

INTER-RELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE MADEIRA DO PINUS COM ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO DO CERRADO BRASILEIRO¹

Carlos Eduardo Madureira Barbosa², Samuel Ferrari³, Morel de Passos e Carvalho⁴, Pedro Renan Ferreira Picoli⁵, Maria Cecília Cavallini⁶, Cleiton Gredson Sabin Benett⁷ e Danilo Marcelo Aires dos Santos⁸

RESUMO – Com relação aos atributos do solo, a produtividade de madeira do pinus varia substancialmente em função do pH, do teor de matéria orgânica e da resistência à penetração. No ano de 2007, no Município de Selvíria (MS) foi analisada a produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em função de alguns atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico estabelecido num maciço florestal com 21 anos de idade. O objetivo foi selecionar, entre os atributos pesquisados do solo, aquele que melhor se apresentasse para explicar a variabilidade da produtividade de madeira. Para tanto, foi instalado um grid geostatístico, para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 121 pontos amostrais, numa área de 3 ha do referido maciço. A produtividade de madeira variou diretamente com o pH do solo, tanto linear quanto espacialmente, com valores de 27,0-32,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 3,9-4,4, respectivamente. Nos maiores, 32,6-36,9 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 4,4-4,9. Dessa forma, o pH revelou ser um apreciável indicador da qualidade química do solo quando o objetivo foi estimar, linear e espacialmente, a produtividade de madeira da essência florestal pesquisada nas condições do Cerrado brasileiro do Sudeste do Estado do Mato Grosso do Sul.

Palavras-chave: Qualidade físico-química do solo, Krigagem e Silvicultura.

RELATIONSHIP BETWEEN PINE WOOD YIELD AND PHYSICAL AND CHEMICAL TRAITS OF A BRAZILIAN CERRADO OXISOIL

ABSTRACT – Concerning the soil traits, the pine wood productivity changes intensely in function of pH, organic matter content and mechanics resistance penetration, as well. Wood yield of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* was analyzed in function of some physical-chemical traits of a Dystrofic Red Latosol at 21 years of age in the municipality of Selvíria in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil, in 2007. The objective of this work was to select, among the soil traits studied, the one that could show better so to explain wood yield. Therefore, a geostatistical grid was set up for soil and plant data collecting, with 121 sample points in a 3-ha area. Wood yield changed directly with soil pH, in a linear and special fashion, with values of 27.0-32.6 m³. ha⁻¹. year⁻¹ and 3.9-4.4, respectively. In the highest ones, 32.6-36.9 m³. ha⁻¹. year⁻¹ and 4.4-4.9. Thus, pH revealed to be an appreciable index of the chemical quality of the soil, when the objective was to linearly and spacially estimate wood yield of the forest points studied in the conditions of Brazilian cerrado in the southeastern Mato Grosso do Sul.

Keywords: Physical and chemical traits of soil, Kriging, Silviculture.

¹ Recebido em 24.05.2010 e aceito para publicação em 15.11.2011.

² Mestrado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <cae_barbosa@hotmail.com>.

³ Departamento de Agricultura, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Registro, Brasil. E-mail: <ferrari@registro.unesp.br>.

⁴ Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <morel@agr.feis.unesp.br>.

⁵ Mestrado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <renan_agro@yahoo.com.br>.

⁶ Mestrado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <cecicavallini@hotmail.com>.

⁷ Mestrado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <cbenett@hotmail.com>.

⁸ Doutorado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: <dmaires@hotmail.com>.

1. INTRODUÇÃO

Conforme o IPEF (2008), o *Pinus* sp. é plantado em todo o mundo, valorizado pelas características da madeira de cor clara, variando de branca a amarelada, e muito utilizado pela indústria de madeira serrada e laminada, chapas, resina, celulose e papel, entre outros. Sua produtividade média no Brasil atinge 20 a 28 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, havendo situações em que ultrapassa 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Conforme Lamprecht (1990), na forma de maciço florestal o *Pinus caribaea* pode atingir elevados valores de altura e DAP, respectivamente de 45,0 e 1,00 m, uma vez que se adapta às condições de solos degradados, com pH entre 4,3 e 6,5 e clima invernal seco reinante no Cerrado brasileiro. Leite et al. (2006), avaliando a espécie *Pinus taeda* de 14 anos, obtiveram valores de altura, diâmetro à altura do peito e de volume de 17,5 m, 24,1 cm e de 26,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, com incremento médio anual de 1,88 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Sanquetta et al. (2004), em experimento com *Pinus taeda* no Município de Jaguariaíva, PR, com corte aos 20 anos, obtiveram um volume de madeira máximo de 28,98 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com incremento médio anual de 1,45 m³. ha⁻¹.ano⁻¹.

A capacidade produtiva do pinus pode ser afetada pelo pH e matéria orgânica do solo, sendo os valores ideais mostrados por Gonçalves et al. (1997) de 5,8 e 40 g dm⁻³, respectivamente. Contudo, o desenvolvimento adequado das espécies florestais não depende apenas dos atributos químicos e biológicos do solo, mas também dos atributos físicos (PEDROTTI et al., 2001), motivo pelo qual o estado da agregação recebe especial atenção, pois está relacionado com sua aeração, desenvolvimento radicular, suprimento de nutrientes, resistência à penetração e retenção e armazenamento de água. Entretanto, a maioria das pesquisas relacionadas à compactação do solo adota atualmente a seguinte classificação da resistência à penetração (RP), estabelecida por Arshad et al. (1996): (a) extremamente baixa: RP < 0,01 MPa; (b) muito baixa: 0,01 ≤ RP < 0,1 MPa; (c) baixa: 0,1 ≤ RP < 1,0 MPa; (d) moderada: 1,0 ≤ RP < 2,0 MPa; (e) alta: 2,0 ≤ RP < 4,0 MPa; (f) muito alta: 4,0 ≤ RP < 8,0 MPa; e (g) extremamente alta: RP > 8,0 MPa. Assim, conforme Gonçalves et al. (1990) e Rigatto (2002), a existência de camadas de impedimento físico à penetração das raízes, drenagem interna impedida e capacidade de armazenamento de água e de oxigênio deficientes aumentam os riscos de estresse hídrico às plantas nos períodos de estiagem, sendo este último o fator mais limitante do crescimento das árvores.

A agricultura de precisão é representada por toda tentativa de desenvolvimento econômico do meio rural, apoiada no ótimo da eficiência gerencial de que determinadas áreas agrícolas necessitam, de forma localizada no espaço. Assim, a partir da obtenção do alcance da dependência espacial possibilitada pela geoestatística, pode-se efetuar o mapeamento das correlações, diretas e, ou, indiretas, entre os atributos do solo e a produtividade das culturas. Como resultado, pode-se utilizar a aplicação dos insumos em taxas variadas, com o intuito de maximizar a relação benefício/custo (VETTORAZZI; FERRAZ, 2000).

A administração georreferenciada das atividades silviculturais baseia-se na coleta e análise de dados geoespaciais, viabilizando intervenções localizadas na floresta, com a exatidão e precisão adequadas (VETTORAZZI; FERRAZ, 2000). Assim, a pesquisa com o *Eucalyptus grandis*, analisado aos 7 anos de idade num Latossolo Vermelho Distrófico típico da região de Itapetininga, SP, revelou um volume de madeira de 37,27 m³. ha⁻¹.ano⁻¹, com o coeficiente de variação de 12,6% e alcance da dependência espacial de 250 m. Já com relação à altura média tais parâmetros foram, respectivamente, de 27,6 m, 6,9% e de 279 m (MELLO et al., 2005). Entretanto, exclusivamente em relação à pesquisa de atributos físico-químicos do solo do Noroeste do Estado de São Paulo (CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2006; BEZERRA, 2008), foram constatadas as seguintes faixas para a resistência à penetração (1,286-2,869 MPa), umidade gravimétrica (0,160-0,196 kg⁻¹), pH (5,47-6,61) e teor de matéria orgânica (9,6-24,9 g dm⁻³). Já os coeficientes de variação ficaram entre 3,6-46,9%, assim como os alcances da dependência espacial, entre 2,6-67,1 m. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo pesquisar, entre os atributos trabalhados do solo e da planta, um indicador da qualidade físico-química do solo, visando ao aumento da produtividade de madeira da essência florestal estudada.

2. MATERIALE MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Área Experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia da UNESP/Campus de Ilha Solteira, localizada no Município de Selvíria, MS. Suas coordenadas geográficas são latitude 20°20' S e longitude 51°24' W, com altitude média de 344 m e clima do tipo Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Apresenta as médias anuais de temperatura e precipitação, respectivamente, de 24,5 °C e 1.232 mm (HERNANDEZ

et al., 1995). O solo da área é um Latossolo Vermelho Distrófico típico muito argiloso (EMBRAPA, 2006). O experimento foi realizado durante o ano de 2007, instalado em um florestamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 21 anos, cujo plantio ocorreu em 26/04/1986, com o espaçamento de 3 x 3 m e atualmente com a taxa de desbaste de 40%.

Foi montado um *grid* retangular (300 m x 100 m) internamente ao florestamento, com o espaçamento de 10 m x 10 m entre pontos amostrais (grande malha), com 77 pontos, num declive médio de 0,033 m m⁻¹. Foi realizada também a adição de mais 44 pontos (malha de refinamento) internamente à grande malha, espaçados de 3,33 m x 3,33 m, visando detectar alcances da dependência espacial dos dados para condições menores do que 10 m, totalizando 121 pontos.

No entorno de cada ponto amostral foram obtidos os seguintes atributos do solo: resistência à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), pH e teor de matéria orgânica (MO). Foram identificados, em profundidade, da seguinte forma: (a) de 0-0,10 m: RP1, UG1, MO1 e pH1; (b) 0,10-0,20 m: RP2, UG2, MO2 e pH2; e (c) 0,20-0,30 m: RP3, UG3, MO3 e pH3. Também, foram obtidos os atributos da planta, dados pelo Perímetro à Altura do Peito (PAP, em m) e pela Altura da Árvore (ALT, em m). Para a tomada do PAP e da ALT de uma árvore qualquer, foram avaliadas todas as medidas daquelas contidas, a partir do ponto amostral central, dentro de uma área cujo raio foi de 4,24 m (56,47 m²). Assim, foi calculado de cada árvore o seu volume de madeira (VOL), pela seguinte expressão:

$$VOL = PAP^2 \cdot ALT \cdot 1,81664 \quad (1)$$

em que VOL representou o volume de madeira da árvore (m³.ha⁻¹.ano⁻¹), PAP foi o perímetro à altura do peito (m), ALT a altura da árvore (m) e o 1,81664 a constante originada de (0,68.705)/(4.π.21), com 0,68 sendo o fator de forma a ser usado na espécie trabalhada; 705 foi o número de árvores por hectare e 21, a idade em anos do arboreto. Os dados do PAP e da ALT foram coletados em 22/08/2007.

A resistência mecânica à penetração, obtida em 15/08/2007 com o penetrômetro de impacto, foi calculada segundo a expressão contida em Souza et al. (2001):

$$RP = (5,581 + 6,891 \cdot ((N/(P-A)) \cdot 10)) \cdot 0,0981 \quad (2)$$

em que RP representa a resistência do solo à penetração (MPa), N é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da

leitura e A e P são as leituras tomadas antes e depois dos impactos (cm). As amostras deformadas de solo, utilizadas para determinação da umidade gravimétrica (UG), pH e teor de matéria orgânica do solo (MO), foram coletadas no mesmo momento da avaliação da resistência à penetração, sendo todos os atributos determinados conforme Embrapa (1997).

De cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica, com o auxílio do *software* estatístico SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, realizou-se o teste de Shapiro e Wilk a 1%. Também, foi montada a matriz de correlação, para efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. Assim, selecionaram-se aqueles de maior correlação linear e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a consequente co-krigagem. Também, conjuntamente em todas as camadas estudadas do solo, efetuou-se a regressão linear múltipla entre a variável dependente (VOL) e as independentes (atributos do solo), objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo implemento do coeficiente de determinação. Isoladamente para cada atributo, foi analisada a dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples. Assim, para aqueles que não a apresentaram, isto é, na ausência de estacionariedade, retirou-se a tendência dos dados por meio da técnica do refinamento pela mediana, conforme Silva et al. (2003), pela equação 3.

$$NV = VO - (ML + MC) + MG \quad (3)$$

em que NV representa o novo valor residual do atributo, VO o valor original do atributo do qual foi retirada a tendência, ML e MC representam, respectivamente, os valores da mediana da linha e da coluna nas quais o atributo se encontrava e MG representa a mediana geral dos atributos contidos na malha amostral. Dessa forma, recalcularam-se os semivariogramas, com os resíduos obtidos desse procedimento, de forma a apresentar, agora, os atributos precedidos pelo símbolo #. Entretanto, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionariedade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS+, 2004). Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função

de seus modelos, foram efetuados pela seleção inicial de menor soma dos quadrados dos desvios (RSS), maior coeficiente de determinação (r^2) e maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e, ou, co-krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos. Para cada atributo foram relacionados o efeito-pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a seguinte expressão (GS+, 2004):

$$ADE = [C / (C + C_0)] \cdot 100 \quad (4)$$

em que ADE é o avaliador da dependência espacial, C a variância estrutural e $C + C_0$ o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: $ADE \leq 25\%$ indica

variável espacial fracamente dependente, $25\% < ADE \leq 75\%$ indica variável espacial moderadamente dependente e $ADE > 75\%$ indica variável espacial fortemente dependente. No entanto, sabe-se que a validação cruzada é ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados que efetuarão, respectivamente, a krigagem e a co-krigagem. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* observados, para todos os pontos. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de co-krigagem, para análise da dependência e interdependência espacial entre os atributos.

3. RESULTADOS

Na Tabela 1, a grande maioria dos atributos teve distribuição de frequência do tipo normal, exceção feita apenas a MO2, MO3, pH1, pH2 e pH3, que a apresentaram

Tabela 1 – Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria (MS).

Table 1 – Descriptive initial analysis of some attributes of wood productivity of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and a oxisol Selvíria-MS Brazil.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor					Coeficiente			Probabilidade de teste ^(b)	
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr < w	DF
Atributos da planta										
PAP (m)	0,868	0,867	0,709	1,116	0,074	8,5	0,128	0,251	0,175	NO
ALT (m)	24,352	24,500	19,525	29,383	2,002	8,2	-0,073	-0,214	0,059	NO
VOL (m ³ .ha ⁻¹ ano ⁻¹)	33,792	33,219	18,309	50,184	7,212	21,3	-0,891	0,086	0,059	NO
Resistência à penetração										
RP1 (MPa)	2,187	2,232	0,754	3,866	0,603	27,6	-0,125	-0,079	0,798	NO
RP2 (MPa)	2,701	2,758	0,879	5,085	0,653	24,2	0,864	0,066	0,354	NO
RP3 (MPa)	2,367	2,292	1,095	4,498	0,618	26,1	0,436	0,526	0,093	NO
Unidade gravimétrica										
UG1 (kg.kg ⁻¹)	0,142	0,142	0,124	0,160	0,007	4,6	0,047	0,069	0,922	NO
UG2 (kg.kg ⁻¹)	0,156	0,155	0,137	0,183	0,008	5,4	0,576	0,300	0,313	NO
UG3 (kg.kg ⁻¹)	0,166	0,167	0,144	0,186	0,008	5,0	0,025	-0,279	0,412	NO
Matéria orgânica										
MO1 (g.dm ⁻³)	17,3	17,0	10,0	28,0	3,709	21,5	-0,517	0,178	0,018	TN
MO2 (g.dm ⁻³)	11,0	10,0	7,0	19,0	2,682	24,4	1,138	1,089	10 ⁻⁴	IN
MO3 (g.dm ⁻³)	8,2	8,0	6,0	12,0	1,408	17,3	0,014	0,610	10 ⁻⁴	IN
pH do solo										
pH1	4,27	4,20	3,90	4,90	0,232	5,4	-0,054	0,816	10 ⁻⁴	IN
pH2	4,36	4,30	3,90	5,20	0,294	6,8	0,078	0,929	10 ⁻⁴	IN
pH3	4,46	4,30	4,00	5,30	0,345	7,8	-0,456	0,727	10 ⁻⁴	IN

(a) PAP=perímetro à altura do peito; ALT=altura da árvore; VOL=volume de madeira; RP, UG, MO e pH, de 1 a 3, são respectivamente a resistência à penetração, umidade gravimétrica, teor de matéria orgânica e o pH do solo em profundidade, e (b) DF=distribuição de frequência do tipo NO=normal, TN=tendendo à normal e IN=indefinida.

como indeterminada. Aqueles do tipo normal revelaram valores da estatística do teste de normalidade entre 0,059 (VOL) e 0,922 (UG1), assim como coeficientes de assimetria e de curtose, respectivamente, entre -0,279 e 0,526 e de -0,891 e 0,864. Portanto, no geral, a medida de tendência central que deverá representá-los é a média.

O volume apresenta-se fortemente ligado à produtividade da madeira, sendo, portanto, responsável pelo retorno econômico que a essência florestal proporciona. Na Tabela 1 foi observado o volume médio de madeira de 33,8 m³. ha⁻¹.ano⁻¹, relativo ao incremento médio anual de 1,61 m³. ha⁻¹.ano⁻¹.

Os valores médios da resistência à penetração foram de 2,187 MPa (RP1), 2,701 MPa (RP2) e 2,367 MPa (RP3). Contudo, essa magnitude, ainda que elevada, não foi o suficiente para limitar a produtividade de madeira da essência florestal estudada. Já os dados da umidade gravimétrica, que aumentaram em profundidade, com valores entre 0,142 kg kg⁻¹ (UG1) e 0,166 kg kg⁻¹ (UG3), validaram perfeitamente aqueles da resistência à penetração (Tabela 1).

As correlações entre os atributos da planta (Tabela 2) apresentaram significância para os pares VOLxPAP (r = 0,940**), VOLxALT (r = 0,705**) e ALTxPAP (r = 0,430**), todas com relação direta entre causa e efeito.

Na Tabela 2, as correlações dos atributos da planta com os do solo, devido ao elevado número de observações (n = 121), foram baixas. Contudo, de elevada significância estatística, evidenciadas para: (a) ALTxRP1, ALTxUGs e a ALTxpHs (0,214 < r < 0,487); e (b) VOLxpHs (0,185 < r < 0,248).

A análise geoestatística das krigagens simples (Tabela 3) evidenciou excelentes semivariogramas, tanto para a planta quanto para o solo. O melhor deles foi ajustado para a # ALT, com um coeficiente de determinação espacial de 0,986, enquanto para o VOL foi de 0,914. Desse modo, suas distribuições no espaço não foram aleatórias, uma vez que a classe de dependência espacial do VOL foi de 38,2% (moderada) e a do solo variou entre 50,2 - 84,3%, respectivamente, como moderada (RP3) e alta (RP1).

Para todos os atributos (Tabela 3), os modelos ajustados foram o esférico (RP1, MO2, #ALT=f[PAP], pH1, pH2), o exponencial (VOL=f[PAP]) e o gaussiano (PAP, #ALT, VOL, VOL=f[#ALT], VOL=f[pHs], RP3 e o pH3).

Tabela 2 – Matriz de correlação linear simples entre atributos da produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria, MS.

Table 2 – Array of simple linear correlation between attributes of wood productivity of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* oxisoil Selvíria, MS, Brazil.

Atributos^(a)

	Coeficiente de correlação ^(b)													
	PAP	ALT	VOL	RP1	RP2	RP3	UG1	UG2	UG3	MO1	MO2	MO3	pH1	pH2
ALT	0,430**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VOL	0,940**	0,705**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP1	-0,107	0,214*	-0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP2	-0,139	-0,007	-0,116	0,469**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP3	-0,096	-0,114	-0,121	0,342**	0,661**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG1	0,043	0,279**	0,136	0,131	-0,230*	-0,186*	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	0,006	0,279**	0,111	0,106	0,338**	0,417**	0,632**	-	-	-	-	-	-	-
UG3	-0,037	0,320**	0,088	0,212*	-0,171	0,299**	0,595**	0,771**	-	-	-	-	-	-
MO1	-0,029	-0,057	-0,049	0,255**	-0,135	-0,087	0,052	0,097	0,046	-	-	-	-	-
MO2	0,094	0,060	0,088	-0,162	-0,140	0,033	0,122	-0,101	0,118	0,338**	-	-	-	-
MO3	0,000	-0,057	-0,020	0,263**	-0,201*	-0,154	0,080	0,000	0,034	0,275**	0,462**	-	-	-
pH1	0,068	0,362**	0,185*	0,009	-0,086	-0,025	0,172	0,127	0,012	0,390**	0,355**	0,172	-	-
pH2	0,093	0,478**	0,248**	0,170	0,044	0,085	0,175	0,133	0,065	0,218*	0,354**	0,137	0,776**	-
pH3	0,056	0,487**	0,223*	0,112	-0,027	0,015	0,095	0,182*	0,097	0,202*	0,321**	0,148	0,699**	0,892**

^(a) PAP = perímetro à altura do peito; ALT = altura da árvore; VOL = volume de madeira; RP; UG, MO e pH, de 1 a 3, são, respectivamente, a resistência à penetração, a umidade gravimétrica, o teor de matéria orgânica e o pH do solo em profundidade; e ^(b) sendo * e ** significativos, respectivamente, a 5% e 1% de probabilidade.



Tabela 3 – Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria, MS.

Table 3 – Parameters of the semivariograms simple to set some attributes of wood productivity of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and a oxisoil Selvíria, MS, Brazil.

Atributo (a)	Parâmetros						Avaliador da dependência espacial	
	Modelo	Efeito Pepita(C_0)	Patamar (C_0+C)	Alcance (A_0) (m)	r ²	SQR (c)	ADE (d)	Classe
$\chi(h)$ simples dos atributos da planta								
PAP (m)	gau	1,541.10 ⁻³	4,142.10 ⁻³	10,4	0,887	4,471.10 ⁻⁷	62,8	moderada
#ALT (m)	gau	4,260.10 ⁻¹	9,170.10 ⁻¹	24,1	0,986	3,203.10 ⁻³	53,5	moderada
VOL (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	gau	3,559.10	5,762.10	66,1	0,914	1,060.10 ²	38,2	moderada
$\chi(h)$ simples dos atributos do solo								
RP1 (MPa)	esf	4,900.10 ⁻²	3,120.10 ⁻¹	9,7	0,942	1,002.10 ⁻³	84,3	alta
RP3 (MPa)	gau	1,360.10 ⁻¹	2,730.10 ⁻¹	11,4	0,894	1,221.10 ⁻³	50,2	moderada
MO2 (g.dm ⁻³)	esf	1,760	5,300	18,3	0,820	9,360.10 ⁻¹	66,8	moderada
pH1	esf	1,540.10 ⁻²	5,230.10 ⁻²	37,5	0,765	6,278.10 ⁻⁴	70,6	moderada
pH2	esf	2,270.10 ⁻²	9,334.10 ⁻²	62,3	0,927	5,038.10 ⁻⁴	75,7	alta
pH3	gau	5,020.10 ⁻²	1,334.10 ⁻¹	54,9	0,984	1,508.10 ⁻⁴	62,4	moderada
$\chi(h)$ cruzado entre atributos da planta e do solo								
VOL=f(PAP)	exp	6,200.10 ⁻²	4,330.10 ⁻¹	19,5	0,794	1,200.10 ⁻²	85,7	alta
VOL=f(#ALT)	gau	2,810	1,337.10	67,9	0,979	4,840	79,0	alta
#ALT=f(PAP)	esf	1,300.10 ⁻²	7,410.10 ⁻²	65,7	0,902	5,790.10 ⁻⁴	82,5	alta
VOL=f(pH1)	gau	1,000.10 ⁻³	5,650.10 ⁻¹	56,8	0,912	8,630.10 ⁻²	99,3	alta
VOL=f(pH2)	gau	7,900.10 ⁻²	9,870.10 ⁻¹	88,2	0,965	4,210.10 ⁻²	92,0	alta
VOL=f(pH3)	gau	1,500.10 ⁻¹	9,360.10 ⁻¹	79,3	0,947	3,580.10 ⁻²	85,2	alta

(a) PAP = perímetro à altura do peito; ALT = altura da árvore; VOL = volume de madeira; RP, UG, MO e pH, de 1 a 3, são, respectivamente, a resistência à penetração, a umidade gravimétrica, o teor de matéria orgânica e o pH do solo em profundidade; ^(b) esf = esférico, gau = gaussiano e epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; e ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Na Tabela 3, os alcances da dependência espacial, de forma geral para todos os atributos, variaram entre 9,7 e 88,2 m. No entanto, nas condições desta pesquisa, assim como visando auxiliar pesquisas futuras nas quais os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os softwares empregados na agricultura de precisão, no geral não deverão ser menores do que 9,7 m; exclusivamente para os atributos da planta, não menores do que 10,4 m. Assim, o alcance da dependência espacial do VOL foi de 66,1 m, sendo, entretanto, o alcance da dependência espacial da RP entre 9,7 e 11,4 m. Já para a MO e o pH o alcance da dependência espacial variou entre 18,3 e 62,3 m.

Na Figura 1 foi observado, em relação aos mapas das krigagens simples, tanto para o VOL quanto para o pH2, a ocorrência dos maiores valores a Leste e, em contrapartida, dos menores a Oeste. Nos sítios onde o pH2 (Figura 1d) foi maior (4,4-4,7), o VOL (Figura 1b)

ficou compreendido entre 32,6-36,9 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Em contrapartida, naqueles em que foi menor (4,0-4,4), o VOL variou entre 27,0-32,6 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Da mesma forma, em relação à co-krigagem de tais atributos, ainda que ela tenha se apresentado de maneira intrincada (Figura 1f), foi observado o mesmo fato, isto é, a Leste ficou evidenciada a faixa de VOL entre 33,3-44,1 m³. ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto a Oeste, entre 18,9-33,3 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Portanto, em virtude de o princípio da convergência das evidências ter mostrado que: (a) o pH2 apresentou correlação direta e significativa com o VOL (Figura 2d); (b) o pH2 e o VOL apresentaram satisfatórios ajustes semivariográficos simples (Tabela 3, Figura 2ac); e (c) houve satisfatório ajuste semivariográfico entre o VOL e o pH2 (Figura 2e) e, ainda que com reservas, o pH2 apresentou-se como aceitável indicador da qualidade química do solo estudado, quando destinado à produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, nas condições do Cerrado brasileiro, presente no Sudeste do Estado do Mato Grosso do Sul.

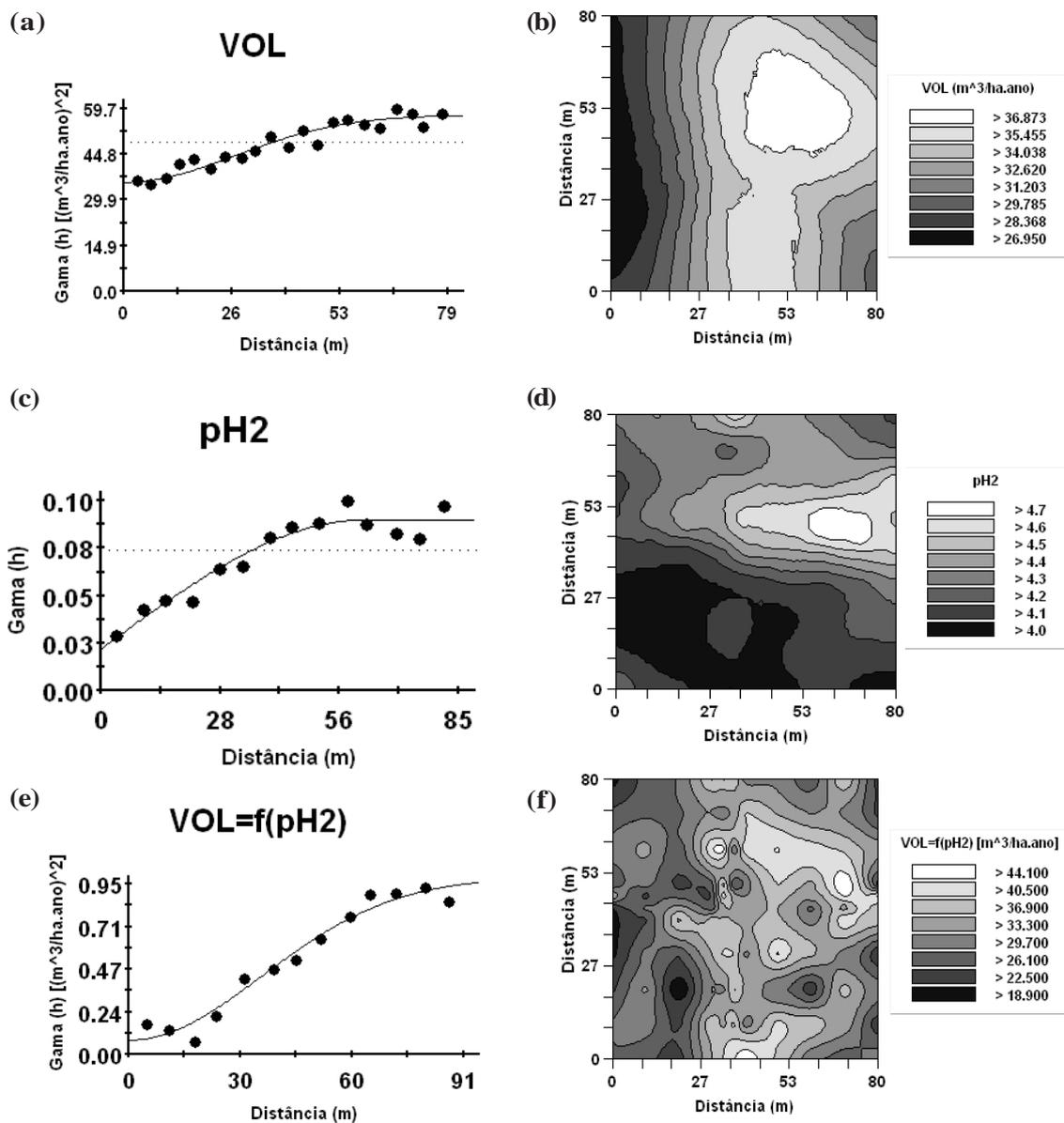


Figura 1 – Semivariogramas e mapas de krigagem de alguns atributos da produtividade de madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria, MS.

Figure 1 – Semivariograms and kriging maps of some attributes of wood yield of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and an Oxisol in Selvíria, MS, Brazil.

4. DISCUSSÃO

Os valores médios da resistência à penetração sugeriram haver, na segunda camada, maior compactação do solo, caracterizada como reação normal ao esforço

aplicado nos tratos culturais empregados para o cultivo, como o preparo do solo, desbastes, capinas, tratamentos fitossanitários, entre outros. Também, conforme a classificação de Arshad et al. (1996), esses valores foram

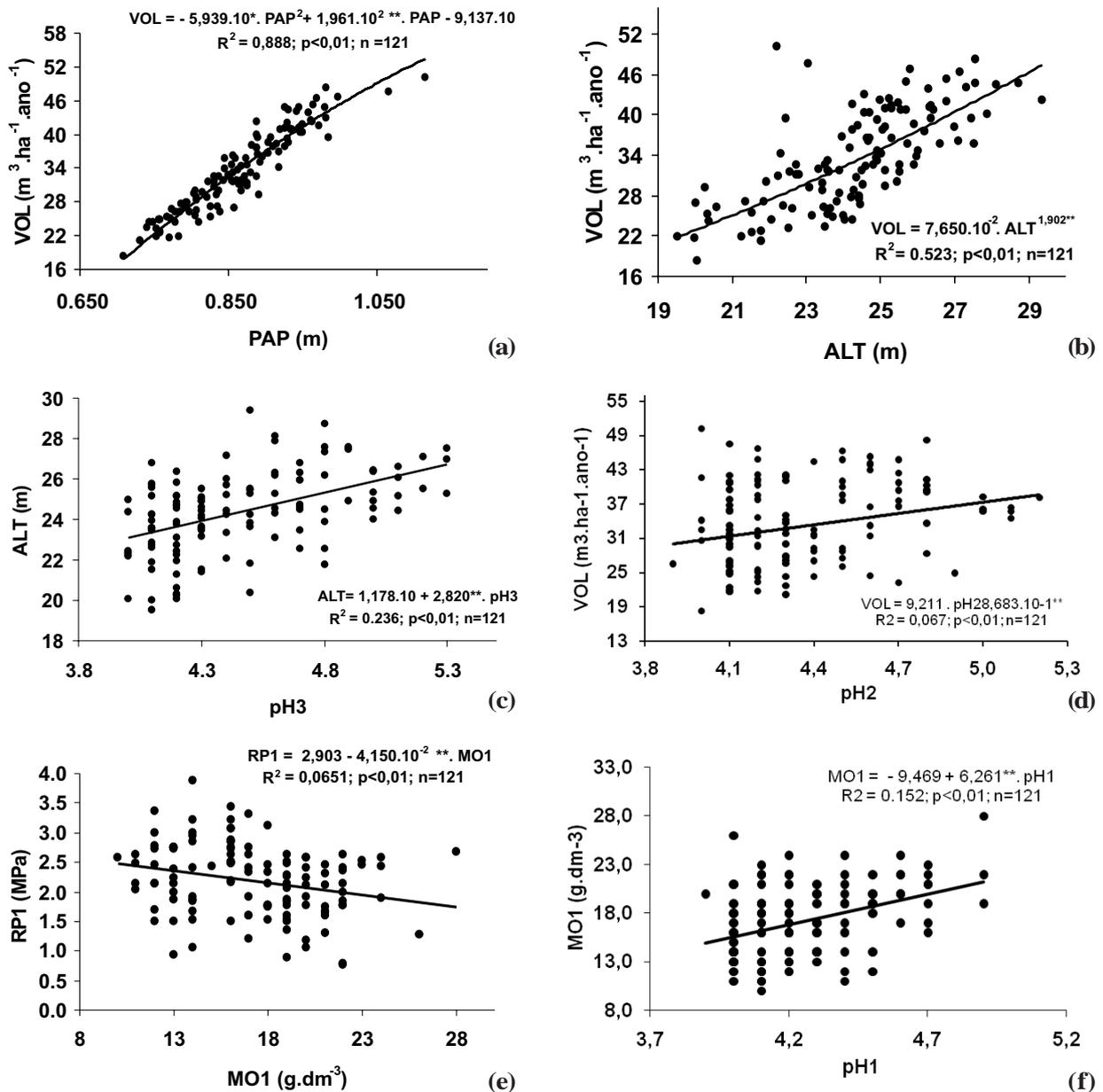


Figura 2 – Equações de regressão de alguns atributos da produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de um Latossolo Vermelho Distrófico de Selvíria, MS.

Figure 2 – Regression equations between some attributes of wood productivity of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and a oxisol Selvíria, MS, Brazil.

tidos como altos. A produtividade de madeira da essência florestal estudada foi classificada como satisfatória. Já os dados da umidade gravimétrica estão de acordo com aqueles da resistência à penetração, uma vez que nessa magnitude o solo encontrava-se friável (Tabela 1).

O valor médio observado para o PAP (0,868 m), que teve seus valores extremos entre 0,709 e 1,116 m, foi 17,3% menor do que o valor médio de 1,049 m, obtido por Machado et al. (2005) quando trabalharam com o *Pinus oocarpa*, avaliado aos 22 anos após o plantio,

na região Sudoeste do Estado de São Paulo. Da mesma forma, o valor médio observado para a ALT (24,352 m), que teve seus valores extremos entre 19,525 e 29,383 m, foi 7,8% menor do que o valor médio de 26,4 m, obtido pelos referidos autores. Assim, ainda que sejam duas regiões distintas do Estado de São Paulo, em relação ao PAP e à ALT, tais dados sugeriram ser o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* menos robusto do que o *Pinus oocarpa* na referida região.

O incremento médio anual foi 14,4% inferior ao de Leite et al. (2006), que, avaliando o *Pinus taeda* produzido no Planalto Serrano (SC) aos 14 anos de idade, encontraram o volume médio de madeira de 26,3 m³. ha⁻¹.ano⁻¹, equivalente ao incremento médio anual de 1,88 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Entretanto, foi 11,0% superior ao de Sanquetta et al. (2004), que, também trabalhando com o *Pinus taeda* produzido em Jaguariaíva, PR, aos 20 anos, obtiveram o volume médio de madeira de 29,0 m³. ha⁻¹.ano⁻¹, equivalente ao incremento médio anual de 1,45 m³. ha⁻¹.ano⁻¹. Também, o incremento médio anual do presente (1,61 m³. ha⁻¹.ano⁻¹) ficou posicionado proximamente ao piso dos valores médios nacionais (1,66-2,33 m³. ha⁻¹.ano⁻¹), relacionado pelo IPEF (2008).

Na Tabela 1, os teores de matéria orgânica em profundidade do solo decresceram de 17,3 a 8,2 g dm⁻³, ficando muito próximos e de forma semelhante àqueles de Rigatto et al. (2005), quando analisaram *Pinus taeda* em Telêmaco Borba, PR, aos 12 anos de idade, com valores entre 20,8 e 14,1 g dm⁻³. Já para o pH os valores observados no presente, crescentes em profundidade (4,27 a 4,46), ficaram acima daqueles dos citados autores, que foram de 3,8 a 4,1. Em contrapartida, em relação aos dados de Lamprecht (1990), que variaram entre 4,3-6,5, eles ficaram próximos do menor valor.

A correlação de destaque foi o VOLxPAP, que apresentou a maior correlação, evidenciando que, com o aumento do perímetro à altura do peito, ocorre o mesmo com o volume de madeira. Esse fato foi diferente daquele de Linhares e Ponzoni (2001), que, ao estudarem *Pinus* spp. no Estado de São Paulo, obtiveram maior correlação para o par VOLxALT ($r = 0,890$) e, seguidamente, para as correlações ALTxPAP ($r = 0,860$) e o VOLxPAP ($r = 0,740$).

As correlações dos atributos da planta com pH do solo ficaram de acordo com aqueles de Rodrigues (2004) e Rigatto et al. (2005), que, pesquisando a influência

desse atributo sobre a produtividade de madeira do *Pinus taeda*, em Telêmaco Borba, PR, encontraram correlações positivas, com valores entre 0,487 e 0,727. Exclusivamente em relação à ALTxUGs, as correlações positivas observadas no presente ficaram de acordo com o preconizado por Pedrotti et al. (2001), os quais evidenciaram que o desenvolvimento adequado das espécies florestais depende intimamente do armazenamento de água no solo.

As correlações significativas entre VOLxpHs (Tabela 2) sugeriram ser esse atributo do solo um apreciável indicador da sua qualidade química, quando o objetivo foi o de analisar a produtividade de madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Assim, na Figura 2 está apresentada a equação de ajuste entre tais variáveis (Figura 2d), como também outras equações significativas e importantes para a silvicultura (Figuras 2abcf).

O alcance da dependência espacial do VOL (Tabela 3) foi inferior àquele valor de Mello et al. (2005), que foi de 250 m quando trabalhado com o *Eucalyptus grandis* num Latossolo Vermelho Distrófico do Estado de São Paulo. O alcance da dependência espacial da RP ficou abaixo daqueles de Carvalho et al. (2006) e de Freddi et al. (2006), os quais, trabalhando, respectivamente, com um Latossolo Vermelho Distroférrico e um Distrófico, obtiveram alcances entre 20,2-67,1 m. Já para a MO e o pH o alcance da dependência espacial foi relativamente superior aos valores de 2,6-21,5 m obtidos por Carvalho et al. (2003) e Bezerra (2008), quando trabalharam com dois distintos Latossolos Vermelhos Distróficos também do Estado de São Paulo.

As krigagens simples ficaram de acordo com Carvalho et al. (2003), Carvalho et al. (2006), Freddi et al. (2006) e Bezerra (2008), em que tais atributos também apresentaram classes de dependência espacial da mesma ordem de grandeza. Já para as co-krigagens também foram obtidos excelentes semivariogramas, uma vez que, tanto os coeficientes de dependência espacial (r^2) quanto os respectivos avaliadores (ADEs), foram elevados. Dessa forma, os modelos dos ajustes obtidos pela pesquisa em questão concordaram com aqueles de Vettorazzi e Ferraz (2000), Carvalho et al. (2003), Mello et al. (2005), Carvalho et al. (2006), Freddi et al. (2006) e Bezerra (2008), em que ora um, ora outro modelo foi apresentado.

5. CONCLUSÃO

A produtividade de madeira da essência florestal pesquisada pôde ser estimada, de forma diretamente proporcional, por um modelo matemático potencial dado em função do pH do solo na camada de 0,10-0,20 m de profundidade. Contudo, no geral os atributos pesquisados seguiram padrões espaciais bem definidos, com alcances da dependência espacial entre 9,7 e 88,2 m. Portanto, do ponto de vista espacial, a produtividade de madeira também pôde ser estimada por meio do pH do solo, quando obtido na mesma camada.

6. REFERÊNCIAS

- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSAA Special Publication, 49).
- BEZERRA, C. R. F. **Variabilidade espacial da produtividade de forragem do milho safrinha em função de atributos químicos do solo**. 2008. 70f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.4, p.695-703, 2003.
- CARVALHO, G. J. et al. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.765-771, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FREDDI, O. S. et al. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.113-121, 2006.
- GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. **Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo**. São Paulo: IPEF, 1990. p.24-39. (Boletim Técnico IPEF 43-44).
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, S.; BROWN, A. **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Camberra: ACIAR, CSIRO, CIFOR, 1997. p.379-418.
- GS+: **Geostatistics for environmental sciences**. 7.ed. Michigan: Plainwell, Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- HERNANDEZ, F. B. T.; LEMOS FILHO, M. A. F.; BUZZETTI, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 1995. 45p. (Série Irrigação, 1).
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF. **Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil (PPPIB)**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/pppib>>. Acesso: 17 maio de 2008.
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura en los trópicos**: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Eschborn: República Federal de Alemania, Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1990. 340p.

- LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v.30, n.4, p.603-612, 2006.
- LINHARES, C. A.; PONZONI, F. J. Análise multivariada de dados dendrométricos e radiométricos referentes a uma plantação de *Pinus*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p.1641-1647.
- MACHADO, S. A.; URBANO, E.; CONCEIÇÃO, M. B. Comparação de métodos de estimativa para *Pinus oocarpa* em diferentes idades e diferentes regimes de desbastes. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v.50, p.81-98, 2005.
- MELLO, J. M. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v.11, n.2, p.113-126, 2005.
- PEDROTTI, A. et al. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.3, p.521-529, 2001.
- RIGATTO, P. A. **Influência dos atributos do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para a produção de celulose Kraft**. 2002. 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, v.29, n.5, p.701-709, 2005.
- RODRIGUES, C. M. **Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L.** 121f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- SANQUETTA, C. R. et al. Produção de madeira para celulose para povoamentos de *Pinus taeda* submetidos a diferentes densidades de plantio e regimes de desbaste: abordagem experimental. **Cerne**, v.10, n.2, p.154-166, 2004.
- SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.3, 699-707, 2001.
- SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS: system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.
- VETTORAZZI, C. A.; FERRAZ, S. F. B. Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: 2000. p.65-75.