

Atributos Físicos e Químicos do Solo e suas Relações com o Crescimento e a Produtividade do *Pinus taeda*

Antonio Francisco Jurado Bellote¹

Renato Antonio Dedecek²

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o efeito das propriedades físicas e químicas do solo na produtividade do *Pinus taeda*, plantado em diferentes tipos de solo e com ritmos de crescimento variados, foram selecionadas, através do inventário florestal, quatro plantios com 20 anos de idade, em dois municípios do Estado do Paraná. Nestes sítios foram demarcadas parcelas experimentais, selecionadas árvores representativas do extrato dominante, coletados dados dendrométricos de altura e diâmetro, discos do lenho de diferentes alturas do tronco e amostras de solo em diferentes profundidades. Os parâmetros de crescimento e volume das árvores foram analisados e correlacionados com as propriedades físicas e químicas do solo. Os resultados obtidos mostram que a produtividade de madeira é influenciada pelas propriedades, principalmente físicas, do solo, em especial pela quantidade de água disponível e pela resistência à penetração das raízes. Mostram ainda, para sítios de menor crescimento das árvores, que a produtividade pode ser aumentada com adoção de práticas silviculturais de poda e desbaste, adição de fertilizantes e descompactação do solo.

Palavras-chaves: Compactação do solo, fertilidade do solo, produtividade de madeira; desbaste.

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor, pesquisador da *Embrapa Florestas*. email: bellote@cnpf.embrapa.br

² Engenheiro Agrônomo, Doutor, pesquisador da *Embrapa Florestas*. email:dedecek@cnpf.embrapa.br

Soil Physical and Chemical Attributes and Their Relation to *Pinus taeda* Growth and Productivity.

ABSTRACT

In order to evaluate the effect of soil chemical and physical attributes on the productivity of 20 year-old *Pinus taeda* stands planted on different soil types and with different growth rates, four sites were selected based on previous inventory, in two municipalities in the State of Paraná. Experimental plots were established on these areas where dominant trees were selected. Data on DBH and height were recorded and stem cross section disks at different heights were collected. Also, soil samples at different depths were collected. Growth variables and tree volumes were analyzed and correlations with soil chemical and physical traits were estimated. The results showed that wood production was influenced mainly by soil physical traits. Of special importance was the amount of moisture available in the soil and the resistance to root penetration. On poor sites, productivity can be increased by adopting some silvicultural measures such as pruning, thinning, fertilization and soil tillage.

Keywords: Soil compaction, soil fertility, wood production, thinning.

1. INTRODUÇÃO

A produtividade das plantas pode ser definida como o aumento do peso seco por unidade de área (kg/ha). Muitos fatores contribuem para a produtividade. Por isso, ela é considerada uma integração de peculiaridades fisiológicas, genéticas e ambientais. O ambiente é tão importante quanto a espécie utilizada. Mas, o que deve ser considerado, quando da instalação de plantios, é a interação entre ambos. Isso é verdadeiro em ambiente onde o solo é o principal limitante para a produtividade. Essa limitação é acentuada quando os nutrientes e a água tornam-se escassos (LOOMIS et al., 1976).

O solo, através de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, é o fator

ambiental que mais influencia o crescimento do *Pinus*. Entre os atributos físicos e químicos do solo que estão mais diretamente relacionados com o crescimento e a produtividade do *Pinus*, citam-se: a densidade do solo (RAB, 1994; FENNER, 1999); a umidade do solo (BELLOTE et al., 1980; REIS et al., 1987); a textura do solo (GONÇALVES et al., 1990; CARVALHO et al., 1999) e os teores dos nutrientes minerais (GARICOITS, 1990; MENEGOL, 1991; MAIA et al., 1998; BELLOTE et al., 1999; REISSMANN e WISNIEWSKI, 2000).

Do ponto de vista de produtividade, é importante saber como as plantas se desenvolvem, acumulando biomassa de lenho. O conhecimento dessa acumulação e a influência que o solo, a água e os nutrientes minerais exercem são fundamentais para que possam ser definidos os melhores tipos de solos que devem ser utilizados para produção, ou os nutrientes necessários para que a planta produza madeira na quantidade esperada. Estes conhecimentos possibilitam estimar as reais necessidades nutricionais das plantas, as quantidades extraídas e acumuladas no lenho durante o ciclo e, conseqüentemente, orientar práticas silviculturais e de nutrição que possam manter a produtividade do sítio (BEVEGE, 1981; MAIA et al., 1998). O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito dos atributos do solo na produtividade de madeira produzida pelo *Pinus taeda*, plantados em diferentes tipos de solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados plantios comerciais de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade, plantados nos Municípios de Reserva e Arapoti, Estado do Paraná, em diferentes tipos de solos e com crescimentos variados. O clima da região, segundo o sistema de classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado, com temperatura média do mês mais frio inferior a 16° C e ocorrência de geadas. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22° C e a precipitação média anual é de 1.490 mm, distribuído em todos os meses

do ano, com excedente hídrico de 557 mm/ano. Os solos dos sítios experimentais foram classificados, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), como: Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, nos sítios A1 e A2; Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, A moderado, profundo, textura média no sítio A3; e Cambissolo Háplico Tb Distrófico léptico, A moderado, raso e textura argilosa no sítio A4. O plantio foi realizado em covas, sem a aplicação de fertilizantes minerais. O espaçamento e o desbaste aplicado variaram em função da localização e do tipo de solo onde o *Pinus* foi plantado (Tabela 1).

Tabela 1. Espaçamento utilizado nos plantios e desbastes realizados durante o desenvolvimento do *Pinus taeda* nos diferentes locais de plantio.

Sítios	Data de plantio	Espaçamento inicial [m]	Desbastes realizados					
			Data			árvores remanescentes		
			1º	2º	3º	1º	2º	3º
A1	jun/1983	3 x 2	set/00	-	-	900	-	-
A2	jun/1983	3 x 2	jul/99	mai/03	-	900	600	-
A3	jun/1983	2,5 x 1,8	jan/02	-	-	650	-	-
A4	jun/1983	2,5 x 1,8	jan/02	-	-	650	-	-

Em cada sítio foram demarcadas parcelas experimentais e, com base no inventário da parcela, selecionadas árvores, enquadradas na categoria de dominante representativas da população. Em cada parcela, foram derrubadas quatro árvores. Foram tomadas medições da altura total, altura comercial, e diâmetro à altura do peito (DAP). Como altura comercial para celulose, foi considerado o diâmetro mínimo de 8 cm e, para desdobro, o mínimo de 24 cm. O volume das árvores foi calculado utilizando-se uma adaptação de equação de Smallian, expresso pelo somatório dos toretes entre a base até 1,3 m de altura; 1,3 m até 25% da altura total; 25% e 50%; 50% e 75%; e 75% até a altura total da árvore.

$$V = \frac{1}{2} \cdot (\pi D^2 / 4 + \pi d^2 / 4) \cdot h$$

onde: V = Volume do segmento [m³]

D = Diâmetro maior do segmento [m]

d = Diâmetro menor do segmento [m]

h = Comprimento do segmento [m]

Para a avaliação química do solo, foram coletadas amostras na projeção da copa de cada árvore selecionada. Foi aberto um micro-perfil de 0,50 m x 0,50 m x 0,50 m, onde foram coletadas amostras nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Essas foram secas ao ar (TFSA) e peneiradas em malha de 2 mm para as análises. O P assimilável, o K⁺ e o Na⁺ trocáveis foram extraídos com HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N; o pH foi determinado pelo método com CaCl₂; Ca⁺² + Mg⁺² e Al⁺³ trocáveis foram extraídos com KCl 1N, conforme descrito por Embrapa (1997). A acidez potencial (H+Al) foi determinada através de solução tampão SMP, conforme descrição de Raij (1983) e Quaggio (1985). A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley e Black, conforme descrito por Embrapa (1997). As análises granulométricas foram feitas pelo método da pipeta, com fracionamento em areia grossa e fina, segundo Embrapa (1997). Com esses resultados, foram calculadas a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) e a soma de bases do solo (S%), de acordo com recomendação de Raij (1983) e Quaggio (1985).

Para as análises da densidade, porosidade e água disponível no solo foram utilizados os microperfis abertos para amostragem de solo para as análises químicas. Foram utilizados anéis volumétricos de 68,71 cm³ de capacidade, coletadas nas mesmas profundidades. As amostras, depois de saturadas com água, foram submetidas a tensões de 0,006; 0,01; 0,1; 0,3; e 1,5 MPa, na mesa de tensão do Extrator de Richards e, ao final, secas em estufa a 105° C. Com esse procedimento, foram calculados: a densidade global do solo, a porosidade total, a de aeração e a água disponível no solo, conforme descrito por Embrapa (1997).

A resistência do solo à penetração das raízes foi medida com um penetrógrafo da "Soilcontrol", modelo SC-60, com haste de 1 cm² de base. As medições foram realizadas nas entre-linhas de plantio. A primeira medição foi realizada sob a linha de plantio, ao lado da árvore derrubada. A partir daí, a cada 25 cm foram feitas novas medições, perfazendo um total de sete pontos amostrados por árvore. Todos os dados foram obtidos no mesmo dia para todos os tratamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química dos solos (Tabela 2) mostrou, em todos os sítios estudados, acidez elevada e teores de matéria orgânica variando de médio (16 a 35 g.dm⁻³) até alto (35 a 50 g.dm⁻³) (Tome Junior, 1997).

Tabela 2. Características químicas dos solos dos quatro sítios estudados.

Sítios	pH CaCl ₂	M.O	P	K	Ca + Mg	Al	CTC	S
		g.dm ⁻³	mg.dm ⁻³	cmolc.dm ⁻³				
A1	3,75 a	34,2 ab	0,84 b	0,06 b	0,87 a	3,25 bc	11,6 ab	0,94 a
A2	3,78 a	37,2 ab	1,14 b	0,08 b	0,94 a	3,61 b	12,5 ab	1,02 a
A3	3,96 a	25,5 b	3,84 a	0,07 b	1,30 a	2,32 c	9,7 b	1,37 a
A4	3,74 a	43,2 a	2,07 ab	0,14 a	1,15 a	5,10 a	14,7 a	1,30 a

Obs: letras iguais nas colunas indicam médias que não diferem estatisticamente entre si (p < 0,05)

Os teores de P nos solos, embora apresentem variação acentuada, foram muito baixos (< 2,0 mg.dm⁻³) a baixos (2,1 a 4,0 mg.dm⁻³) de acordo com Tome Junior (1997). Segundo Bellote e Neves (2001), o sítio A3 apresentou teor médio de P (> 3,0 e < 7,0 mg.dm⁻³). As bases trocáveis K, Ca + Mg se apresentaram como as mais deficientes. Apenas no sítio A4, os teores de K foram classificados, segundo Tome Junior (1997), como médios. Nos demais sítios, foram baixos. Os teores de Ca + Mg, embora tivessem apresentado variação acentuada, foram classificados como baixos (RECOMENDAÇÕES... 1995). A soma de bases do solo (S) e a capacidade de troca de cátions (CTC) também apresentam valores baixos em todos os solos estudados. Os solos mais argilosos apresentaram os maiores valores de S e CTC, enquanto que os arenosos apresentaram os menores, coincidindo com o observado por Santos Filho (1985) e Santos Filho e Rocha (1987). Quanto aos teores de Al, embora tenham sido observadas diferenças estatísticas entre os sítios estudados, apresentaram valores muito altos (Tomé Junior, 1997), mostrando o caráter epialóico das camadas superficiais desses solos.

A análise granulométrica dos solos (Tabela 3) mostrou variações apenas em

relação aos teores de areia fina e areia grossa nos sítios A1 e A2, que foram classificados como Latossolo Vermelho. Nos sítios A3 e A4, onde os solos foram classificados, respectivamente, como Cambissolo háplico típico e Cambissolo háplico léptico, houve variação na textura de média a argilosa. O Cambissolo do sítio A4 foi a classe que apresentou os maiores teores de argila e silte e os menores teores de areia grossa e fina, dentre todos os solos. Bowersox e Ward (1972) constataram que os teores de silte e argila, até determinados valores, nos horizontes superficiais e subsuperficiais, estão geralmente associados ao aumento no crescimento das árvores. No entanto, nem todos os solos que apresentam altos teores de argila e silte são, necessariamente, produtivos. Se os teores de areia forem baixos, pode haver problemas de compactação do solo, que restringe o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a produtividade, Carvalho et al., (1999).

Tabela 3. Características físicas do solo nos sítios estudados.

Sítios	Granulometria				Porosidade		Água disponível [cm ³ cm ⁻³]
	areia		silte	argila	total	aeração	
	grossa	fina					
	[%]				[cm ³ cm ⁻³]		
A1	29 b	19 a	12 b	40 b	0,58 a	0,27 a	0,062 a
A2	19 b	25 a	14 b	43 b	0,61 a	0,30 a	0,065 a
A3	40 a	26 a	15 b	20 c	0,50 a	0,26 a	0,044 ab
A4	4 c	6 b	38 a	53 a	0,61 a	0,23 a	0,039 b

Obs: letras iguais nas colunas indicam médias que não diferem estatisticamente entre si (p < 0,05)

A porosidade total do solo é responsável pelo armazenamento e transporte da água e do ar no solo. Não foi observada diferença significativa na porosidade total do solo (Tabela 3). A porosidade de aeração é a parte da porosidade total, após descontada a porosidade ocupada pela solução do solo. Para o ótimo desenvolvimento das plantas, a porosidade de aeração não deve ser menor do que 0,10 a 0,15 cm³.cm⁻³ (Prevedello, 1996). Um solo perfeitamente aerado apresenta concentração aproximada de 20% de oxigênio (BRADY, 1996). Segundo Oliveira et al. (1998), solos com porosidade de aeração menor que 0,10 cm³.cm⁻³ comprometem o crescimento das plantas, pois o oxigênio que, além de necessário à respiração das raízes, também participa na geração de energia necessária à absorção de nutrientes minerais.

Com relação à água disponível às plantas, os resultados mostram diferenças significativas entre os sítios A1 e A2 com o sítio A4. Os solos dos sítios A1 e A2 apresentaram mais de 50% de capacidade de retenção de água às plantas, do que o solo do sítio A4.

A resistência do solo à penetração das raízes é outro atributo físico que interfere no desenvolvimento das árvores. Foram observadas variações entre sítios quanto a esta variável (Gráfico 1).

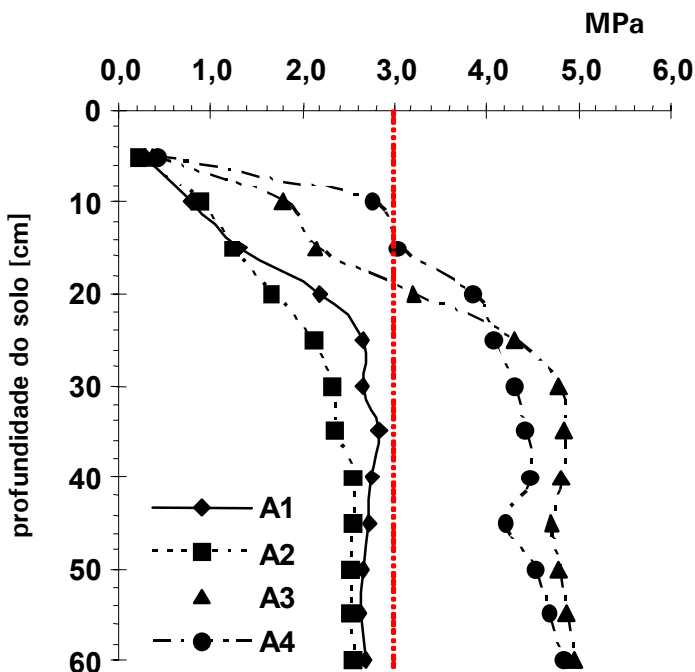


Gráfico 1. Resistência do solo nos sítios estudados à penetração das raízes medida através do penetrógrafo.

Foi possível distinguir dois grupos de solo nas áreas deste estudo. Um, representado pelos solos dos sítios A1 e A2, que apresentam resistência máxima de cerca de 3,0 MPa, até a profundidade de 60 cm. O outro, compreendido pelos solos dos sítios A3 e A4, que apresentaram resistência máxima de cerca de 5,5 MPa à profundidade de 60 cm. Como o limite para a compactação do solo, de acordo com Sands et. al. (1979), é de 3,0 MPa, pode-se considerar que os solos

dos sítios A1 e A2 não oferecem resistência ao crescimento das raízes. Nos solos dos sítios A3 e A4, as raízes se desenvolvem sem resistência somente até a profundidade de 18 cm (sítio A4) e 10 cm (sítio A3). Portanto, nos sítios A3 e A4, por apresentarem solos mais compactados que os demais, o sistema radicular das árvores explora menores volumes de terra. Menor volume de solo explorado significa absorção de menores volumes de água, menores quantidade de nutrientes e, em conseqüência, menor crescimento e produtividade.

Os plantios de *Pinus taeda*, normalmente, abastecem dois mercados consumidores. Um é do desdobro para produção de madeira serrada e o de celulose e papel. O restante da biomassa do tronco, assim como a casca, galhos e acículas, normalmente é considerado como resíduo da colheita e é deixado no sítio. Assim, com relação à produtividade, a Tabela 4 mostra os dados dendrométricos relativos à altura, diâmetro e volume das árvores aos 20 anos de idade, nos sítios estudados

Tabela 4. Variáveis dendrométricas de crescimento (sem casca) e produtividade de *Pinus taeda*, aos 20 anos de idade.

Sítios	Altura [m]			DAP [cm]	Volume [m ³ .1000]		
	total	celulose	desdobro		total	celulose	desdobro
	[m]				[m ³ .1000]		
A1	28,3a	24,6a	11,8a	27,3a	879a	466a	121,55a
A2	27,9a	23,8a	8,5b	24,7b	706b	408a	51,86b
A3	23,9b	19,2b	1,8c	20,0c	422c	232b	0,499c
A4	23,8b	19,2b	0,4c	17,5d	321d	176b	0,002c

Obs: letras iguais nas colunas indicam médias que não diferem estatisticamente entre si ($p < 0,05$)

Não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas na altura das árvores entre os sítios A1 e A2 (exceto em altura comercial para desdobro) assim como entre os sítios A3 e A4. Quanto ao diâmetro e ao volume das árvores, em todos os sítios estudados, foram observadas variações estatisticamente significativas. Quanto ao volume de madeira destinada à produção de celulose, os sítios A1 e A2 não apresentaram diferença estatisticamente significativa. O mesmo ocorreu com as árvores dos sítios A3 e A4. Entretanto, foram observadas

diferenças entre os sítios A1 e A2 com os sítios A3 e A4. Em média, o volume de madeira produzido nos sítios A1 e A2 foi o dobro em relação aos sítios A3 e A4.

Os volumes de madeira para desdobro variaram significativamente entre todos os sítios. Nos sítios A3 e A4, devido às árvores não terem atingido diâmetro mínimo de 24 cm até a altura mínima de 2,20, não houve produção de madeira para desdobro. No sítio A2, a madeira produzida foi o equivalente a três toras de 2,20 m por árvore, enquanto que, no sítio A1, foram produzidas cinco toras (cerca de 65% a mais de madeira).

Embora o solo do sítio A4 tenha apresentado maior quantidade de argila do que o sítio A3, foi este que apresentou, em números absolutos, menor disponibilidade de água às árvores e menor porosidade de aeração. Além disso, o solo do sítio A3 é mais arenoso do que o do sítio A4, não tem problema de profundidade, onde a água pode ser drenada mais rapidamente. Nos sítios A1 e A2, o solo é classificado como Latossolo vermelho, com variações, nos teores de K e de areia fina e areia grossa (Tabelas 2 e 3). Os tratamentos culturais e os espaçamentos de plantio utilizados foram semelhantes em todos os sítios. A única diferença de tratamentos culturais entre esses dois sítios foi a época do desbaste, ainda assim, uma diferença de apenas um ano (no sítio A2, o povoamento foi desbastado um ano antes que no sítio A1). Portanto, o maior crescimento em DAP e volume observado no sítio A1 deve-se provavelmente ao efeito do solo do que aos tratamentos culturais. Essas variações no crescimento, normalmente, são reflexos diretos do efeito dos atributos do solo, notadamente, de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Dentro deste enfoque, para que a capacidade produtiva dos sítios seja melhorada, quando possível, são necessárias aplicações de técnicas silviculturais e de manejo dos solos de maneira compatível às características de cada sítio. Entre essas práticas, é importante a manutenção dos resíduos da colheita florestal no sítio pois, após sua decomposição, além de fornecer nutrientes minerais às árvores do novo plantio, são excelentes condicionadores do solo.

Tabela 5. Coeficientes de correlação entre os atributos do solo e as variáveis dendrométricas em *Pinus taeda*, com 20 anos de idade.

Variáveis do solo	Profundidade do solo	Altura das árvores	DAP [sem casca]	Volume [sem casca]
R				
cm				
água disponível	0 – 5	0,73 **	0,71 **	0,70 **
	5 – 10	0,58 *	0,50 *	0,50 *
	10 – 20	0,61 *	0,61 *	0,57 *
	20 – 30	0,84 **	0,88 **	0,84 **
silte	0 – 5	- 0,61 **	- 0,76 **	- 0,72 **
	5 – 10	- 0,50 ns	- 0,60 **	- 0,64 **
	10 – 20	- 0,58 *	- 0,74 **	- 0,70 **
	20 – 30	- 0,58 *	- 0,75 **	- 0,68 **
resistência do solo	10	- 0,84 **	- 0,74 **	- 0,75 **
	20	- 0,71 **	- 0,67 **	- 0,64 **
	30	- 0,84 **	- 0,86 **	- 0,82 **
K	0 – 5	- 0,54 *	- 0,71 **	- 0,65 **
	5 – 10	- 0,46 ns	- 0,68 **	- 0,63 **
	10 – 20	- 0,40 ns	- 0,62 *	- 0,58 *
	20 – 30	- 0,33 ns	- 0,54 *	- 0,51 *
P	5 – 10	- 0,77 **	- 0,63 **	- 0,69 **
	0 – 5	- 0,43 ns	- 0,55 *	- 0,56 *
Mg	0 – 5	- 0,50 *	- 0,38 ns	- 0,41 ns
	0 – 5	- 0,70 **	- 0,69 **	- 0,71 **
Soma bases macroporos	10 - 20	0,65 **	0,60 *	0,60 *

Obs: * ** - significativos com $p < 0,05$ e $p < 0,01$ respectivamente

3.1 Correlações entre produtividade e os atributos dos solos.

Entre as propriedades físicas estudadas, a água disponível e a resistência do solo à penetração das raízes, em todas as profundidades avaliadas, foram as que mais se correlacionaram com o crescimento das árvores (Tabela 5). Entre as propriedades químicas do solo, destacaram-se: soma das bases K, Ca, Mg e P.

A água disponível correlacionou-se positiva e crescentemente com a profundidade do solo, atingindo valores máximos entre 20 cm e 30 cm de profundidade. Considerando que os solos apresentaram grande variação na compactação e esta interfere na porosidade do solo e na disponibilidade de água às árvores, esses resultados podem ser considerados dentro do esperado. Nos sítios A3 e A4, com o aumento na profundidade, aumentou a compactação do solo (Gráfico 1), diminuiu a quantidade de água disponível às plantas, diminuiu a porosidade de aeração (Tabela 3) e, conseqüentemente, diminuiu o crescimento das árvores. Outro aspecto que ratifica estes resultados é a correlação positiva entre o crescimento das árvores e a quantidade de água disponível e negativa com a resistência do solo.

A regressão múltipla das propriedades físicas e químicas sobre o DAP (Tabela 6) confirmou que a quantidade de água disponível no solo (profundidade de 20 cm a 30 cm) e a resistência do solo à penetração das raízes (profundidade de 30 cm) são os maiores responsáveis pela variação em diâmetro das árvores. Juntas, essas variáveis explicaram 91% da variação em diâmetro das árvores. Deste total, a quantidade de água disponível foi a que mais contribui para o crescimento em diâmetro das árvores (Tabela 5). A equação gerada mostrou que os maiores diâmetros do tronco foram observados quando os teores de água no solo, na profundidade de 20 cm a 30 cm, foi de $0,076 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a resistência do solo, na profundidade de 30 cm, foi de 2,33 MPa. Os menores diâmetros do tronco foram

registrados quando a quantidade de água no solo e a resistência, nas mesmas profundidades foram, respectivamente, de 0,02 cm³.cm⁻³ e 5,33 MPa.

Tabela 6. Análise de regressão múltipla da água disponível e resistência do solo à penetração das raízes sobre o diâmetro das árvores de *Pinus taeda*, n = 16.

Dependente	Independente	Valor	Erro	Valor t	Prob > t
DAP	Água disponível [20-30cm]	121,418	44,207	2,746	< 0,02
	Resistência do solo [30cm]	- 1,510	0,668	- 2,262	< 0,04
	Constante	22,538	4,635	4,862	

Equação de Regressão:

$$\text{DAP [cm]} = [121,418 * \text{água disponível}] - [1,510 * \text{resistência do solo}] + 22,538$$

R = 0,913

F = 32,653

F [13;2 p < 0,001] = 6,36

A regressão múltipla entre as propriedades físicas e químicas do solo e a altura das árvores mostrou que o crescimento das árvores, também, foi influenciado pelas mesmas variáveis observadas para o diâmetro (Tabela 7). Juntos, estes atributos do solo explicam 90% das variações do crescimento em altura. A resistência do solo à penetração das raízes foi a variável que demonstrou maior influência nesse crescimento (Tabela 5; Gráfico 1).

Com base nesses resultados, pode-se supor que o crescimento e a produtividade das árvores podem ser aumentados, nesses sítios, exceto no sítio A4, devido à pequena profundidade efetiva do solo. No sítio A4, dificilmente alcançará uma produção de madeira para desdobra, uma vez que, na idade de corte, entre 24 e 28 anos, as árvores não terão diâmetros suficientes. Nesta situação, a solução é a

produção de madeira para celulose, embora com rendimentos inferiores ao potencial que se pode obter na região.

Tabela 7. Análise de regressão múltipla da resistência do solo e da água disponível no solo sobre a altura total de *Pinus taeda*, n = 16.

Dependente	Independente	Valor	Erro	Valor t	Prob > t
	resistência do solo [10cm]	-1,080	0,435	-2,484	<0,02
Altura	água disponível [20-30cm]	64,463	24,849	2,594	<0,02
	Constante	24,889	1,949	12,769	

Equação de Regressão

$$\text{Altura [m]} = [64,463 * \text{água disponível}] - [1,080 * \text{resistência do solo}] + 24,889$$

R = 0,896	F = 26,488	F [13;2 p<0,001]=6,36
-----------	------------	-----------------------

Nos demais sítios, a situação é diferente. No sítio A3, é possível obter ganho em produtividade com a descompactação do solo na ocasião do plantio. Nos sítios A1 e A2, é provável que maiores crescimentos, embora não tão significativos como no sítio A3, possam ser obtidos através de adubação.

Para que possamos aumentar a produtividades nos sítios A1, A2 e A3, além da descompactação no sítio A3 e da adubação nos sítios A1 e A2, tratos silviculturais e manejo através da poda e do desbaste são imprescindíveis.

As correlações negativas entre os teores de bases trocáveis do solo com o crescimento das árvores (Tabela 5) não significam que as árvores cresçam menos em solos com menores teores dessas bases. Na realidade, duas situações contribuíram para a ocorrência desses resultados: a primeira relacionada com a lei do mínimo onde as variáveis físicas do solo (água no solo e resistência a penetração das raízes) foram as variáveis que mais influenciaram o crescimento das árvores; a segunda é que justamente os solos com maior oferta de nutrientes foram onde se registraram os menores crescimentos (sítios A3 e A4). Esses resultados deixam claro, para as condições do estudo, que as propriedades químicas do solo não são responsáveis pelas variações no crescimento das árvores, e que as correlações negativas observadas não tem significado fisiológico algum sendo

apenas um acaso matemático. Além disso, existem outras implicações, principalmente aquelas referentes às influências do antagonismo e do sinergismo, assim como a interferência da matéria orgânica e da granulometria do solo na absorção de nutrientes pelas árvores (Raj, 1983; Quaggio, 1986; Vitti, 1987). Como os solos estudados mostraram variações nessas variáveis, é possível que tenham ocorrido interações entre elas.

4. CONCLUSÕES

As variações no crescimento de *Pinus taeda* são afetadas pela água disponível e a resistência do solo à penetração das raízes

A disponibilidade de água no solo é a principal causa da variação do DAP e a resistência do solo à penetração das raízes na altura de *Pinus taeda*.

Aumentos de produtividade podem ser obtidos com a aplicação de práticas silviculturais (poda e desbaste), adição de fertilizantes e com a descompactação do solo.

Restrições físicas, deficiência hídrica, compactação e impedimentos físicos do solo são situações que reduzem a expressão dos efeitos das propriedades químicas nos solos sobre o crescimento de *P. taeda*.

5. REFERÊNCIAS

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D.; GAVA, J. L.; MENEGOL, O. Nutrient export by clear cutting of *Eucalyptus grandis* of different ages on two sites, in São Paulo, Brazil. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J. W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJID, N. M. N. A. (Ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings, 2-4 November 1999, Bogor, Indonesia**. Bogor: CIFOR, 2001. p. 173-177.

BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Extração e

exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis*, em função da idade. 1-Macronutrientes. **IPEF**, Piracicaba, v. 20, p. 1-23, 1980.

BEVEGE, D. I. The management of forest soils and nutrition. In: AUSTRALIAN FOREST NUTRITION WORKSHOP, 1981, Canberra. **Productivity in perpetuity: proceedings**. Canberra: CSIRO, 1981. p. 253-261.

BOWERSOX, T. W.; WARD, W. W. Prediction of oak site index in the ridge and valley region of Pennsylvania. **Forest Science**, Washington, DC, v. 18, n. 3, p. 192-195, 1972.

BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 11th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

CARVALHO, A. P. de; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E. B. de; MACHADO, S. A.; POTTER, R. O.; FASOLO, P. J.; FERREIRA, C. A.; BARTOZESCK, A. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 51-66, jul./dez. 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita de madeira**. 1999. 135 f. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. Relações entre a 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**, Piracicaba, n. 43/44, p. 24-39, 1990.

GARICOITS, L. S. L. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba**. 1990 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK III, A.; ISEBRANDS, J. G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**.

Madison: USDA, Forest Service, 2001. 42 p. (USDA. For. Serv. FPL-GTR-129).

LOOMIS, R. S.; NG, E.; HUNT, W. F. Dynamics of development in crop production systems. In: ANNUAL HARRY STEENBOCK SYMPOSIUM, 5., 1975, Madison. **CO₂ metabolism and plant productivity**: proceedings. Baltimore: University Park Press, 1976. p. 269-286. Editado por R. H. Burris e C. C. Black.

MAIA, C. M. B. F.; SILVA, H. D. da; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; SHIMIZU, J. Y. Quantificación de la biomasa y nutrientes en *Pinus elliotii* var. *elliotii*. In: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO, 1., 1998, Valdivia, Chile. **El manejo sustentable de los recursos forestales, desafío del siglo XXI**: actas. [S.l.]: CONAF; [Viena]: IUFRO, 1998. 1 CD-ROM. Tema 1: Establecimiento, manejo y protección de plantaciones.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliotii* var. *elliotii* no segundo planalto paranaense**. 1991. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

OLIVEIRA, C. V.; BAHIA, V. G.; PAULA, M. B. de. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 191, p. 46-48, 1998.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996. 446 p.

QUAGGIO, J. A. Respostas das culturas à calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, Piracicaba, 1985. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 123-157.

RAB, M. A. Changes in physical properties of a soil associated with logging of *Eucalyptus regnans* forest in southern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 70, n. 13, p. 215-229, 1994.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 142 p.

RECOMENDAÇÕES de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande

do Sul e de Santa Catarina. 3. ed. Passo Fundo: Comissão de Fertilidade do Solo - RS/SC, 1995. 224 p.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F.; KIMMINS, J. P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis*, plantado no Cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 11, p. 1-15, 1987.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 135-166.

SANDS, R.; GREACEN, E. L.; GERARD, C. S. Compactions of sandy soils in radiata pine forests. I. A penetrometer study. **Australian Journal of soil Research**, v. 17, n. 1, p. 101-103, 1979.

SANTOS FILHO, A. Capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos do Estado do Paraná. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 7, p. 43-46, 1985.

SANTOS FILHO, A.; ROCHA, H. O. da. Principais características dos solos que influem no crescimento de *Pinus taeda*, no segundo planalto paranaense. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 107-111, 1987.

TOMÉ JUNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

VITTI, G. C. Acidez do solo, calagem e gessagem. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO, 1., 1987, Ilha Solteira. **Trabalhos apresentados...** Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 303-348.