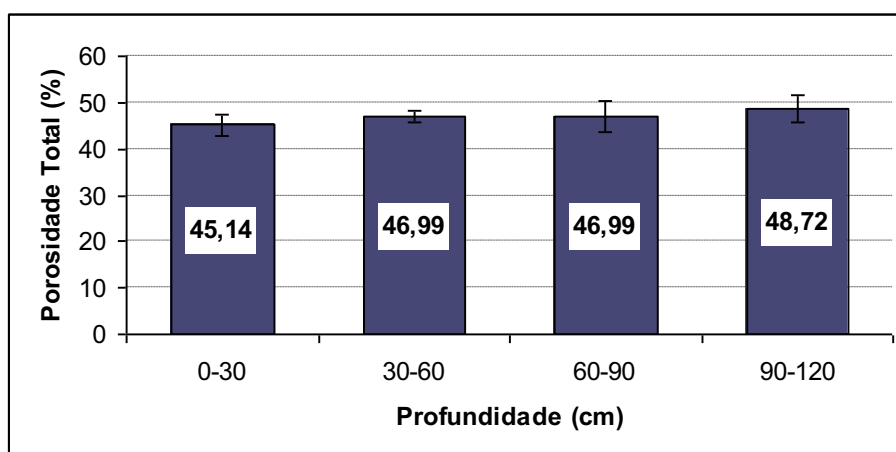


Figura 19. Valores médios de porosidade total (%) nas quatro faixas de profundidade amostradas no perfil do solo com as respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).

Os valores médios da porosidade total foram de 45,14; 46,99; 46,99 e 48,72 % nas faixas de 0-30, 30-60, 60-90 e 90-120 cm, com os intervalos de confianças de 2,28; 1,37; 3,22 e 3,04. A não significância da diferença entre as profundidades para a

porosidade total do solo é clara, todavia os valores médios indicam que as faixas intermediárias de profundidade podem ter porosidade semelhante e as camadas mais profundas do solo, uma maior porosidade. A maior acomodação das partículas do solo nas camadas mais superficiais devido às atividades de manejo do solo e colheita florestal pode explicar este resultado.

A caracterização física do solo, mais especificamente, a análise textural em profundidade é importante para a classificação do solo EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1979). Na Figura 20 estão algumas imagens que ilustram a diferença de cor entre as diferentes faixas de profundidades, 0-30, 30-60, 60-90 e 90-120 cm, analisadas no perfil do solo.

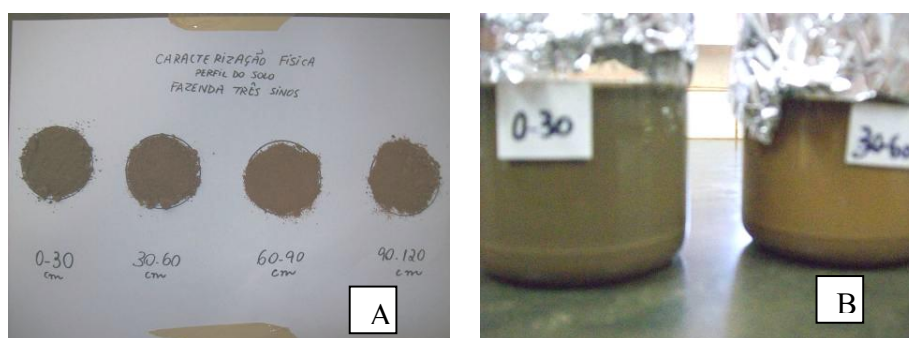


Figura 20. Diferentes tonalidades de cores na amostragem em profundidade. Na imagem A, as amostras do solo seco ao ar, em B, o solo em repouso com solução de NaOH (0,1 N) para posteriores análises texturais.

Na Figura 20-B é possível observar o efeito dispersante do hidróxido de sódio fazendo com que o material arenoso do solo fique na parte inferior do recipiente e a argila fique dispersa na parte superior.

Os resultados da análise textural estão apresentados na Figura 21 e foi feita uma comparação entre as diferentes profundidades pelo intervalo de confiança com α igual a 0,05.

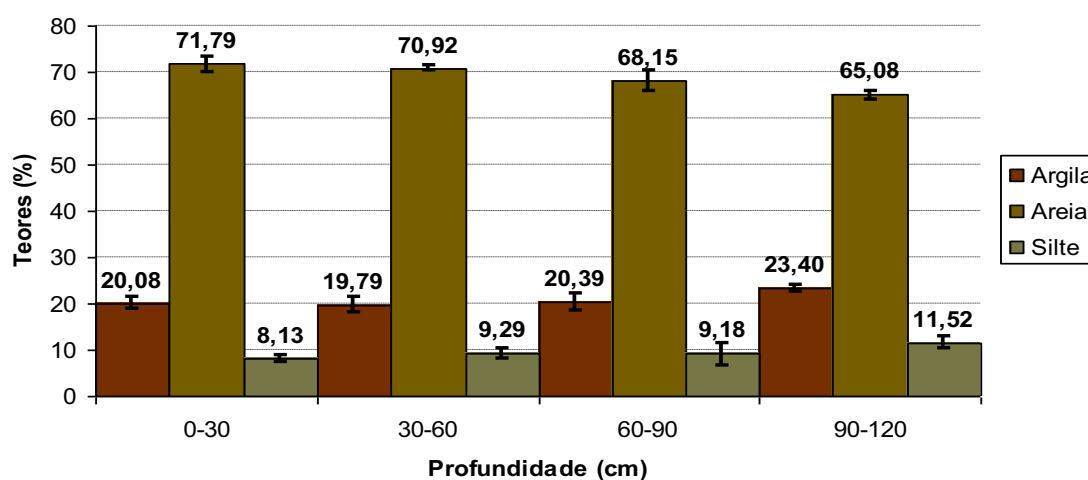


Figura 21. As médias dos valores (%) de argila, areia e silte nas diferentes faixas de profundidade com respectivas barras de intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$).

Nota-se que não ocorre uma diferença significativa entre os teores de argila e a relação textural (B/A) não foi suficiente para caracterizar a presença de B textural na área do experimento. Esta análise textural foi fundamental para se definir que o solo é de textura média, ou seja, teores de argila entre 15 e 35% e teores de areia entre 15 e 70% (EMBRAPA, 2006).

6.3 Variabilidade espacial dos atributos químicos

A variabilidade espacial pode ser classificada, segundo Montanari et al. (2008), em três níveis de acordo com o coeficiente de variação (CV): alto grau de variabilidade (GV) se o CV for maior que 24, médio GV se o CV estiver entre 12 e 24, baixo GV se o CV for menor que 12. Na Tabela 8 estão dispostos os parâmetros descritivos dos atributos químicos do solo.

Tabela 8. Resumo da análise descritiva dos atributos químicos do solo e avaliação do grau de variabilidade (GV) de cada atributo

Atributos	Análise descritiva								
	M	DP	VAR	MIN	MAX	AS	CT	CV	GV
MO (0-20)	23,10	8,33	69,46	10	42	0,53	-0,20	36	A
MO (20-40)	14,55	5,87	34,47	7	29	1,01	0,65	40	A
P (0-20)	5,05	0,61	0,37	4	6	-0,01	-0,14	12	M
P (20-40)	4,15	0,67	0,45	3	6	0,91	1,59	16	M
pH (0-20)	3,60	0,60	0,36	3	5	0,36	-0,72	17	M
pH (20-40)	4,00	0,56	0,32	3	6	1,83	7,00	14	M
H+Al (0-20)	71,05	27,99	783,42	33	128	0,60	-0,59	39	A
H+Al (20-40)	45,60	14,91	222,25	21	85	0,91	0,97	33	A
Ca (0-20)	5,05	6,51	42,36	2	31	3,37	11,04	129	A
Ca (20-40)	5,85	13,31	178,03	2	62	4,01	14,38	228	A
Mg (0-20)	2,25	1,97	3,88	1	7	1,21	0,03	88	A
Mg (20-40)	1,50	1,28	1,63	1	5	2,25	3,37	85	A
V% (0-20)	11,50	11,41	130,26	3	50	2,07	4,43	99	A
V% (20-40)	12,55	15,64	244,68	4	75	3,41	11,12	125	A
CTC(0-20)	79,20	25,28	639,12	42	131	0,63	-0,53	32	A
CTC(20-40)	53,35	15,68	245,82	31	88	0,80	-0,02	29	A
SB(0-20)	7,95	7,36	54,16	3	33	2,13	4,70	93	A
SB(20-40)	7,65	13,58	184,34	3	64	3,83	13,45	177	A
K (0-20) *	5,75	1,20	1,46	3	8	-0,24	-0,23	21	M
K (20-40) *	3,60	2,09	4,36	1	9	1,69	2,20	58	A
B (0-20) *	1,95	0,61	0,37	1	3	0,01	-0,14	31	A
B (20-40) *	1,65	0,49	0,24	1	2	-0,63	-1,60	30	A
Cu (0-20) *	6,00	1,41	2,00	4	8	0,11	-1,31	24	A
Cu (20-40) *	8,35	1,35	1,82	6	11	0,00	-0,60	16	M
Fe (0-20)	217,85	465,76	216933,18	48	2190	4,08	14,81	214	A
Fe (20-40)	66,00	23,78	565,68	31	111	0,31	-0,79	36	A
Mn (0-20) *	5,80	4,62	21,33	2	22	2,32	5,60	80	A
Mn (20-40) *	3,15	2,77	7,71	1	12	1,84	3,17	88	A
Zn (0-20) *	3,60	1,69	2,88	2	9	1,64	3,18	47	A
Zn (20-40) *	2,35	1,53	2,34	1	6	0,92	-0,22	65	A

M: média, DP: desvio-padrão, VAR: variância, MIN: valor mínimo, MAX: valor máximo, AS: coeficiente de assimetria, CT: coeficiente de curtose, CV: coeficiente de variação, GV: grau de variabilidade, 0-20 e 20-40 são as faixas de profundidade (cm), * valores que foram transformados multiplicando-se por 10 para serem analisados no GS+. As unidades são: MO (g/dm³), P, H+Al, Ca, Mg CTC, SB (mmol./dm³), micronutrientes (mg/dm³).

Fosforo e pH apresentaram média variabilidade em ambas as faixas de profundidade, também o potássio entre 0-20cm e o cobre entre 20-40cm. Com excessão do fósforo, os outros atributos apresentaram coeficientes de variação altos. Montanari et al. (2008) também encontraram alta variabilidade para Ca, Mg e K.

Outro tipo de avaliação importante na análise dos dados é a distribuição deles e para isso são comumente utilizados os coeficientes de curtose e de assimetria, utilizando-se os erros de cada atributo e, à partir destes, estabelece-se um intervalo dentro do qual deve incluir 0 para assimetria e incluir 3 para curtose, condição esta estabelecida para ocorrer tendência à distribuição normal (PINTO, 2009). O erro associado a assimetria foi de 0,51 e o erro relativo ao coeficiente de curtose foi de 0,99. Segundo Pinto (2009), quando se utiliza o GS+ para avaliação dos dados, este software usa o coeficiente de curtose para determinar a forma da distribuição, funcionando da seguinte forma: se o coeficiente de curtose (CT) for igual a zero a forma é mesocurtica, ou seja, normal, se o CT for menor que zero, a forma é platicurtica (achatada) e se o CT for maior que zero a forma será leptocurtica (alongado). Ao se considerar estes critérios, não ocorreu nenhuma tendência a distribuição normal e a forma de distribuição sempre foi achatada ou alongada. Os resultados levando-se em conta estas determinações estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Forma de distribuição dos dados dos atributos químicos do solo ao se considerar os valores dos coeficientes de curtose

Atributos químicos	Coeficientes		Forma
	assimetria	curtose	
MO (0-20 cm)	0,53	-0,20	P
MO (20-40 cm)	1,01	0,65	L
P (0-20 cm)	-0,01	-0,14	P
P (20-40 cm)	0,91	1,59	L
pH (0-20 cm)	0,36	-0,72	P
pH (20-40 cm)	1,83	7,00	L
H+Al (0-20 cm)	0,60	-0,59	P
H+Al (20-40 cm)	0,91	0,97	L
Ca (0-20 cm)	3,37	11,04	L
Ca (20-40 cm)	4,01	14,38	L
Mg (0-20 cm)	1,21	0,03	L
Mg (20-40 cm)	2,25	3,37	L
V% (0-20 cm)	2,07	4,43	L
V% (20-40 cm)	3,41	11,12	L

Continua ...

Tabela 10. Continuação

Atributos químicos	Coeficientes		Forma
	assimetria	curtose	
CTC(0-20 cm)	0,63	-0,53	P
CTC(20-40 cm)	0,80	-0,02	P
SB(0-20 cm)	2,13	4,70	L
SB(20-40 cm)	3,83	13,45	L
K (0-20 cm) *	-0,24	-0,23	P
K (20-40 cm) *	1,69	2,20	L
B (0-20 cm) *	0,01	-0,14	P
B (20-40 cm) *	-0,63	-1,60	P
Cu (0-20 cm) *	0,11	-1,31	P
Cu (20-40 cm) *	0,00	-0,60	P
Fe (0-20 cm)	4,08	14,81	L
Fe (20-40 cm)	0,31	-0,79	P
Mn (0-20 cm) *	2,32	5,60	L
Mn (20-40 cm) *	1,84	3,17	L
Zn (0-20 cm) *	1,64	3,18	L
Zn (20-40 cm) *	0,92	-0,22	P

Forma: P (platicurtica ou achatada) e L (leptocurtica ou alongada), * dados modificados para serem avaliados no GS+

Para os macronutrientes e as características do solo considerando alguns destes elementos a maioria da distribuição foi alongada enquanto que os micronutrientes tiveram, em sua maioria, uma distribuição mais achatada.

A análise de variância foi realizada (Tabelas 10 a 24) para se determinar a ocorrência de diferenças entre as duas profundidades do solo, 0-20 e 20-40cm, das quais foram coletadas amostras para caracterização da fertilidade do solo. O valor de F Tabelado, com nível de 0,05 foi de 4,09. Matéria orgânica, fósforo, H+Al, K, CTC, B, Cu, Mn e Zn são os atributos do solo cujas análises de variância mostraram que há diferença significativa entre as profundidades de 0-20 e de 20-40cm; os atributos Fe, V%, soma de bases, Ca, Mg e pH foram iguais nas duas profundidades avaliadas.

Tabela 10. Análise de variância do pH

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,12	0,12	0,54	0,47
Residuo	38	8,48	0,22		
Total	39	8,60			

Tabela 11. Análise de variância da matéria orgânica

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	731,02	731,02	14,07 *	0,00
Residuo	38	1974,75	51,97		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 12. Análise de variância do fósforo

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	8,10	8,10	19,90 *	0,00
Residuo	38	15,50	0,41		
Total	39	23,60			

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 13. Análise de variância da H + Al

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	6477,02	6477,02	12,88 *	0,00
Residuo	38	19107,75	502,84		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 14. Análise de variância do potássio

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,46	0,46	16 *	0,00
Residuo	38	1,11	0,03		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 15. Análise de variância do cálcio

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	6,40	6,40	0,06	0,81
Residuo	38	4187,50	110,20		
Total	39				

Tabela 16. Análise de variância do magnésio

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	5,63	5,63	2,04	0,16
Residuo	38	104,75	2,76		
Total	39				

Tabela 17. Análise de variância da soma de bases

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,90	0,90	0,01	0,93
Residuo	38	4531,50	119,25		
Total	39				

Tabela 18. Análise de variância da CTC

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	6682,22	6682,22	15,10 *	0,00
Residuo	38	16813,75	442,47		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 19. Análise de variância do V% (saturação por bases)

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	11,03	11,03	0,06	0,81
Residuo	38	7123,95	187,47		
Total	39				

Tabela 20. Análise do boro

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,01	0,01	4,82 *	0,03
Residuo	38	0,07	0,00		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 21. Análise do cobre

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,55	0,55	28,93 *	0,00
Residuo	38	0,73	0,02		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 22. Análise do ferro

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	230584,23	230584,23	2,12	0,15
Residuo	38	4132478,55	108749,44		
Total	39				

Tabela 23. Análise do manganês

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,70	0,70	4,84 *	0,03
Residuo	38	5,52	0,15		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Tabela 24. Análise do zinco

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Profundidade	1	0,16	0,16	5,98 *	0,02
Residuo	38	0,99	0,03		
Total	39				

* Diferença significativa entre as duas profundidades, ao nível de 5%.

Na Tabela 25 estão dispostos os resultados da análise geoestatística apenas dos modelos dos atributos químicos do solo cujas validações cruzadas deram confiabilidade.

Tabela 25. Resultados das análises geoestatísticas dos atributos químicos do solo

Atributo do solo	Análises geoestatísticas						GD
	Modelo	Efeito pepita	Patamar	Alcance	Proporção	R ²	
MO (0-20)	esférico	9,20	66,10	29,60	0,31	0,206	FR
Mg (20-40)	gaussiano	0,37	1,97	28,10	0,01	0,426	FR
CTC (0-20)	esférico	124,00	1103,00	210,90	0,59	0,513	MO
CTC (20-40)	esférico	67,60	310,20	22,90	2,95	0,044	FO
B (20-40)	gaussiano	0,19	0,79	145,90	0,00	0,342	FR
Mn (20-40)	esférico	0,01	6,52	23,50	0,00	0,103	FR
Zn (20-40)	esférico	0,21	2,49	17,60	0,01	0,160	FR

R²: coeficiente de determinação, Efeito Pepita (%²), Patamar (%²), Alcance (m), GD (grau de dependência), FR (fraca), MO (moderada), FO (forte). Atributos que apresentaram dependência espacial confirmada pela validação cruzada.

As amostras de solo para determinação das características químicas foram coletadas de maneira que ocorresse um ponto de coleta em cada parcela e outros na região central de toda a área experimental. Para a determinação do grau de dependência foi utilizado o critério estabelecido por Zimback (2001) no qual considera que a dependência é forte (FO) se a proporção for maior ou igual a 0,75, é moderada (MO) se a proporção estiver entre 0,25 e 0,75 e é fraca (FR) se a proporção for menor ou igual a 0,25.

Na Tabela 26 podem ser observados os atributos do solo cujos modelos de semivariograma foram adequados, pelo método de interpolação da krigagem, sendo os seguintes: esférico para a matéria orgânica (0-20); gaussiano para o Mg (20-40); esférico para a CTC (0-20); esférico para a CTC (20-40); gaussiano para o B (20-40); esférico para o Mn (20-40) e esférico para o Zn (20-40), estes atributos geraram mapas pelo método de interpolação da krigagem. A dependência espacial foi considerada fraca para a maioria destes

atributos, desta forma, foi possível fazer uma análise descritiva e de variância para a maioria das características químicas do solo.

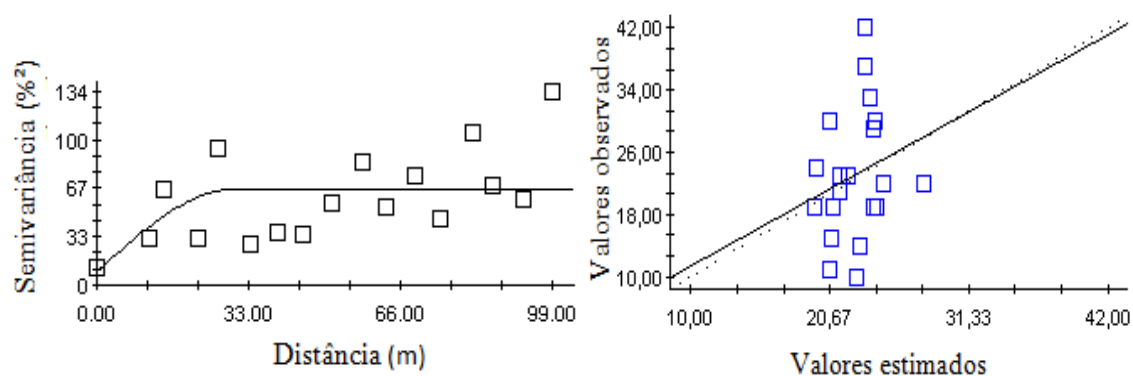


Figura 22. Semivariograma da matéria orgânica, na profundidade de 0-20cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

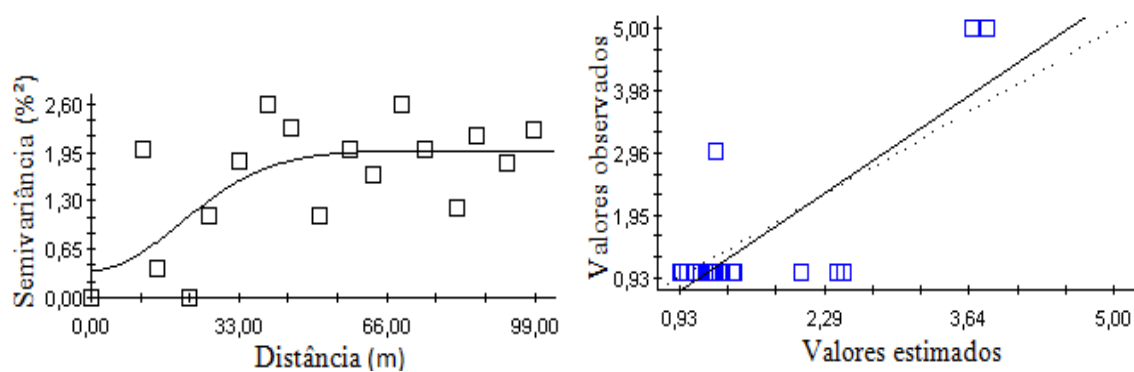


Figura 23. Semivariograma do magnésio, na profundidade de 20-40cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

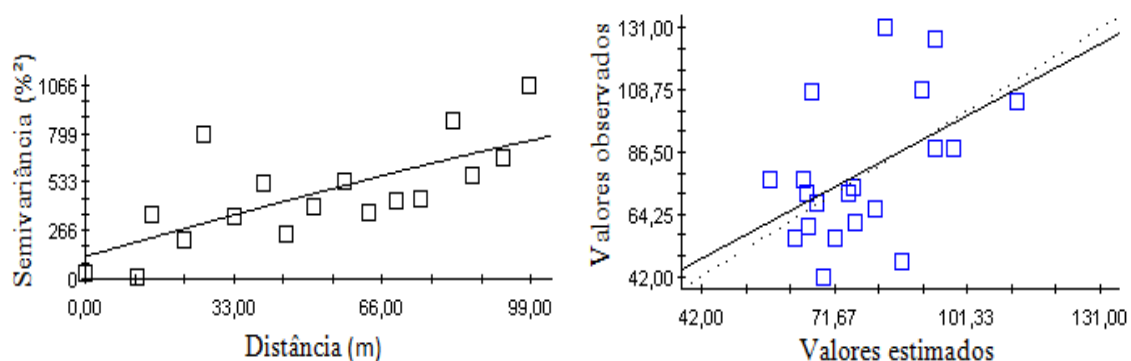


Figura 24. Semivariograma da CTC, na profundidade de 0-20cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

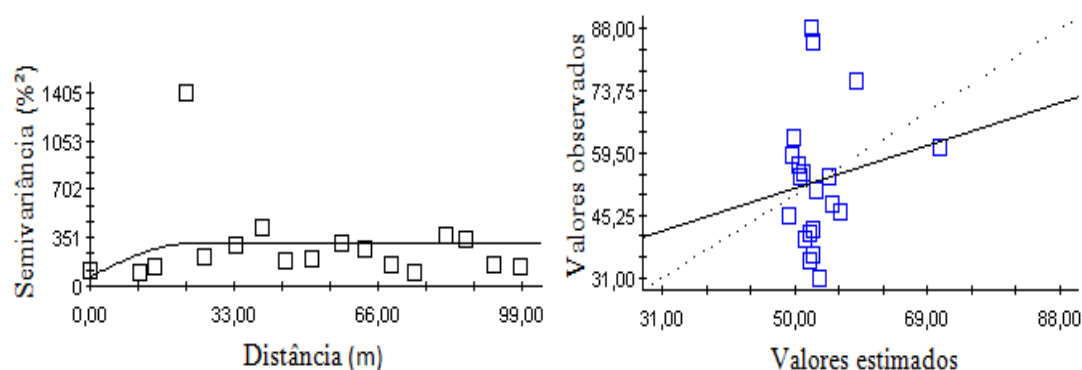


Figura 25. Semivariograma da CTC, na profundidade de 20-40cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

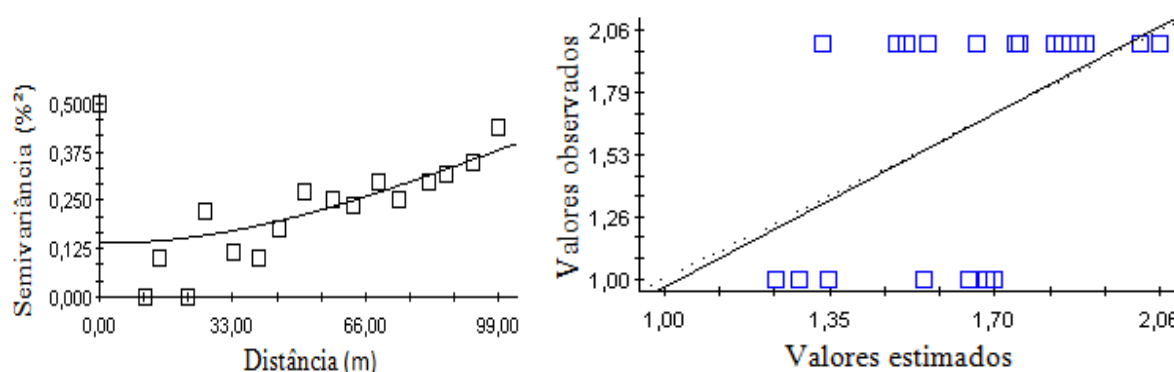


Figura 26. Semivariograma do boro, na profundidade de 20-40cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

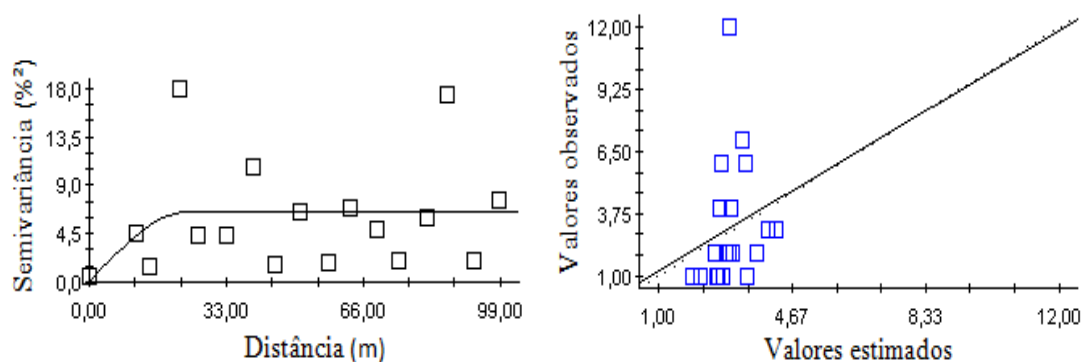


Figura 27. Semivariograma do manganês, na profundidade de 20-40cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

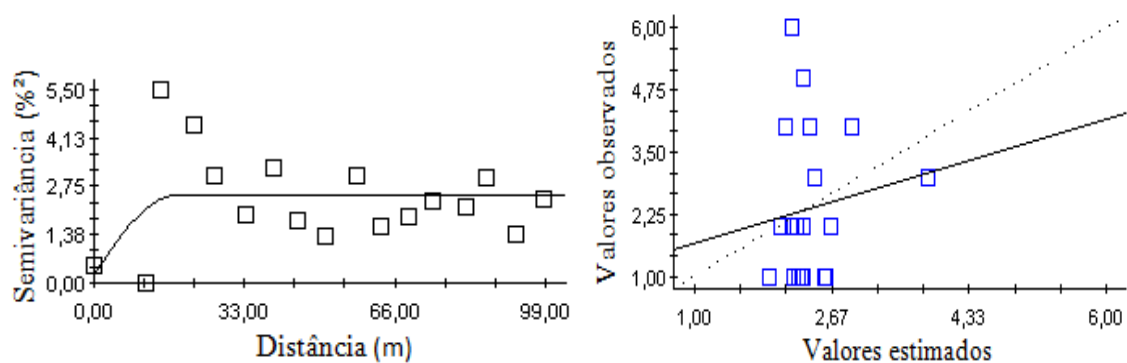


Figura 28. Semivariograma do zinco, na profundidade de 20-40cm, no qual o eixo dos x corresponde a distância (m) e no eixo dos y estão os valores de semivariância (%²). Gráfico de validação do semivariograma.

Os gráficos de validação cruzada que acompanham os gráficos de semivariograma apresentam valores de coeficiente de regressão próximos de um e coeficientes lineares relativamente afastados de zero, condições que mostram alta variabilidade dos dados e que deveriam ser coletadas mais amostras. Os critérios de grau de dependência e da análise das validações foram utilizados para decisão de se aderir ao processo de interpolação pela krigagem.

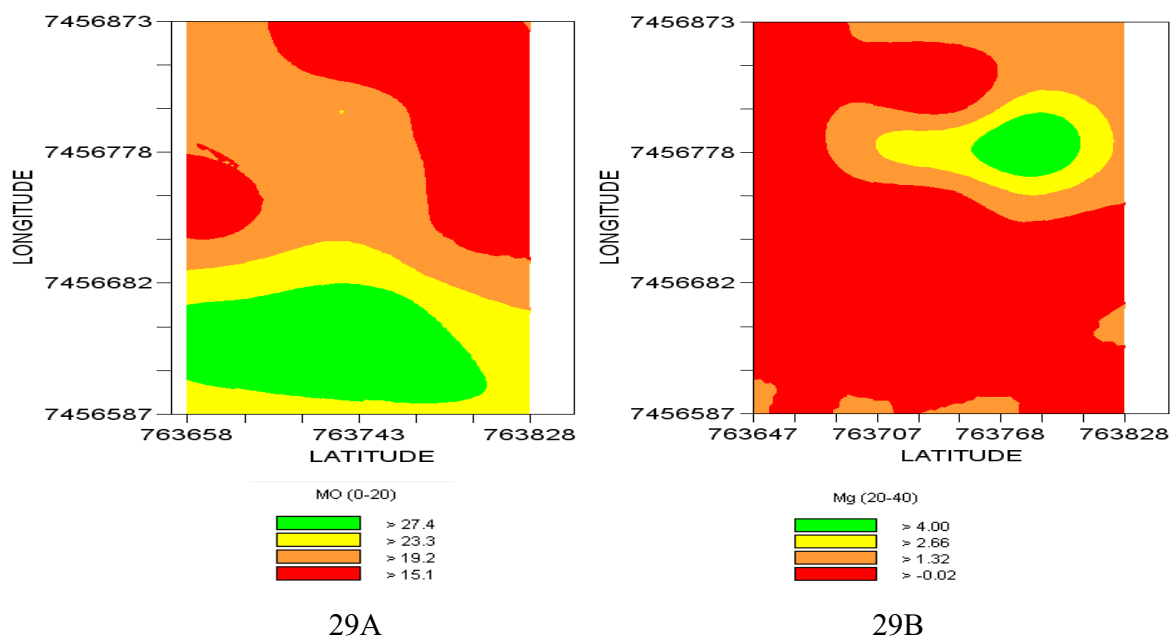


Figura 29. Mapa do teor de matéria orgânica do solo ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$), na profundidade de 0 a 20cm (29A) e mapa do teor de magnésio no solo ($\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$), na profundidade de 20 a 40cm (29B).

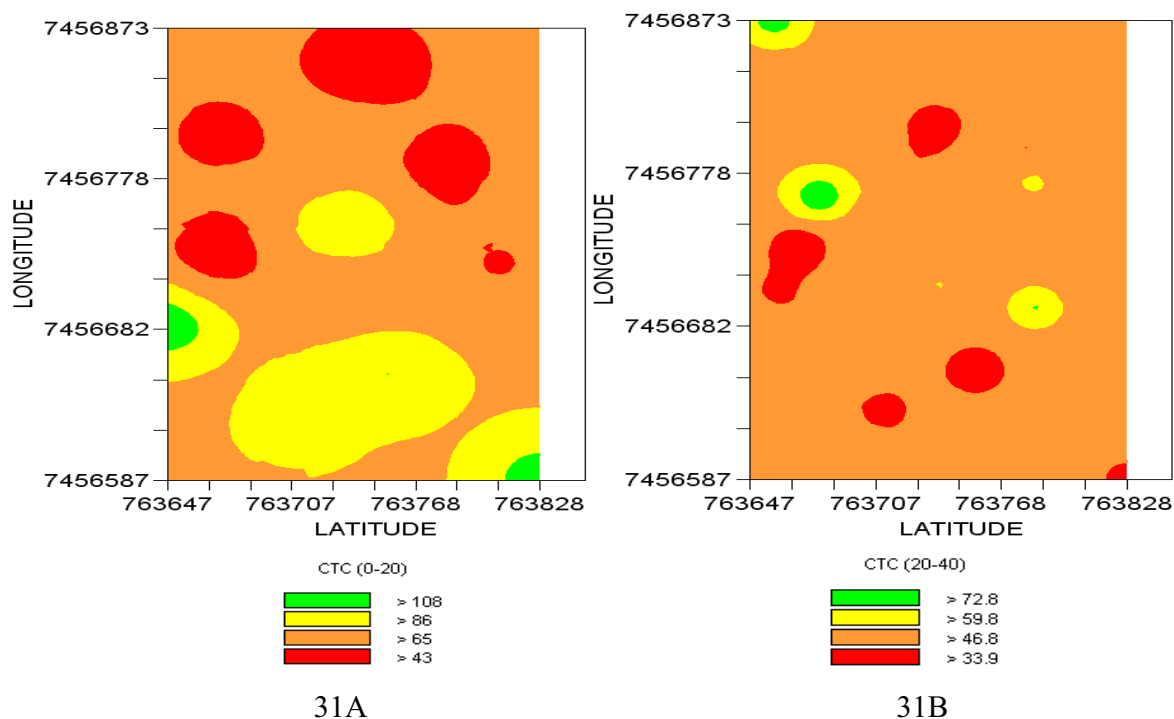


Figura 30. Mapa da CTC do solo, na profundidade de 0 a 20cm (31A) e mapa da CTC do solo, na profundidade de 20 a 40cm (31B).

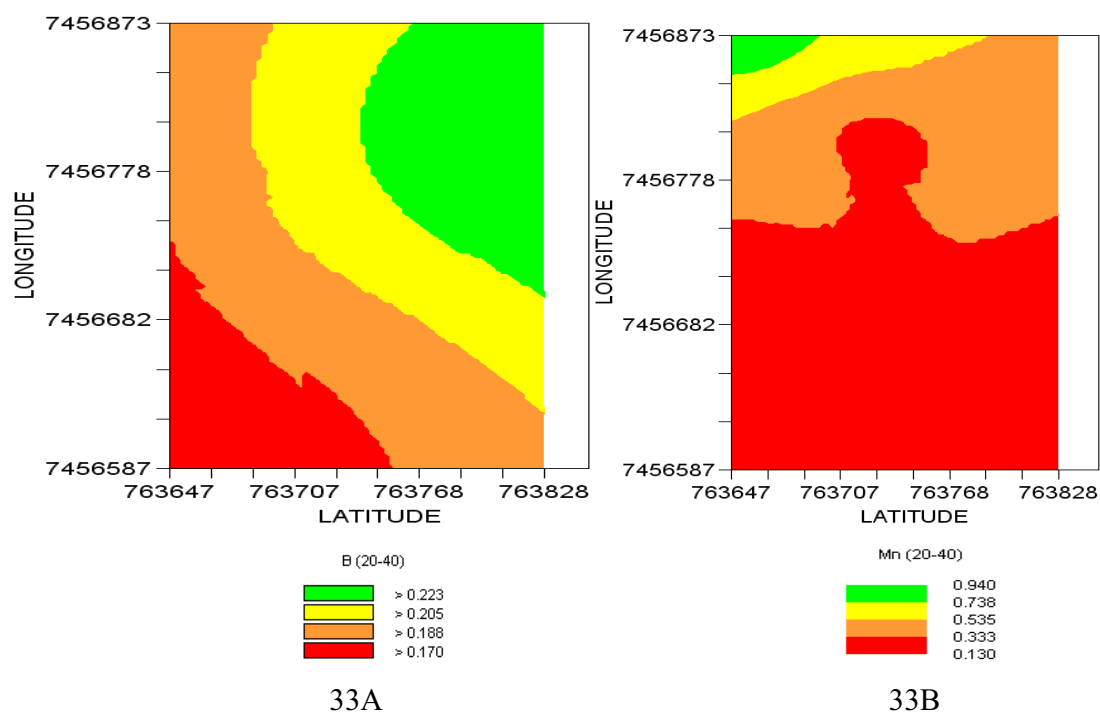


Figura 31. Mapa de boro no solo (mg.dm^{-3}) na profundidade de 20 a 40cm (33A) e mapa de manganês no solo (mg.dm^{-3}) na profundidade de 20 a 40cm (33B).

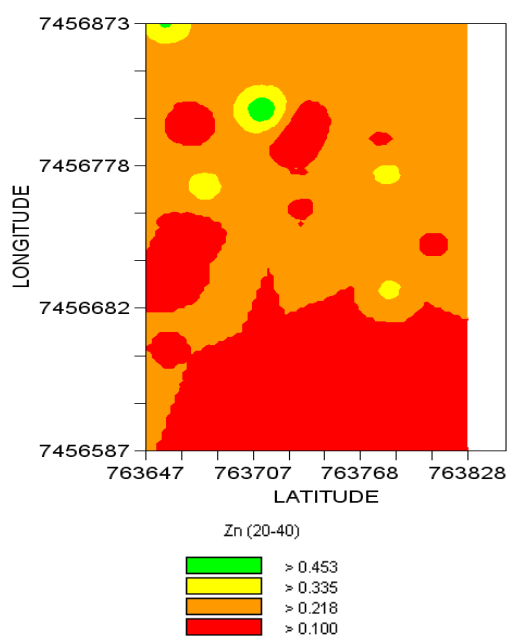


Figura 32. Mapa de zinco no solo (mg.dm^{-3}) na profundidade de 20 a 40cm.

Com base nas Tabelas de classificação química do solo (IAC, 2009) pode-se inferir que os teores foram baixos para Mg, pH, Mn e Zn em ambas faixas de profundidade (0-20 e 20-40cm), foram baixos para fósforo na camada mais profunda. Os teores foram classificados como médios nos atributos Ca, em ambas faixas, P, na camada mais superficial e Cu (0-20cm). O boro, potássio e saturação de bases foram enquadrados como teores muito baixos. Os únicos atributos que puderam ser colocados como presentes em alta quantidade foram o Fe, em ambas profundidades, e o Cu, de 20 a 40cm. Os níveis críticos de Cu e Zn para plantios de clones de *Eucalyptus urograndis* são iguais ou inferiores a 0,09 e 0,23 mg/dm³, respectivamente (Rodrigues, 2009). No presente trabalho as médias das concentrações de Cu tanto entre 0-20 cm (0,60 mg/dm³) como entre 20-40 cm (0,83 mg/dm³) são satisfatórias, os teores de Zn foram também satisfatórios, 0,36 e 0,23 mg/dm³, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente.

A quantidade média de fósforo na camada mais superficial do solo pode ser justificada pela aplicação de adubo ao longo das atividades silviculturais e pela própria ciclagem biogeoquímica de nutrientes que ocorre nos plantios florestais. Os altos teores de Fe não são incomuns na maioria dos solos brasileiros, bastante intemperizados e ricos em óxidos, em especial nos latossolos.

6.4 Avaliação do crescimento do diâmetro e da altura total durante doze meses

A taxa de crescimento em altura decresceu em consequência do aumento do espaçamento em todas as doses de adubação, sendo que ocorreu o oposto na taxa de crescimento em diâmetro do colo, como pode ser observada nas equações de crescimento apresentadas neste trabalho. As taxas de crescimento em altura foram próximas nos tratamentos B1 (0,5704) e D1 (0,5795), o mesmo ocorrendo como os tratamentos A2 (0,7391) e B2 (0,7419), e com as parcelas D3 (0,5839) e E3 (0,5887). Já para as taxas de crescimento em diâmetro do colo, os espaçamentos D (2,0m entre plantas) e E (2,5m entre plantas) apresentaram ganhos similares em todas as doses de adubação. Até o terceiro mês após o plantio, as mudas não apresentavam diferença visível entre os tratamentos, provavelmente porque nesta fase as mudas estavam em processo de adaptação no campo com estabelecimento do sistema radicular.

Tabela 26. Equações para a estimativa da altura média (m), H, em função da idade (meses) , I, durante o primeiro ano após o plantio

Dose	Espaçamento	Equação	R ²
Sub	2,8m x 0,5m (A)	$H = 0,6836.I - 0,8205$	0,90
	2,8m x 1,0m (B)	$H = 0,5704.I - 0,5817$	0,95
	2,8m x 1,5m (C)	$H = 0,6243.I - 0,8375$	0,95
	2,8m x 2,0m (D)	$H = 0,5795.I - 0,6833$	0,96
	2,8m x 2,5m (E)	$H = 0,5041.I - 0,5453$	0,96
Usual	2,8m x 0,5m (A)	$H = 0,7391.I - 1,0284$	0,95
	2,8m x 1,0m (B)	$H = 0,7419.I - 0,6436$	0,96
	2,8m x 1,5m (C)	$H = 0,6363.I - 0,7345$	0,94
	2,8m x 2,0m (D)	$H = 0,6742.I - 0,7053$	0,96
	2,8m x 2,5m (E)	$H = 0,5471.I - 0,5269$	0,96
Super	2,8m x 0,5m (A)	$H = 0,703.I - 0,5336$	0,97
	2,8m x 1,0m (B)	$H = 0,6898.I - 0,8937$	0,92
	2,8m x 1,5m (C)	$H = 0,603.I - 0,533$	0,97
	2,8m x 2,0m (D)	$H = 0,5839.I - 0,5664$	0,95
	2,8m x 2,5m (E)	$H = 0,5887.I - 0,5853$	0,94

Tabela 27. Equações para a estimativa do diâmetro do colo médio (m), D, em função da idade (meses), I, durante o primeiro ano após o plantio

Dose	Espaçamento	Equação	R ²
1	2,8m x 0,5m (A)	$D = 0,4767.I + 0,163$	0,98
	2,8m x 1,0m (B)	$D = 0,5244.I + 0,0886$	0,96
	2,8m x 1,5m (C)	$D = 0,591.I - 0,1664$	0,97
	2,8m x 2,0m (D)	$D = 0,6443.I - 0,2744$	0,97
	2,8m x 2,5m (E)	$D = 0,6613.I - 0,4515$	0,98
2	2,8m x 0,5m (A)	$D = 0,4656.I + 0,1359$	0,95
	2,8m x 1,0m (B)	$D = 0,5581.I + 0,3412$	0,95
	2,8m x 1,5m (C)	$D = 0,6615.I - 0,1729$	0,98
	2,8m x 2,0m (D)	$D = 0,6965.I - 0,0589$	0,97
	2,8m x 2,5m (E)	$D = 0,7153.I - 0,3868$	0,99
3	2,8m x 0,5m (A)	$D = 0,5321.I + 0,2264$	0,98
	2,8m x 1,0m (B)	$D = 0,6012.I - 0,0094$	0,92
	2,8m x 1,5m (C)	$D = 0,6737.I - 0,1385$	0,99
	2,8m x 2,0m (D)	$D = 0,7551.I - 0,4398$	0,99
	2,8m x 2,5m (E)	$D = 0,7738.I - 0,5745$	0,99

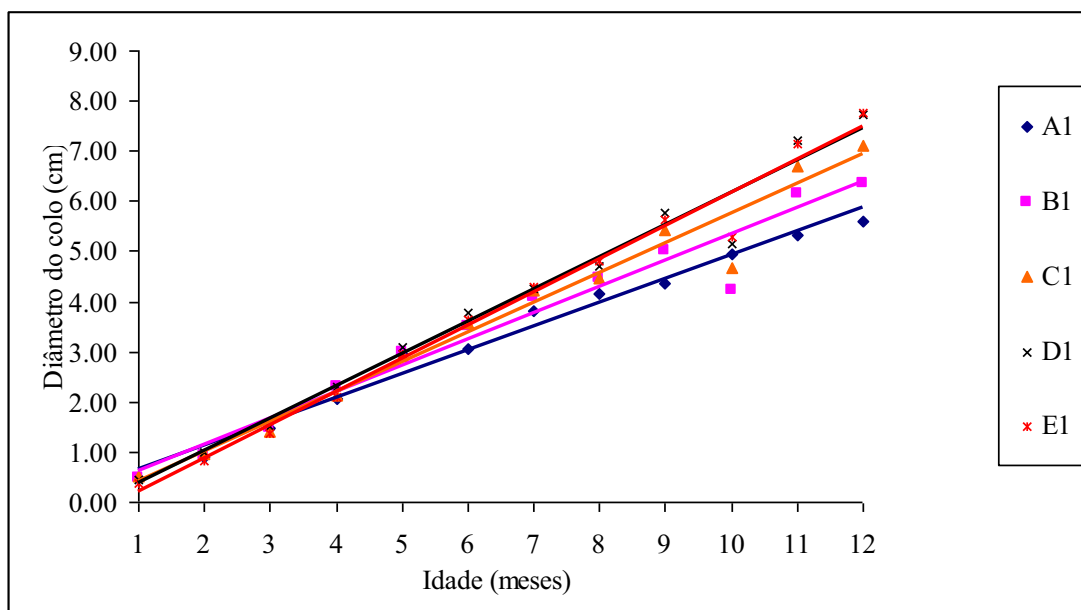


Figura 33. Diâmetro médio do colo na dosagem 1 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

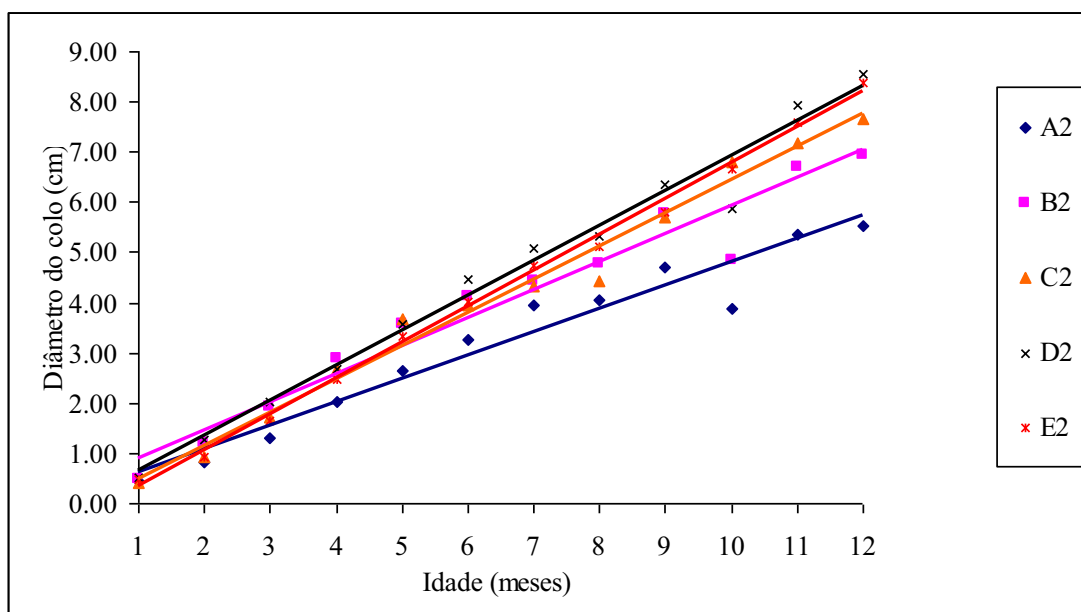


Figura 34. Diâmetro médio do colo na dosagem 2 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

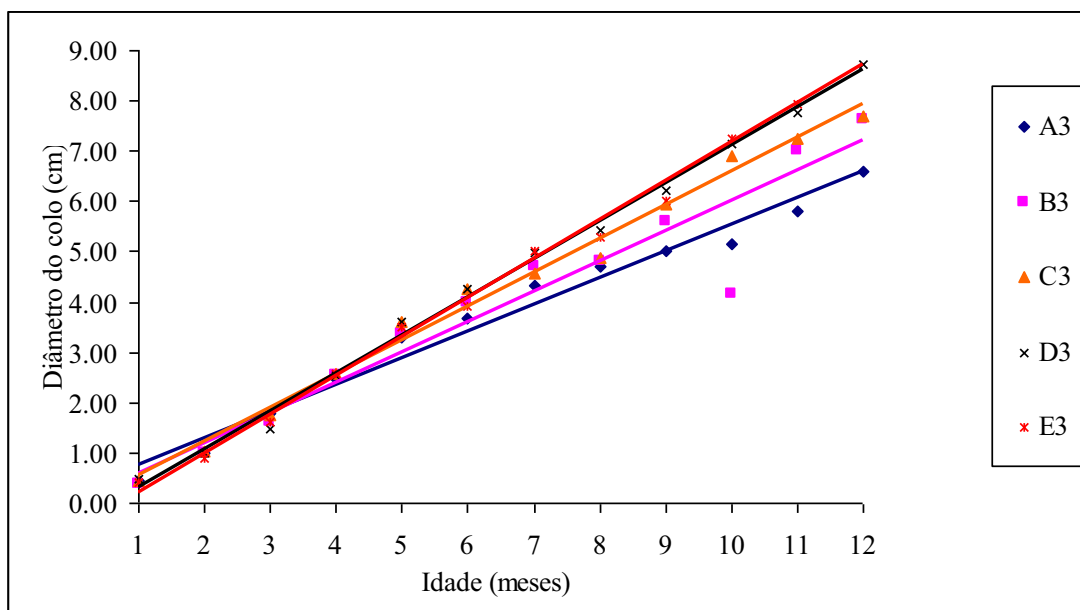


Figura 35. Diâmetro médio do colo na dosagem 3 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

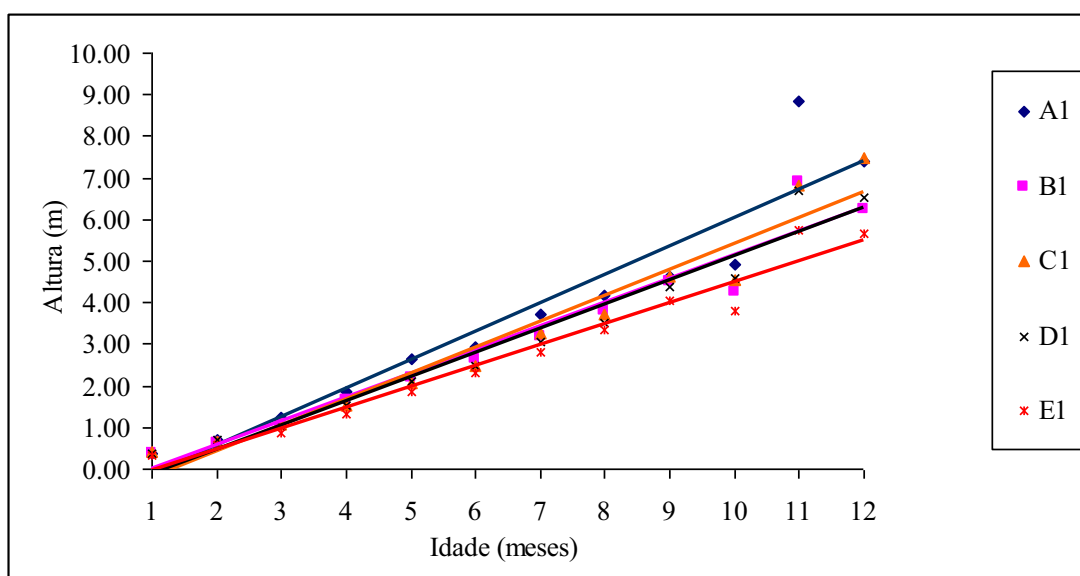


Figura 36. Altura média (m) na dosagem 1 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

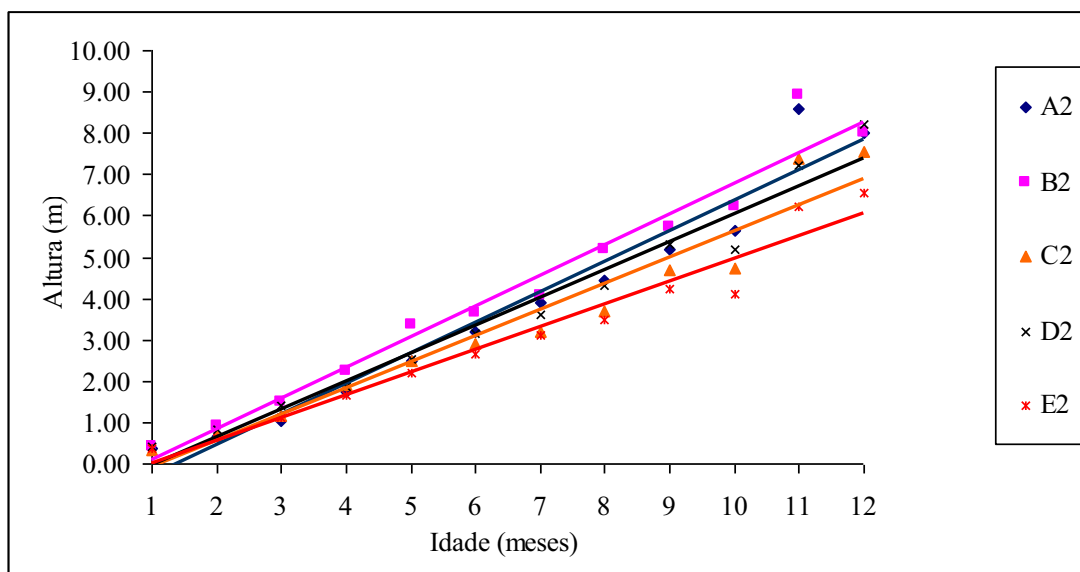


Figura 37. Altura média (m) na dosagem 2 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

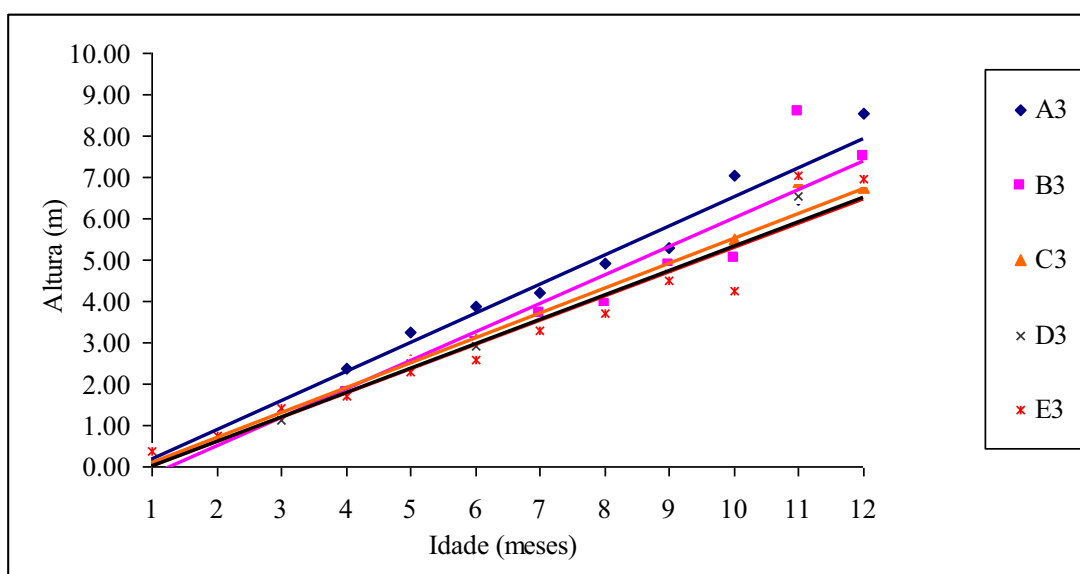


Figura 38. Altura média (m) na dosagem 3 de adubação nos espaçamentos A (2,8x0,5m), B (2,8x1,0m), C (2,8x1,5m), D (2,8x2,0m) e E (2,8x2,5m), em função da idade.

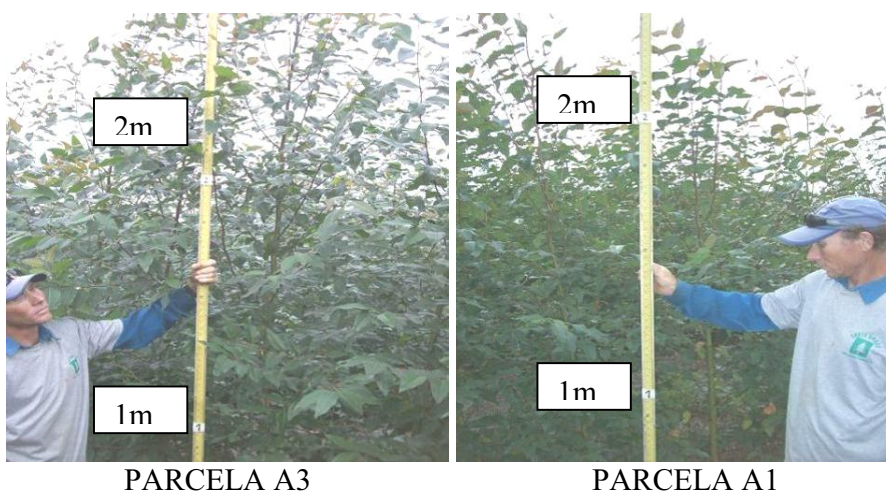
6.5 Aspecto dendrométrico das árvores

As fotos apresentadas nas Figuras 39 até 43 mostram algumas tendências visíveis nos trabalhos de campo como o nível de sobreposição de copas nas

parcelas com 0,5m entre as plantas (Figura 40). Quando se compara o aspecto morfológico da árvore em dois espaçamentos diferentes, porém no mesmo nível de adubação (Figura 41, 42 e 43) fica evidente a resposta ecofisiológica de melhor incremento em altura nos tratamentos em que se oferece menor área útil por planta.



Figura 39. Parcela C3, ou seja, espaçamento de 2,8 x 1,5 m na super-dosagem, aos seis meses de idade.



PARCELA A3

PARCELA A1

Figura 40. Ilustração das parcelas com espaçamento mais adensado (2,8 x 0,5 m) nas dosagens mínima (A1) e máxima (A3) de adubação, aos seis meses de idade.

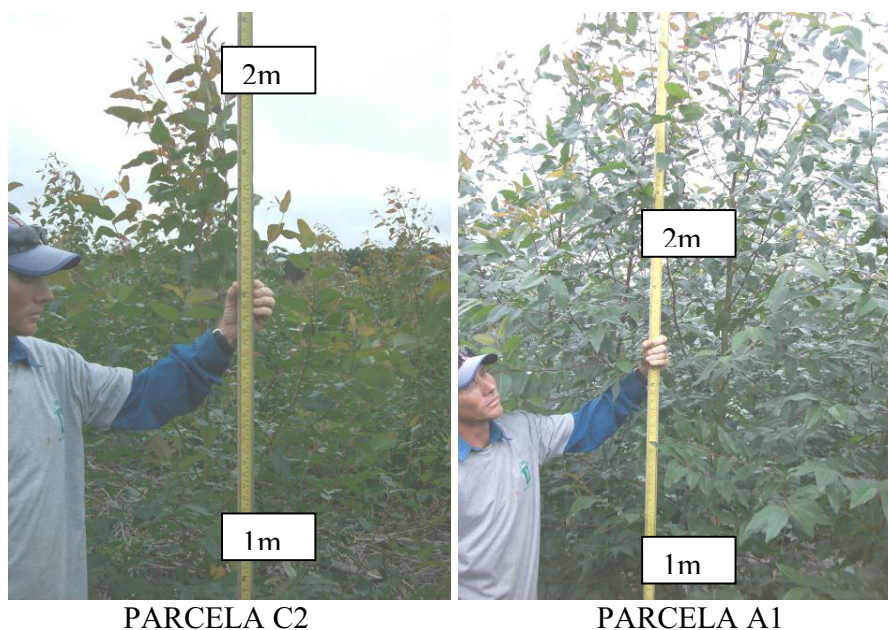


Figura 41. Ilustração das parcelas com espaçamento mais adensado ($2,8 \times 0,5$ m) na sub-dosagem (A1) e com arranjo de $2,8 \times 1,5$ m na dosagem usual da empresa (C2), aos seis meses de idade.

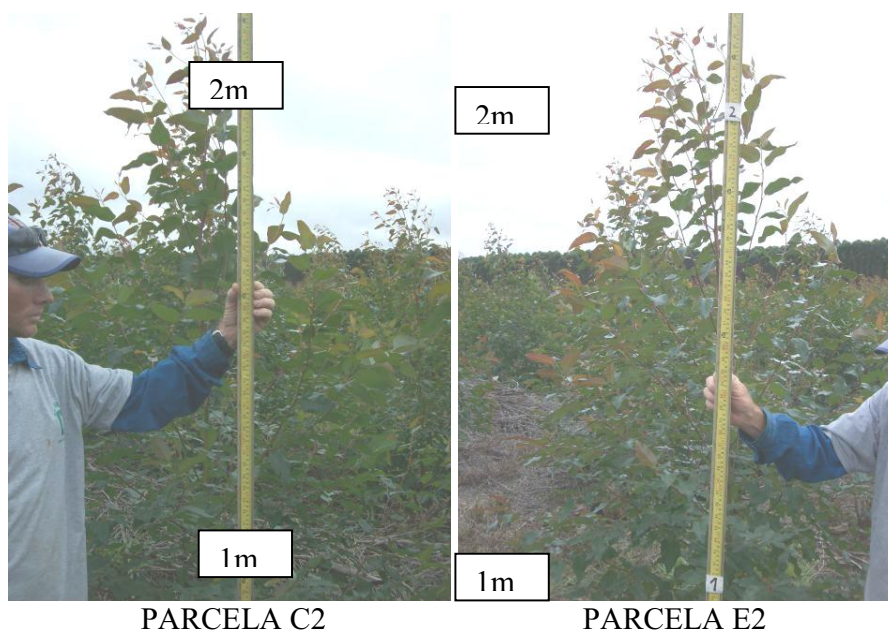


Figura 42. Ilustração das parcelas com espaçamento de $2,8 \times 1,5$ m (C2) e de $2,8 \times 2,5$ m (E2), ambas na dosagem intermediária ou nível 2 de aplicação de adubo.

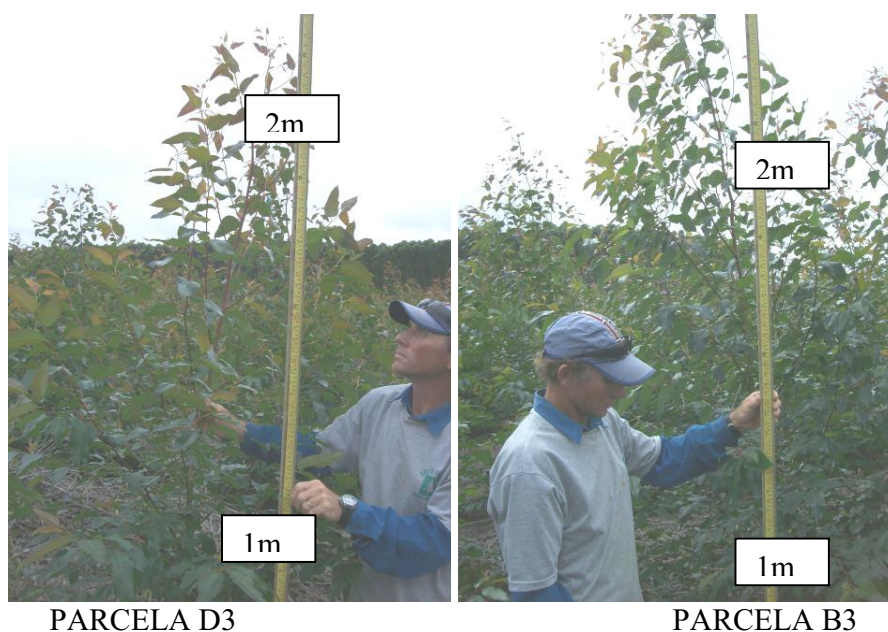


Figura 43. Ilustração das parcelas com espaçamento de 2,8 x 1,0 m (B3) e de 2,8 x 2,0 m (D3), ambas no nível (3) de aplicação de adubo, ou seja, uma super-dosagem em relação àquela aplicada usualmente pela empresa.

6.6 Área basal, altura e incremento periódico

6.6.1 Área basal aos seis meses de idade

Em povoamentos mais adensados a área basal é maior porque este parâmetro dendrométrico reflete a área ocupada pelo tronco da árvore em um determinado local, Schneider et al. (2000) constataram que a área basal é afetada pela densidade populacional. A Figura 44 mostra o desenvolvimento das árvores no mês de junho de 2009 pelos valores de área basal (m^2/ha). Os espaçamentos mais adensados, em especial aqueles com dosagens de adubação 2 e 3 apresentaram melhores valores da área basal. No presente trabalho, foi utilizado o valor de diâmetro do colo para este cálculo porque esta metodologia de medição de campo já havia sido adotada desde o primeiro mês em amostragens sucessivas com periodicidade mensal.

Müller (2005) encontrou valores de área basal inferiores à 5,00 m²/ha, em plantio de floresta para fins energéticos aos 7 meses de idade, todavia os tratamentos consistiram apenas na diferenciação entre os espaçamentos que variavam de 3 x 0,5 m até 3 x 3 m. No presente trabalho foi encontrado até 7,74 m²/ha no espaçamento de 2,8 x 0,5 m com nível máximo de adubação (A3). O valor muito alto do tratamento A3 pode estar relacionado à pequena área útil por planta e a absorção do adubo aplicado em super-dosagem neste tratamento. Apenas a dosagem usual da empresa (dose 2) foi suficiente para causar uma diferença relevante, em termos de área basal, do tratamento A2, ou seja, 2,8 x 0,5 m com nível 2 de aplicação de adubo, em relação à qualquer outro tratamento exceto o A3.

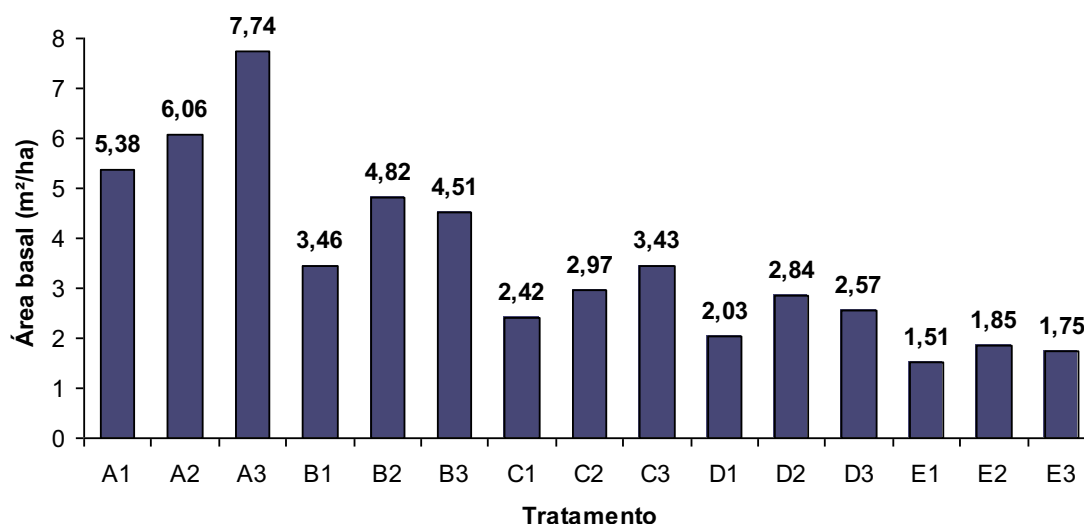


Figura 44. Área basal (m²/ha), aos seis meses de idade, nos diferentes espaçamentos e doses de adubação.

6.6.2 Incremento periódico mensal da área basal

Na Figura 45 é apresentado o incremento periódico mensal (IPM), em termos de área basal (m²/ha), este parâmetro fornece o crescimento da floresta em um determinado período de tempo, ou seja, o IPM para área basal indica a diferença de produção entre as duas idades dividida pela diferença entre elas. O incremento periódico mostra que, no

intervalo de doze meses de idade foi possível detectar que nem sempre é preciso fazer uma super-dosagem para alcançar altas produtividades, o crescimento obtido no período nas dosagens usuais, caracterizadas pelo número 2, e as super-dosagens indicadas pelo número 3 são bastante próximos. Faz-se uma ressalva apenas para os tratamentos de adubação nos quais o espaçamento entre plantas era de 0,5 m, indicados pela letra A, cuja disposição do adubo em espaço muito próximo entre as mudas pode ter causado um pool de crescimento maior. Em outro trabalho, realizado por Berger et al. (2002), foi explicado que o espaçamento influenciou mais do que a adubação num estudo da interação destes dois fatores para a produtividade florestal.

Tabela 28. Área basal calculada com o diâmetro do colo e variação em função da idade

		ÁREA BASAL (m ² /ha)											
Tratamento	Idade (meses)												IPM (m ² /ha)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A1	0,13	0,48	1,26	2,47	5,04	5,38	8,36	9,88	11,39	14,00	16,72	17,93	1,62
A2	0,11	0,39	0,98	2,35	4,02	6,06	8,95	9,42	12,85	9,12	16,92	17,94	1,62
A3	0,11	0,57	1,82	3,54	6,25	7,74	10,76	12,68	14,98	15,78	19,77	28,92	2,62
B1	0,07	0,25	0,62	1,51	2,56	3,46	4,76	5,73	7,22	5,30	10,84	11,55	1,04
B2	0,07	0,41	1,05	2,35	3,58	4,82	5,62	6,43	9,53	6,84	12,69	14,13	1,28
B3	0,05	0,27	0,75	1,85	3,23	4,51	6,34	6,65	8,92	5,58	13,98	16,42	1,49
C1	0,05	0,17	0,38	0,87	1,62	2,42	3,35	3,75	5,59	4,16	8,49	9,47	0,86
C2	0,03	0,17	0,56	1,36	2,57	2,97	3,56	3,80	6,20	8,76	9,83	11,09	1,00
C3	0,04	0,21	0,59	1,28	2,50	3,43	3,93	4,52	6,75	9,22	10,08	11,15	1,01
D1	0,03	0,15	0,32	0,75	1,36	2,03	2,59	3,14	4,72	3,80	7,37	8,43	0,76
D2	0,04	0,23	0,58	1,04	1,83	2,84	3,65	4,01	5,67	4,89	8,89	10,33	0,94
D3	0,03	0,15	0,31	0,92	1,85	2,57	3,51	4,17	5,47	7,21	8,62	10,83	0,98
E1	0,02	0,08	0,21	0,50	0,98	1,51	2,10	2,60	3,56	3,20	5,79	6,78	0,61
E2	0,03	0,10	0,31	0,70	1,26	1,85	2,58	2,98	3,81	5,11	6,54	7,91	0,72
E3	0,02	0,09	0,31	0,77	1,41	1,75	2,87	3,19	4,08	5,95	7,20	9,19	0,83

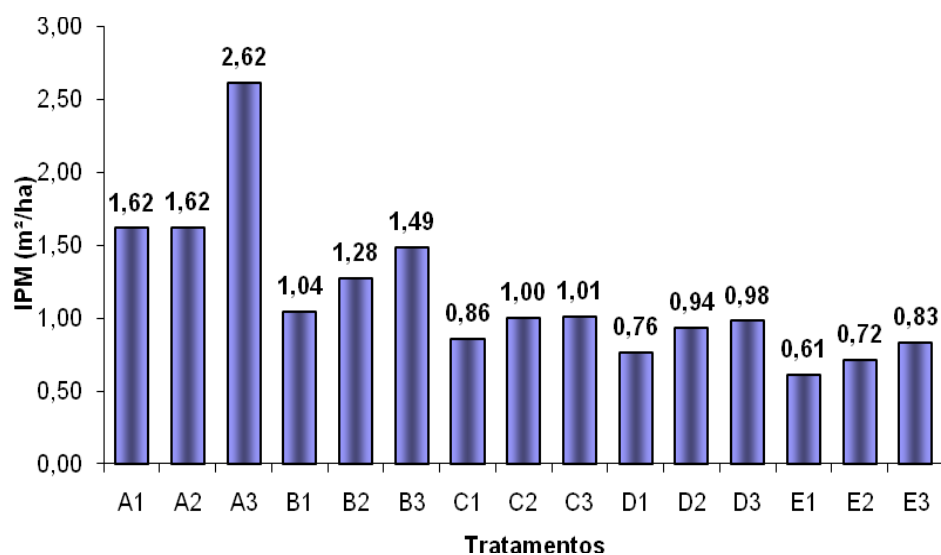


Figura 45. Incremento periódico mensal em termos de área basal (m²/ha), as letras A, B, C, D e E indicam os espaçamentos (2,8 x 0,5; 2,8 x 1,0; 2,8 x 1,5; 2,8 x 2,0 e 2,8 x 2,5 m), os números 1, 2 e 3 referem-se às doses sub-dose, dose usual e super-dose.

6.6.3 Incremento periódico mensal da altura

O incremento periódico mensal é uma boa forma de visualizar o comportamento da floresta em termos de altura ao se manejar o arranjo de plantio e as doses de aplicação dos adubos, a Figura 46 mostra que para a variável altura apenas no espaçamento 2,8 x 0,5 m foi vantajosa uma super-dose de adubação enquanto que nos outros espaçamentos a dose máxima não forneceu respostas melhores em altura quando comparada com a dose usual da empresa. Nos plantios florestais adensados (tratamentos A e B) o efeito da adubação química é mais forte evidenciando que o espaçamento pode interferir mais no incremento em altura do que a própria aplicação de fertilizante por causa da competição por energia solar, essa evidência também foi explicada por Berger et al. (2002). Nota-se na Figura 46 que as maiores diferenças absolutas ocorrem entre os incrementos (IPM) das doses 1 e 2 nos espaçamentos A e B.

Tabela 29. Altura nas diferentes idades por tratamento e variação em função da idade

ALTURA (m)													
Tratamento	Idade (meses)												IPM (m)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A1	0,39	0,72	1,22	1,84	2,66	2,95	3,71	4,17	4,64	4,93	8,84	7,40	0,64
A2	0,39	0,66	1,03	1,74	2,51	3,20	3,89	4,44	5,19	5,64	8,59	8,03	0,69
A3	0,36	0,76	1,38	2,37	3,23	3,87	4,19	4,93	5,29	7,03	6,47	8,55	0,75
B1	0,36	0,63	1,08	1,65	2,21	2,66	3,19	3,79	4,52	4,27	6,91	6,24	0,53
B2	0,41	0,90	1,49	2,22	3,37	3,64	4,06	5,19	5,71	6,24	8,91	8,00	0,69
B3	0,38	0,74	1,08	1,79	2,46	3,01	3,71	3,90	4,87	5,06	8,59	7,49	0,65
C1	0,41	0,68	1,06	1,54	2,05	2,49	3,25	3,71	4,61	4,53	6,83	7,49	0,64
C2	0,35	0,72	1,18	1,90	2,51	2,90	3,20	3,69	4,70	4,71	7,40	7,56	0,66
C3	0,37	0,77	1,27	1,82	2,57	3,10	3,26	3,66	4,70	5,52	6,86	6,74	0,58
D1	0,37	0,71	1,02	1,54	2,11	2,48	3,04	3,53	4,39	4,57	6,70	6,55	0,56
D2	0,40	0,84	1,41	1,88	2,55	3,16	3,62	4,33	5,30	5,18	7,24	8,21	0,71
D3	0,37	0,66	1,14	1,69	2,52	2,90	3,28	3,67	4,66	4,27	6,53	7,06	0,61
E1	0,35	0,59	0,88	1,32	1,86	2,31	2,83	3,34	4,05	3,82	5,75	5,67	0,48
E2	0,36	0,64	1,10	1,67	2,21	2,65	3,11	3,50	4,23	4,12	6,22	6,54	0,56
E3	0,36	0,74	1,14	1,72	2,30	2,58	3,30	3,70	4,51	4,27	7,06	6,95	0,60

Na Figura 46 está apresentada a influencia dos espaçamentos e níveis de aplicação de adubos para o incremento periódico mensal da altura.

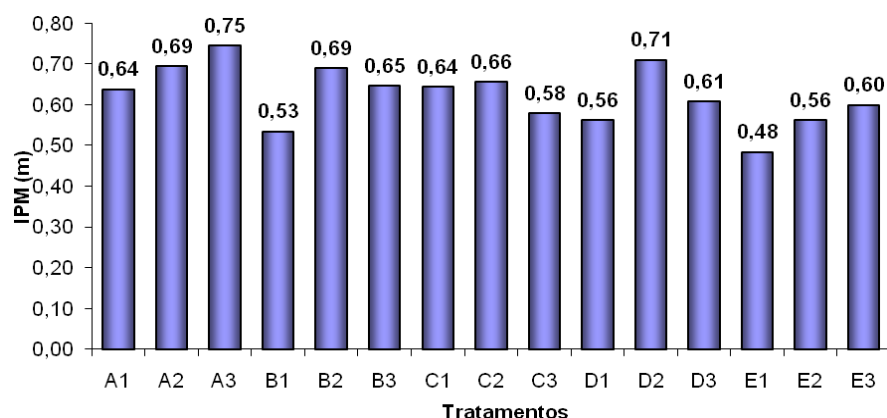


Figura 46. Incremento periódico mensal da altura (m), as letras A, B, C, D e E indicam espaçamentos (2,8 x 0,5 m; 2,8 x 1,0 m; 2,8 x 1,5 m; 2,8 x 2,0 m e 2,8 x 2,5 m), os números 1, 2 e 3 referem-se às doses sub-dose, dose usual e super-dose.

6.7 Análise descritiva e de variância aos 12 meses de idade

As análises descritivas e de variância das variáveis altura e DAP do povoamento de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* foram realizadas no programa computacional Statistica.

6.7.1 Análise descritiva

Os valores próximos entre a média e a mediana evidenciam que os dados coletados de DAP e de altura no campo tendem a distribuição normal. As maiores variações ocorreram nos espaçamentos mais adensados com a maior dose de adubação, isso se deve ao nível de competição entre as árvores, intensificada pelo acréscimo de insumo, que provoca aumento da taxa de crescimento (FORD, 1984).

Tabela 30. Análise descritiva do DAP (cm) aos doze meses de idade

Tratamentos	Média	Mediana	Desvio-padrão	CV (%)
A1	4,53	4,55	0,66	14,55
A2	4,63	5,00	1,05	22,62
A3	5,40	5,15	2,33	43,13
B1	4,83	4,75	0,81	16,86
B2	5,57	5,70	1,08	19,42
B3	5,88	6,00	0,68	11,54
C1	5,23	5,20	0,50	9,60
C2	5,69	5,80	0,71	12,54
C3	5,81	5,70	1,13	19,48
D1	5,49	5,55	0,66	12,04
D2	6,53	6,05	0,95	14,55
D3	5,95	6,05	0,85	14,21
E1	5,45	5,55	1,01	18,45
E2	5,70	5,70	0,60	10,54
E3	6,41	6,50	0,55	8,55

Tabela 31. Análise descritiva da altura (m) aos doze meses de idade

Tratamentos	Média	Mediana	Desvio-padrão	CV (%)
A1	7,40	7,30	0,56	7,58
A2	8,03	8,30	1,40	17,40
A3	8,55	8,75	1,54	17,99
B1	6,24	6,20	0,64	10,25
B2	8,00	8,15	1,07	13,37
B3	7,49	7,40	1,00	13,41
C1	7,49	7,60	0,85	11,40
C2	7,56	7,50	0,86	11,37
C3	6,74	6,75	0,76	11,20

Continua ...

Tabela 31. Continuação

Tratamentos	Média	Mediana	Desvio-padrão	CV (%)
D1	6,55	6,55	0,71	10,87
D2	8,21	8,30	0,60	7,34
D3	7,06	7,05	0,76	10,74
E1	5,67	5,70	0,51	9,01
E2	6,54	6,45	0,56	8,55
E3	6,95	7,00	0,98	14,08

A avaliação descritiva dos dados de DAP e de altura mostrou que tendem a distribuição normal porque os valores das médias estão próximos dos valores de mediana e os testes de normalidade confirmaram a referida tendência.

6.7.2 Análise de variância e teste de médias

As Tabelas 32 e 33 mostram a análise de variância, cujo resultado evidencia que todos os fatores foram significativos para o crescimento em DAP e em altura do povoamento, destacando-se o fator adubação, em ambas as variáveis analisadas, com os maiores valores de F calculados.

Tabela 32. Análise de variância da altura, aos 12 meses de idade

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Espaçamento	4	116,72	29,18	35,84 *	0,00
Adubação	2	78,61	39,31	48,28 *	0,00
Espaçamento x Adubação	8	72,44	9,06	11,12 *	0,00
Resíduo	435	354,14	0,81		
Total	449	621,91			

* Efeitos significativos pelo teste F ($\alpha=0,05$).

Tabela 33. Análise de variância do DAP, aos 12 meses de idade

Efeito	GL	SQ	QM	F	p
Espaçamento	4	70,36	17,59	17,56 *	0,00
Adubação	2	47,62	23,81	23,78 *	0,00
Espaçamento x Adubação	8	20,01	2,50	2,50 *	0,01
Resíduo	435	435,65	1,00		
Total	449	573,65			

* Efeitos significativos pelo teste F ($\alpha=0,05$).

A significância dos efeitos provocados no experimento foi confirmada pela análise de variância e, na sequência, realizou-se o teste Tukey de médias cujos resultados são apresentados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34. Valores médios de altura do *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, aos 12 meses de idade, em função da adubação e do espaçamento

Dose	Espaçamento (m)				
	2,8 x 0,5	2,8 x 1,0	2,8 x 1,5	2,8 x 2,0	2,8 x 2,5
1	7,40 A b	6,24 B b	7,49 A ab	6,55 B b	5,67 C b
2	8,30 A ab	8,00 A a	7,56 A a	8,21 A a	6,54 B a
3	8,55 A a	7,49 B a	6,74 C b	7,06 C b	6,95 C a

Letras maiúsculas nas linhas e letras minúsculas nas colunas.

Tabela 35. Valores médios do DAP do *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, aos 12 meses de idade, em função da adubação e do espaçamento

Dose	Espaçamento (m)				
	2,8 x 0,5	2,8 x 1,0	2,8 x 1,5	2,8 x 2,0	2,8 x 2,5
1	4,53 B a	4,83 AB b	5,23 B a	5,49 A b	5,45 A b
2	4,63 B a	5,57 AB a	5,69 A a	6,53 A a	5,70 AB ab
3	5,40 B a	5,88 AB a	5,81 AB a	5,95 AB ab	6,41 A a

Letras maiúsculas nas linhas e letras minúsculas nas colunas.

A maior altura média obtida foi de 8,55 m no espaçamento de 2,8 x 0,5 m na dose 3 de adubação; porém, sem diferença estatística da dose 2 e, na dosagem 2, todos as alturas médias foram semelhantes, exceto no espaçamento de 2,8 x 2,5 m. Nos espaçamentos 2,8 x 0,5 m, 2,8 x 1,0 m e 2,8 x 2,5 m ficou evidenciada uma semelhança no ganho em altura nas doses 2 e 3. A maior média de DAP foi de 6,53 cm no espaçamento de 2,8 x 2,0 m na dosagem 2 de adubação e este tratamento somente não foi igual ao tratamento 2,8 x 0,5 m na dose 2 e ao 2,8 x 2,0 m na dose 1. Os maiores DAP foram obtidos na dose 3, com maior frequência, porém sem diferença estatística da dose 2. Ao se confrontar os resultados para as duas variáveis dendrométricas pode-se inferir que os maiores valores em termos de altura e DAP, no povoamento de clones de *Eucalyptus urograndis*, aos doze meses de idade, ocorrem na dosagem 2 de adubação nos espaçamentos 2,8 x 1,0 m, 2,8 x 1,5 m e 2,8 x 2,0 m.

6.8 Volume com casca

O volume com casca foi calculado usando-se o fator de forma de 0,63 obtido em inventário exploratório de um povoamento do mesmo clone avaliado neste trabalho em área com mesmo solo. Na Tabela 36 é possível observar os valores de volume médio obtido em cada tratamento.

Tabela 36. Volume médio individual (m³) de madeira, com casca, de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* aos doze meses de idade

Espaçamento (m)	Doses de adubação		
	1	2	3
2,8 x 0,5	0,0076 (0,0022)	0,0092 (0,0037)	0,0152 (0,0169)
2,8 x 1,0	0,0074 (0,0028)	0,0128 (0,0051)	0,0128 (0,0035)
2,8 x 1,5	0,0102 (0,0026)	0,0122 (0,0034)	0,0116 (0,0059)
2,8 x 2,0	0,0099 (0,0031)	0,0175 (0,0051)	0,0126 (0,0039)
2,8 x 2,5	0,0086 (0,0039)	0,0105 (0,0026)	0,0142 (0,0039)

Os valores em parênteses correspondem aos respectivos desvios-padrão.

Os espaçamentos extremos apresentaram valores de volume próximos, com baixa variabilidade, com exceção do tratamento com espaçamento de 2,8 x 0,5 m na dose 3, cujo desvio-padrão mostra que há uma variabilidade maior dos dados, provavelmente pelo alto grau de competição entre as plantas intensificada pela maior adição do insumo. Esta variabilidade é confirmada pelos maiores coeficientes de variação da altura e do DAP.

Tabela 37. Coeficientes da equação de volume de madeira com casca do povoamento de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, aos 12 meses de idade, pelo modelo de Spurr

Tratamento	β_0	β_1	R ²	p-valor	p-valor
			ajustado	β_0	β_1
A1	- 0,000005	0,00004947	0,99	0,76	0,00
A2	0,000004	0,00004948	0,99	0,75	0,00
A3	- 0,000004	0,00004949	0,99	0,62	0,00
B1	- 0,000001	0,00004941	0,99	0,96	0,00
B2	- 0,000002	0,00004948	0,99	0,91	0,00
B3	0,000041	0,00004932	0,99	0,06	0,00
C1	- 0,000026	0,00004961	0,99	0,24	0,00
C2	0,000045	0,00004928	0,99	0,01	0,00
C3	0,00004	0,00004944	0,99	0,76	0,00
D1	0,00006	0,00004946	0,99	0,73	0,00
D2	0,000011	0,00004944	0,99	0,59	0,00
D3	- 0,000036	0,00004961	0,99	0,04	0,00
E1	0,000008	0,00004946	0,99	0,53	0,00
E2	0,000012	0,00004943	0,99	0,61	0,00
E3	0,000015	0,00004943	0,99	0,53	0,00

Os modelos de volume ajustados para o povoamento de *Eucalyptus urograndis*, aos 12 meses de idade, apresentaram coeficientes de determinação extremamente altos, com os valores dos coeficientes β_1 adequados, porém os coeficientes β_0 foram significativos apenas nos tratamentos B3, C2 e D3.

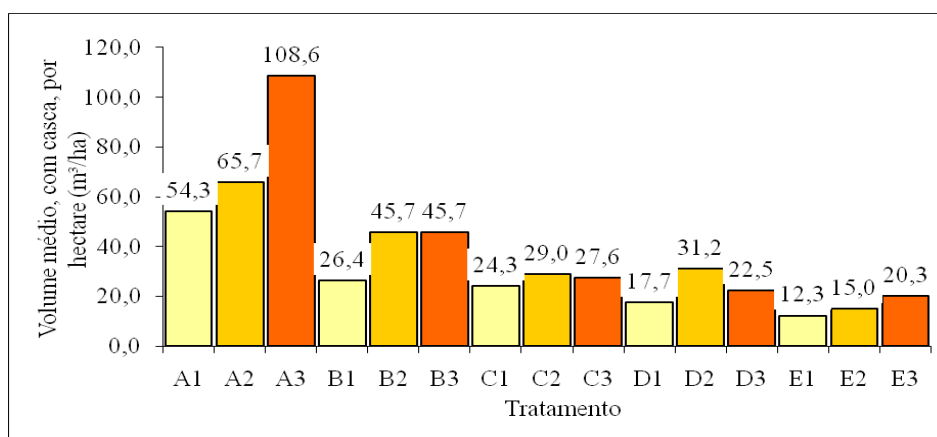


Figura 47. Volume médio, com casca, por hectare, de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, em função dos espaçamentos (A: 2,8 x 0,5 m; B: 2,8 x 1,0 m; C: 2,8 x 1,5 m; D: 2,8 x 2,0 m e E: 2,8 x 2,5 m).

Um decréscimo do volume de madeira com casca por hectare pôde ser observado em razão do aumento da distância entre as árvores nos três níveis de adubação, sendo que a dose (3) de NPK + B + Zn, nos diferentes espaçamentos, não promoveu volumes distanciados da dose usual da empresa (2), com exceção do menor espaçamento. Esta tendência do efeito do espaçamento também foi verificada por Berger et al. (2002) em povoamento de *Eucalyptus saligna*, realizando medições do terceiro até o décimo ano após o plantio, porém estes autores não encontraram influência da adubação com fósforo. Garcia et al. (1991) avaliaram povoamento de *E. grandis*, aos 10 anos de idade, encontrando maiores volumes por hectare em plantações mais adensadas (3,0 x 1,0 m e 3,0 x 1,5 m). Leles et al. (2001) comentaram que ocorre um contínuo decréscimo da produção de madeira de espécies de eucalipto com o aumento do espaçamento. Ainda em plantios de *Acacia* sp., Schneider et al. (2000) concluíram que menores espaçamentos propiciam maior produção de madeira e de casca, todavia com menor diâmetro médio. Foi possível constatar, neste trabalho, uma confirmação de que os menores espaçamentos produzem mais volume de madeira com casca, no entanto, é necessário ponderar esta produção com adequações no ciclo de corte; especialmente nos tratamentos que contemplaram menores distâncias entre plantas (2,8 x 0,5 m; 2,8 x 1,0 m e 2,8 x 1,5 m).

7 CONCLUSÕES

- As características físicas do solo, no local do experimento, estavam propícias para o desenvolvimento de espécies florestais;
- A maioria dos macronutrientes do solo, antes da implantação do experimento, eram inferiores aos indicados para a cultura; dos micronutrientes, o boro, o cobre e o zinco foram satisfatórios;
- As diferenças das taxas de crescimento entre os tratamentos surgiram em torno do terceiro mês após o plantio;
- O maior incremento em altura ocorreu no espaçamento 2,8 x 0,5 m com superdose de adubação;
- Os espaçamentos mais adensados geraram as maiores variações entre indivíduos, considerando-se os parâmetros DAP e altura, aos 12 meses de idade;
- A dose 2, dose usual, foi eficiente para a produção em volume na maioria dos espaçamentos, com exceção do espaçamento 2,8 x 0,5 m;
- Espaçamentos mais adensados de eucalipto são indicados para a produção de biomassa para energia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2009**. 140 p. ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Brasília-DF, 2010.

ACCIOLY, C. V. Medidas de assimetria e curtose (material didático). Disponível em: <http://www1.eeg.uminho.pt/economia/prinscila/intocaveis/FMIE04/assimetriacurtose.pdf>, acessado em 19/06/2009.

ACOSTA, J. J. B. Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de quatro solos da Fazenda Lageado, Botucatu-SP: correlações e mapas de isocompactação. 2008. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In_ **ASAE Standards 1999_ standards engineering practices data**. 46.ed. St. Joseph. p. 991-3 (ASAE EP542).

ANDRADE, G. C.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A. Efeito da adubação fosfatada e da aplicação de resíduo de celulose no crescimento de *Eucalyptus dunnii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 47, p. 43-54, 2003.

ANDRADE, G. C.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. Adubação fosfatada e potássica em plantios de *Acacia mearnsii* De Wild (acácia-negra). **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 48, p. 65-74, 2004.

ASSIS, R. L. e LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um nitossolo vermelho distroférrico sob sistema de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, 29: 507-514, 2005.

BARRETO, V. C. M.; VARELI, S. V.; REGO, N. H.; ORLANDO, C. A.; RIGOBELLO, E. C. **Doses de boro no desenvolvimento de clone de eucalipto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife-PE, 2005. Anais. Recife, PE. (CD-ROM). 2005.

BELLOTE, A. F. J e FERREIRA, C. A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de *Eucalyptus grandis*, na região de cerrado, no estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 26/27, p. 17-28, 1993.

BELLOTE, A. F. J e DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 53, p. 21-38, 2006.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria – RS, v. 12, n. 2, p. 75-87, 2002.

BLOUIN, V. M.; SCHMIDT, M. G.; BULMER, C. E.; KRZIC, M. Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. **Forest Ecology and Management**. 225, p. 2444-2452, 2008.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas (2 Ed.) Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 470p.

CARDOSO, V. M. F.; LANÇAS, K. P.; SILVA, R. B. Sustentabilidade estrutural de um solo na região do alto do Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 23, n. 3, p. 108-143, 2008.

CARDOSO JÚNIOR, A. A. **Tensões de crescimento em Eucalyptus e suas relações com espaçamento, idade e material genético**. 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. e VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesq. agrop. bras.** (on line), Brasília, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; SOUZA, G. D.; SCHLICK, E. C. **Dependência espacial do pH do solo em um Latossolo vermelho-amarelo sob cultivo de seringueira na região de cerrado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife-PE, 2005. Anais. Recife, PE. (CD-ROM). 2005.

CASAGRANDE, A. A. Compactação e manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.) **Qualidade do solo: métodos de estudo, sistemas de prepare e manejo do solo.** Jaboticabal-SP: FUNEP, 2002. p. 150-197.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo.** (on-line), Viçosa, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CAVALIERI, K. M. V. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação física do solo.** 2007. 72 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.

CLARK, R.L. **Effect of controlled traffic on soil cone index.** St. Joseph, 1994. 11p. (ASAE Paper, 94-1039).

CLARK, R.L.; RADCLIFFE, D. E.; LANGDALE, G. W.; BRUCE, R. R. Soil strength and water infiltration as affected by paratillage frequency. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.5, p.1301-1305, 1993.

COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **IPEF**, n. 1, p. 29-55, 1970.

COUTO, E. G. e KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do estado de Mato Grosso. **Pesq. agropec. bras.** (on-line), Brasília, v. 34, n. 12, p. 2321-2329, dez. 1999.

DANFORS, B. Compaction in the subsoil. **Swed. Inst. Agric. Eng. Spec. Publi.** 5. 1974.

DEDECEK, R. A.; MENEGOL, O.; BELLOTE, A. F. T. Avaliação da compactação do solo em plantios jovens de *Pinus taeda*, com diferentes sistemas de preparo de solo. **Bol. Pesq. Fl.**, Colombo-PR, n. 40, p. 5-21, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do solo. **Manual de métodos de análises do solo**. Rio de Janeiro, RJ, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. p. 212.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** (2. ed.) Rio de Janeiro - RJ: Embrapa Solos, 2006.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. ed. **Colheita Florestal**. Editora UFV, Viçosa-MG, 2006, p. 375-396.

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita de madeira**. 1999. 185 f. Tese (livre-docência). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

FERREIRA, C. A. e SILVA, H. D. Afilamento e forma do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* e suas variações com a adubação. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 44, p. 87-106, 2002.

FIDALSK, J.; TORMENA, C. A.; GOLÇALVES, A. L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e a taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo vermelho eutrófico. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 36, n. 6, 2006.

FISHER, F. R. e BINFLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. (3. Ed.) Editora John Wiley & Sons, Inc. 2000. 489p.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 49-57, 2006.

FORD, E. D. The dynamics of plantation growth. In: BOWEN, G. D. e NAMBIAR, E. K. S. (Ed.) **Nutrition of plantation forests**. London: Academic Press, 1984. p. 16-52.

GARCIA, C. H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S. F. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. **IPEF**, Circular Técnica nº 179, dezembro de 1991.

GONÇALVES, J. L. de M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. do Relações entre produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no estado de São Paulo. **IPEF**, n. 43/44, p. 24-39, jan./dez. 1990.

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAUJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 67-75, 2006.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P. Desenvolvimento de um sistema informatizado para aquisição e armazenamento de dados de sensores analógicos e receptor GPS. **Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 21, n. 3, p. 93-107, 2

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. 78 f. Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2004.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo no cultivo de feijoeiro: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; PETH, S.; BECKER, S. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. **Forest Ecology and Management**, 248, p. 56-63, 2007.

HUBER, M.; HALMSCHLAGER, E.; STERBA, H. The impact of forest fertilization on growth of mature norway spruce affected by *Sirococcus shoot* blight. **Forest Ecology and Management**, 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Informação sobre interpretação e análise de solo**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais. IAC. Campinas-SP. Disponível em:
<http://www.iac.sp.gov.br/UniPesquisa/Solo/Serviço/Interpretação.asp> , acessado em 11/09/2009.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAUJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008.

KLEIN, W. L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H. P. Altura do ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae*) nos manejos convencional e de precisão, analisada pela geoestatística. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 17, n. 4, p. 299-309, out-dez 2007.

LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; PEREIRA, F. J. S.; JESUINO, P. R. Avaliação da compactação em função do tipo de solo e manejo do solo. In: SAAD, J. C. C. e LANÇAS, K.

P. (ed.) **Uso racional da água e conservação do solo em áreas irrigadas sob plantio direto e convencional**. Boletim Técnico. Projeto nº 475 da FEHIDRO, FCA, UNESP, Botucatu-SP, p. 1-33, 2005a.

LANÇAS, K. P.; PEREIRA, F. J. S.; ACOSTA, J. J. B. Estudo de caso: avaliação da compactação do solo. In: SAAD, J. C. C. e LANÇAS, K. P. (ed.) **Uso racional da água e conservação do solo em áreas irrigadas sob plantio direto e convencional**. Boletim Técnico. FCA, UNESP, Botucatu-SP, p. 35-48, 2005b.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 77-87, jun. 2001.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. L.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores de colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.

LOURENÇO, R. S.; MEDRADO, M. J. S.; DALZOTO, D. N. Efeito de níveis de potássio sobre a produtividade de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) no município de Ivaí-PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 39, p. 119-131, 1999.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo distrófico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Lavras-MG, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P.; FAULIN, G. D. Análise especial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 442-452, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo Navistar-GPS: descrição, fundamentos e aplicações.** Departamento de Cartografia FCT/UNESP – Campus de Presidente Prudente. Setembro, de 1998. 182p.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JUNIOR, J. SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolos e Argissolos. **Ciência Rural** (on-line), Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, ago., 2008.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG.** 94f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

NETO, P. C., NAGAOKA, A. K., LANÇAS, K. P. **Agricultura de precisão: mapas de isocompactação.** In. SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu – SP. UNESP-FCA, 1999, p. 454-459.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliotti* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n. 42, p. 123-138, 2001.

OLIVEIRA, M. L., BARBOSA, J. A., SOUZA, C. M., DIAS, G. P. **Estimativa da compactação do solo pelo método da curva de compactação virgem do solo.** In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 27, 1999, Brasília – DF. Resumos..., Embrapa Cerrados, cd-rom, 1999.

PERES, R. M. P. **Geoprocessamento aplicado ao desenvolvimento de uma base de dados no município de Botucatu-SP.** Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem). Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu-SP, 2006.

PINTO, R. M. C. **Assimetria e curtose** (material didático). Faculdade de Matemática. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em:

www.famat.ufu.br/prof/rogerio/rogerio_arquivos/est%20biologia/assim%20e%20artox%204.pdf, acessado em 19/06/2009.

RAIJ et al. Análise química para avaliação de fertilidade de solos tropicais. Campinas-SP: IAC, 2001. 285p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria. 2006.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1805-1816, 2008.

RODRIGUES, F. A. V. **Disponibilidade de cobre e zinco para mudas de eucalipto em solos de cerrado**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

RONDON, E. V. Estudo de biomassa de *Tectona grandis* sob diferentes espaçamentos no estado de Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 3, p. 337-341, 2006.

ROQUE, M. W. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural**. 2003. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Irrigação e drenagem). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROQUE, C. G.; CENTURION, J. F.; PEREIRA, G. T.; BEUTLER, A. N.; FREDDI, O. S.; ANDRIOLI, I. Mapeamento da produtividade e perímetro do tronco de clones de seringueira em argissolo vermelho-amarelo. **Scientia Forestalis**, n. 70, p. 59-66, abril 2006.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesq. Agropecu. Bras.**, Brasília, v.34, n.5, p. 821-828, 1999.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, Campinas, 53 (2): 259-266, 1994.

SALVADOR, J. F.; GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; GARCIA, E. A.; FENNER, P. T.; SPINELLI, R.; PICCHI, G. **Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas**. In: SIMPÓSIO DE SILVICULTURA TROPICAL, 1., 2009, Botucatu-SP, Unesp, FCA, cd-rom, 2009.

SANTOS, A. dos S. **Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico**. Botucatu – SP, 1998, 105 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Energia na Agricultura).

SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M. Crescimento da acácia negra, *Acacia mearnsii* De Wild em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 10, n. 2, p. 101-112, 2000.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, F. P. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um “forwarder” nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, (31): 371-377, 2007.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade especial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico. **R. Bras. Ci. Solo**. (on-line), Viçosa, v. 27, p. 1013-1020, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 34, v. 2, p. 399-406, 2004.

SILVA, C. R. Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo. 2005. 50 p. Dissertação

(Mestrado em Recursos Florestais - Silvicultura e Manejo Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.) **Qualidade do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal-SP: FUNEP, 2002. p. 1-20.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; VILAS BOAS, B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 759-768, 2006.

SIQUEIRA, R. Sistemas de preparo do solo e plantio direto. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.) **Qualidade do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal-SP: FUNEP, 2002. p. 88-149.

SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesq. Agropec. Bras.** (on-line), Brasília, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, out. 2000.

SIMÕES, L. B. CARDOSO, L. C. **Uso do SIG IDRISI no planejamento regional em Botucatu**. (sem data). Disponível em: <http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C21-SIBBotucatu-LL.pdf>, acessado em 21/09/2009.

SOARES, C. P. B; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 276p.

SOUZA, Z.M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I, H, L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 36, n. 1, 2006.

STAFFORD, J. V.; AMBLER, B. In-field location using GPS for spatially variable field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 11, p. 23-36, 1994.

STAPE, J. L. **Determinação experimental e regional da produtividade potencial de florestas de *Eucalyptus* no Brasil**. In: SIMPÓSIO DE SILVICULTURA TROPICAL, 1., 2009, Botucatu-SP, Unesp, FCA, cd-rom, 2009.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistemas de informação geográfica**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu-SP.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural** (on-line), Santa Maria-RS, v. 37, p. 1000-1007, n. 4, jul-ago, 2007.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; NOLLA, A. **Geoestatística na avaliação da variabilidade espacial de micronutrientes em Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., Recife-PE, 2005. Anais. Recife, PE. (CD-ROM). 2005.

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

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, jul-ago, 2006.