**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*
causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado**

Ricardo Marques Barreiros

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo
Florestal

**Piracicaba
2005**

Ricardo Marques Barreiros
Engenheiro Florestal

**Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela
adubação com lodo de esgoto tratado**

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo
Florestal

Piracicaba

2005

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Barreiros, Ricardo Marques

Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado / Ricardo Marques Barreiros. - - Piracicaba, 2005.
111 p.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.

1. Adubação orgânica 2. Celulose 3. Energia 4. Eucalipto 5. Nutrição vegetal
Resíduo urbano I. Título

CDD 634.9734

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

À minha esposa Sueli, à minha filha Amanda, aos meus pais Antonio e Vitória, e aos meus irmãos Sérgio, Sônia, Rosana e Regina, pelo amor que nos une, convívio que nos fortalece e incentivo que nos impulsiona ...

Dedico.

Agradecimentos

A Deus pela sua grandiosidade e por fazer-nos crer que sempre podemos ser mais;

ao professor José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela paciente orientação, pelos sinceros incentivos pessoal e profissional, e pela amizade conquistada;

ao professor Cláudio Angeli Sansígolo pelos apoios logístico e de infra-estrutura, e pela amizade cultivada;

à Universidade de São Paulo, através da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, especialmente pelo Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, pela oportunidade de realizar o Curso de Pós-graduação;

à Universidade Estadual Paulista, através do Departamento de Recursos Naturais/FCA e do Departamento de Química/IB, por cederem os laboratórios e reagentes para a realização deste trabalho;

à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), pelo financiamento de parte desta tese e do projeto de pesquisa coordenado pelo professor Fábio Poggiani intitulado “Estudo de parâmetros de aplicação do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Barueri no plantio de eucaliptos”;

aos amigos do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP pela amizade de longa data e por todo o apoio prestado;

aos amigos do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP pela amizade e por todo o apoio prestado;

aos meus mestres da Pós-graduação pelos ensinamentos prestados, incentivos e amizades conquistadas;

aos novos amigos do Curso de Engenharia Industrial Madeireira da Unidade de Itapeva/UNESP pela amizade recente, apoio e grandioso incentivo;

aos amigos Antonio Carlos Maringoni, Carlos Alberto Oliveira de Matos, Carmen Regina Marcati, Fábio Minoru Yamaji, Gustavo Ventorim, Iraê Amaral Guerrini, José Luiz Stape, José Nivaldo Garcia, José Pedro Serra Valente e Marcelino Carneiro Guedes por terem contribuído e acompanhado mais de perto esta jornada;

a todos os outros que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho...

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	14
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 O lodo de esgoto	22
2.2 Efeitos da adubação nos atributos da madeira e na polpação	24
<i>Atributos físicos</i>	27
<i>Massa específica básica da madeira</i>	27
<i>Poder calorífico da madeira</i>	29
<i>Atributos químicos</i>	30
<i>Celulose</i>	32
<i>Hemiceluloses</i>	33
<i>Lignina</i>	34
<i>Extrativos</i>	34
<i>Cinzas</i>	35
<i>Atributos Anatômicos</i>	36
<i>Efeitos das dimensões das fibras da madeira na polpa</i>	38
<i>Polpação</i>	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Caracterização da área experimental	43
3.2 Tratamentos e delineamento experimental	46
3.3 Amostragem das árvores	48
3.4 Caracterização física da madeira	50
<i>Massa específica básica da madeira</i>	50
<i>Massa específica básica média</i>	50
<i>Poder calorífico</i>	51

3.5 Caracterização química da madeira	51
3.6 Caracterização anatômica da madeira	53
3.7 Polpação da madeira	54
3.8 Caracterização dendrométrica das árvores	56
3.9 Análise dos dados	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 Produtividade de madeira	58
4.2 Qualidade da madeira	60
<i>Atributos físicos</i>	60
<i>Atributos químicos</i>	65
<i>Atributos anatômicos</i>	70
<i>Polpação</i>	73
4.3 Concentração de nutrientes na madeira	77
4.4 Concentração de nutrientes na folha	80
4.5 Relação entre qualidade da madeira e teor de nutrientes na madeira e na folha	83
5 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	91

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Valores da precipitação média (**P**) e da temperatura média (**T**), em cada mês do período em que o experimento foi conduzido, desde a aplicação do bio-sólido até a coleta das amostras 44
- Figura 2 - Médias anuais da temperatura medida diariamente às 9:00h (**T_a**), da temperatura do mês mais quente (**T_q**) e mais frio (**T_f**) de cada ano com os respectivos nomes dos meses, e valores totais da precipitação anual (**P**) 45
- Figura 3 - Produção de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade em volume (a) e em massa seca (b) nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões 58
- Figura 4 - Correlação entre o volume e a massa seca de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 59
- Figura 5 - Correlação entre o volume (a) e a massa seca (b) de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade e a variável combinada $DAP^2 \cdot H$ nos diferentes tratamentos. DAP é o diâmetro médio à altura do peito e H é a altura da árvore até 6 cm de diâmetro 59
- Figura 6 - Correlação entre a espessura (a) e o lúmen (b) de fibra e a densidade básica da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 62
- Figura 7 - Correlação entre o consumo específico de madeira e a densidade básica da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 63
- Figura 8 - Densidade básica (a) e poder calorífico (b) da madeira das árvores de

E. grandis aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões 64

Figura 9 - Teores de lignina (a), de celulose (b), de hemiceluloses (c), de extrativos (d) e de cinzas (e) da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões 66

Figura 10 - Correlação entre os teores de celulose (a), de hemiceluloses (b) e de extrativos (c) e o teor de lignina da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 67

Figura 11 - Correlação entre o teor de extrativos e o teor de celulose da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 68

Figura 12 - Correlação entre a espessura do lume das fibras e o teor de hemiceluloses da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 68

Figura 13 - Correlação entre a espessura da parede (a) e do lume (b) das fibras e o teor de cinzas da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos 70

Figura 14 - Comprimento (a), largura (b), espessura de parede (c) e espessura de lume (d) de fibra da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões 72

Figura 15 - Número kappa da polpa (a), rendimento bruto gravimétrico da polpação (b) e consumo específico de madeira (c) de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às

médias são os desvios padrões	75
Figura 16 - Correlação entre o comprimento (a) e a espessura (b) das fibras e o rendimento bruto gravimétrico da polpação da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	76
Figura 17 - Correlação entre o consumo específico de madeira e o rendimento bruto gravimétrico da polpação de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	76
Figura 18 - Correlação entre o comprimento das fibras e o consumo específico de madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	77
Figura 19 - Teores de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões	78
Figura 20 - Teores de B (a), Mn (b), Zn (c), Fe (d) e Cu (e) da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões	79
Figura 21 - Teores de N (a), P (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões	82
Figura 22 - Teores de Mn (a) e Zn (b) na folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões	83
Figura 23 - Correlação entre o teor de lignina da madeira de <i>E. grandis</i> aos	

cinco anos de idade com o teor de N da madeira nos diferentes tratamentos	84
Figura 24 - Correlação entre espessura de lume de fibra e o teor de N da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	84
Figura 25 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira com o teor de Ca da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	84
Figura 26 - Correlação entre o número kappa da polpa e o teor de S da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	85
Figura 27 - Correlação entre espessura de parede de fibra e o teor de Fe da madeira de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	85
Figura 28 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira e o teor de Ca da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	86
Figura 29 - Correlação entre a largura (a) e a espessura (b) de fibra da madeira e o teor de Ca da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	87
Figura 30 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira e o teor de Mg da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	87
Figura 31 - Correlação entre espessura de parede de fibra da madeira e o teor de Mg da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes	

tratamentos	87
Figura 32 - Correlação entre espessura de lume de fibra da madeira e o teor de S da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	88
Figura 33 - Correlação entre o volume (a) e a massa (b) da madeira e o teor de Mn da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	88
Figura 34 - Correlação entre largura de fibra da madeira e o teor de Mn da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	88
Figura 35 - Correlação entre a largura (a) e a espessura (b) de fibra da madeira e o teor de Zn da folha de <i>E. grandis</i> aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações limites permissíveis de metais em biossólido para uso agrícola e florestal	23
Tabela 2 - Atributos químicos ¹ do Latossolo Vermelho-Amarelo por ocasião da instalação do experimento	45
Tabela 3 - Composição química total do biossólido, base seca a 65°C, tipo B, produzido na Estação de Tratamento de Esgoto - ETE de Barueri-SP .	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

% - Percentagem

α - Alfa

μm - Micrometro

' - Minuto

" - Segundo

< - Menor

= - Igual

> - Maior

° - Grau

a.s. - absolutamente seco

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel

Al - Alumínio

AQ - Adubação química

As - Arsênio

B - Boro

B - Biossólido

C:N - Relação Carbono-Nitrogênio

Ca - Cálcio

Cal - Caloria

Cal g^{-1} - Caloria por grama

Cd - Cádmio

CEM - Consumo Específico de Madeira

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

Cl - Cloro

Cm - Centímetro

cm^3 - Centímetro cúbico

Cr - Cromo

Cu - Cobre

Cwa - Mesotérmico úmido

D - Diâmetro

DAP - Diâmetro à Altura do Peito

dm - Decímetro

E. - *Eucalyptus*

ESALQ - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

et al. - E outros

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

FCA - Faculdade de Ciências Agronômicas

Fe - Ferro

g - Grama

g cm^{-3} - Grama por centímetro cúbico

g dm^{-3} - Grama por decímetro cúbico

g kg^{-1} - Grama por quilo

H - Hidrogênio

H - Altura Comercial

H₂O - Água

ha - Hectare

Hg - Mercúrio

HT - Altura Total

IB - Instituto de Biociências

K - Potássio

K₂O - Óxido de potássio

Kcal - Quilocaloria

kcal kg^{-1} - Quilocaloria por quilo

KCl - Cloreto de Potássio

Kg - Quilograma

kg m^{-3} - Quilo por metro cúbico

kg t^{-1} - Quilo por tonelada

L - Litro

m - Metro

m - Saturação por alumínio
MO - Matéria Orgânica
 m^2 - Metro quadrado
 m^3 - Metro cúbico
mesh - Quantidade de furos por polegada linear
Mg - Magnésio
mg - Miligrama
 $mg\ dm^{-3}$ - Miligrama por decímetro cúbico
 $mg\ kg^{-1}$ - Miligrama por quilo
 $Mg\ ha^{-1}$ - Megagrama por hectare
mL - Mililitro
mm - Milímetro
 $mmol_c$ - Milimol de carga
 $mmol_c\ dm^{-3}$ - Milimol de carga por decímetro cúbico
Mn - Manganês
Mo - Molibdênio
N - Nitrogênio
n - Número de amostras por tratamento
Na - Sódio
NBR - Norma Brasileira
NaOH - Hidróxido de sódio
 Na_2O - Óxido de sódio
Ni - Níquel
Nk - Número kappa
 $NMP\ gST^{-1}$ - Número Mais Provável por grama de Sólidos Totais
n.s. - Não significativo
O - Oxigênio
 $^{\circ}C$ - Graus Celsius
P - Fósforo
P - Precipitação
p - Nível de significância

P_2O_5 - Pentóxido de fósforo
Pb - Chumbo
pH - Potencial Hidrogeniônico
r - Coeficiente de correlação
 R^2 - Coeficiente de determinação
RBG - Rendimento Bruto Gravimétrico
rpm - Rotação por minuto
s.a. - Seco ao ar
s.e. - Seco em estufa
SP - São Paulo
SB - Soma de Bases
Se - Selênio
t - Tonelada
T - Capacidade de troca catiônica em pH 7,0
T - Temperatura
 $t\ ha^{-1}$ - Tonelada por hectare
Ta - Temperatura anual
TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry
Test - Testemunha
Tf - Temperatura do mês mais frio
Tq - Temperatura do mês mais quente
U.E. - União Européia
UNESP - Universidade Estadual Paulista
USP - Universidade de São Paulo
V - Saturação por bases
Z - Comprimento do segmento entre dois discos
Zn - Zinco

RESUMO

Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado

No Brasil, o *Eucalyptus grandis* tem sido uma das espécies mais cultivadas dentro do gênero, devido ao seu potencial produtivo e às desejáveis características da madeira. Vários estudos têm avaliado o efeito da adubação na produtividade de florestas plantadas, mas poucos avaliaram os efeitos na qualidade da madeira, sobretudo as espécies latifoliadas. Recentemente, o lodo de esgoto tem sido usado como adubo em plantios florestais. No presente estudo, avaliou-se o efeito da aplicação de lodo de esgoto tratado (biossólido) (0 a 40 t ha⁻¹ base seca) e de adubo mineral nos atributos físicos, químicos, anatômicos e de polpação da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden (Coff's Harbour) com cinco anos de idade. A área experimental localiza-se no município de Itatinga, São Paulo. O tipo de solo ocorrente na área foi caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico (argila = 120 g kg⁻¹ na camada 0-20 cm). O clima foi caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com 4 repetições. As parcelas experimentais tinham 100 plantas, plantadas no espaçamento de 3,0 m x 2,0 m. Nas avaliações dendrométricas, considerou-se as parcelas com bordadura dupla. Foi medido o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura e o volume sólido das árvores. Para as avaliações relativas à qualidade da madeira, amostraram-se 8 árvores com DAP dentro da classe de maior frequência de cada tratamento. De cada árvore foram retirados 5 discos com 4 cm de espessura a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, definida como aquela correspondente ao diâmetro de 6,0 cm com casca. De cada disco descascado foram retiradas quatro cunhas de 90°. A primeira cunha foi utilizada para a determinação da massa específica básica, a segunda e a terceira deram origem a amostras compostas por árvore para as análises de polpação e produção de serragem, respectivamente; e a quarta cunha foi mantida como reserva. As caracterizações físicas, químicas, anatômicas e a polpação da madeira foram realizadas de acordo com as normas da ABTCP, TAPPI e ABNT. Os resultados mostraram que o lodo de esgoto diminuiu a densidade básica da madeira, o que se constatou está relacionado à diminuição da espessura da parede das fibras. O teor de celulose não foi modificado. O decréscimo de densidade da madeira, promovido pela adubação com lodo de esgoto, foi compensado pelo aumento de produtividade de madeira. O rendimento bruto gravimétrico da polpação aumentou e o número kappa diminuiu com a aplicação de lodo de esgoto. O poder calorífico da madeira não foi alterado. O lodo de esgoto diminuiu o teor de elementos de transição (Mn, Fe, Cu e Zn) na madeira, o que pode ser um efeito benéfico, pois implica em menor consumo de reagentes durante o branqueamento da polpa.

Palavras-chave: Eucalipto; Resíduo urbano; Adubação orgânica; Nutrição mineral; Celulose; Energia

ABSTRACT

Modifications in the wood quality of *Eucalyptus grandis* caused by sewage sludge application

Eucalyptus grandis is the most planted species in Brazil due to its wood productivity and quality. Several studies have evaluated the effect of fertilization on productivity of forest plantations, but few evaluated this silvicultural practice on wood quality, especially to hardwood species. Recently, the sewage sludge has been used as fertilizer in forest plantations. In this paper, the effect of growing rates of treated sewage sludge (biosolid) (0 to 40 Mg ha⁻¹ dry base) and one rate of mineral fertilizer on anatomical, chemical, physical attributes and pulping of *Eucalyptus grandis* wood were evaluated. The trees were with five years old. The experimental area locates at Itatinga county, state of São Paulo, Brazil. The soil in the area was characterized as a Red-Yellow Latosol Dystrophic (clay = 120 g kg⁻¹ at 0-20 cm layer). The climate was characterized as a humid mesothermic (Cwa), according to the classification of Köppen. The plots were established in a randomized complete block design, with 6 treatments and 4 replicates. Each plot consisted of 100 trees (10 x 10), planted at a spacing of 3.0 m x 2.0 m. Tree growth was measured in all plots as: height, diameter at breast height (DBH) and volume of wood. Samples of 8 trees belonging to more often DBH were collected. Of each tree were removed 5 disks (4 cm thick) at 0, 25, 50, 75 and 100% of the commercial height. From each disk barked were removed four wedges of 90°. The first wedge was used for the determination of the basic density, the second and third gave origin to composed samples for tree used for pulping analyses and sawdust production, respectively; and the fourth wedge was maintained as reservation. The physical, chemical and anatomical characterization and the wood pulping were made in agreement with the norms of the Brazilian Pulp and Paper Technical Association, Brazilian Technical Norms Association and Technical Association of the Pulp and Paper Industry. The sewage sludge reduced the basic density of wood, which was related to the decrease of the wall thickness of the fibers. The cellulose content was not modified. The decrease of wood density promoted by sewage sludge application was compensated by increase of wood growth. The rough yield gravimetric of the pulping increased and the kappa number reduced with the sewage sludge application. The calorific power of the wood was not altered. The sewage sludge reduced the transition elements content (Mn, Fe, Cu and Zn) in the wood, what maybe a beneficial effect because imply in minor consume of reagents during the pulp bleaching.

Keywords: Eucalypt; Urban residue; Organic fertilization; Mineral nutrition; Cellulose; Energy

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o *Eucalyptus grandis* é a espécie florestal mais plantada (SOUZA et al., 2004). Seu potencial produtivo e as características da madeira são os principais motivos desta preferência. Dentre os diversos usos industriais, sua madeira presta-se para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, combustível industrial e doméstico e produtos de serrarias (SOARES et al., 2003).

A crescente demanda da sociedade por melhores condições ambientais tem exigido de empresas públicas e privadas a definição de políticas ambientais mais avançadas, dentre as quais se inclui a que destaca o tratamento de efluentes de esgotos (águas residuárias). Conseqüentemente, a quantidade de efluentes de esgoto tratados tende a aumentar progressivamente nos próximos anos, como verificado nas últimas décadas. Esse tratamento tem gerado um resíduo denominado lodo de esgoto, que depois de tratado e higienizado, torna-se sólido e é popularmente conhecido por biossólido (FARIA; RODRIGUEZ, 2000; ROCHA, 2002; VAZ; GONÇALVES, 2002; GUEDES; POGGIANI, 2003; MARTINS et al., 2004; MOLINA, 2004).

Em plantações florestais com espécies de interesse silvicultural, particularmente do gênero *Eucalyptus*, a adubação química e/ou orgânica é uma prática silvicultural eficiente, tornando-se potencial o uso do lodo de esgoto tratado também como alternativa promissora para uma disposição final adequada desse resíduo. A sua utilização como fertilizante pode resultar em melhoria significativa da fertilidade do solo, conseqüentemente, do potencial produtivo das florestas. O uso do lodo de esgoto como fertilizante em plantações florestais tem se mostrado bastante promissor no Brasil e no exterior (PHILLIPS et al., 1986; WEETMAN et al., 1993; HENRY et al., 1994; POLGLASE; MYERS, 1996; VAZ; GONÇALVES, 2002; ROCHA et al., 2004; MOLINA, 2004 e outros).

A grande maioria dos estudos que testaram os efeitos de fertilizantes minerais e/ou orgânicos sobre a produtividade de povoamentos de *Eucalyptus* não avaliaram o

efeito desta prática na qualidade da madeira. Analisando os trabalhos referentes à adubação em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, observa-se que ocorre significativo aumento de produtividade (GUEDES, 2000; ROCHA, 2002; VAZ; GONÇALVES, 2002), porém, não se sabe quais são os efeitos na qualidade da madeira.

Questão essencial como esta expressa a preocupação de técnicos na indústria madeireira, em especial, na indústria de celulose e papel, pois a qualidade da madeira tem reflexo direto no consumo de energia e substâncias químicas. Por conseguinte, no custo de produção de celulose e papel e na produção de resíduos industriais. Observa-se na literatura que poucos estudos (VITAL, 1990; ANDRADE et al., 1994; RAYMOND; MUNERI, 2000; GONÇALVES et al., 2004) avaliaram o efeito da adubação mineral e da adubação orgânica sobre a qualidade da madeira oriunda de plantações latifoliadas homogêneas. Entre as principais conclusões desses estudos destaca-se que as alterações nas condições de crescimento, devido à aplicação de adubos, são freqüentemente associadas com importantes alterações na qualidade da madeira, sobretudo a fatores físicos, químicos e anatômicos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto tratado nos atributos físicos, químicos e anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O lodo de esgoto

O lodo de esgoto, resultante do tratamento de águas residuárias, é um dos grandes problemas ambientais urbanos da atualidade (ANDREOLI et al., 1997). Quando o lodo é resultante de sistema de tratamento biológico de despejos sanitários e condicionado de forma a apresentar características tais que permitem a sua utilização com segurança na agricultura, então passa a ser conhecido como “biossólido” (MOLINA, 2004). A densidade de patógenos presentes em biossólidos é estimada através da determinação da quantidade de coliformes fecais. Biossólido com teor de coliformes fecais acima de $2 \cdot 10^6$ NMP gST⁻¹ (número mais provável de coliformes fecais existentes em 1 grama de sólidos totais) não podem ser utilizados em solos agrícolas. Assim sendo, a Norma P4.230 (CETESB, 1999) classifica os biossólidos em classe A ou B, ou seja:

Classe A – aquele que apresenta quantidade de coliformes fecais menor que 1000 NPM gST⁻¹ pode ser utilizado sem restrições.

Classe B – aquele que apresenta uma quantidade de coliformes fecais inferior a $2 \cdot 10^6$ NMP gST⁻¹, sendo de uso mais restrito, ou seja, em grandes culturas, reflorestamentos e outras situações onde o risco pode ser mais controlado.

Outro fator que pode restringir o uso de biossólido em áreas agrícolas e florestais é a quantidade de metais pesados, cujos valores limites estão estabelecidos na Norma P4.230 (CETESB, 1999; Tabela 1).

Das formas de disposição finais existentes para este resíduo, a reciclagem agrícola tem se mostrado, em nível mundial, como uma solução adequada do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, por viabilizar a reciclagem de nutrientes,

promover melhorias físicas no ambiente e por apresentar uma solução definitiva para a disposição do lodo (MOLINA, 2004).

Tabela 1 - Concentrações limites permissíveis de metais em biossólido para uso agrícola e florestal

Área	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
mg kg^{-1}										
U. E.	...	20/40	...	1000/1750	16/25	...	300/400	750/1200	...	2500/4000
Canadá	75	20	...	...	5	20	180	500	14	1850
S. P.	75	85	...	4300	57	75	420	840	100	7500

Notas: ... Dado numérico não disponível; U.E. = União Européia; S.P. = São Paulo.

Fontes: CETESB, 1999 e Tsutiya, 1999.

Por medida de precaução, algumas culturas são mais indicadas a receber a aplicação do lodo do que outras e, dentre elas, as florestais são as que podem reduzir a quase zero o risco de qualquer tipo de contaminação. Neste sentido, segundo Fernandes e Andreoli (1997), o reflorestamento é uma excelente opção de uso para o lodo de esgoto, permitindo a utilização de doses elevadas, com alto grau de segurança, devido ao ciclo longo e por não se tratar de produção alimentar.

Vários pesquisadores, como Berton et al. (1989), Bevacqua e Mellano (1994), Skousen e Klinger (1998), Tsutya (2000), entre outros, relatam que a utilização do biossólido pode melhorar as propriedades químicas do solo, tais como: aumentos de pH, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e teor de macronutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e cálcio.

Dentre os efeitos dendrométricos, que a aplicação de biossólido no solo reflete, são relatados aumentos significativos no diâmetro e altura das árvores e um conseqüente aumento na produtividade do sítio florestal (PHILLIPS et al., 1986; WEETMAN et al., 1993; HENRY et al., 1994; POLGLASE; MYERS, 1996). Tais estudos se referem a países da Europa, Ásia, América do Norte e Austrália, uma vez que no Brasil as pesquisas nessa área, como em Vaz e Gonçalves, 2002; Rocha et al, 2004 e outros, ainda são muito incipientes com pouca disponibilidade de dados.

2.2 Efeitos da adubação nos atributos da madeira e na polpação

Os efeitos da adubação sobre a madeira são determinados pelas condições de crescimento existentes antes da aplicação, pela espécie, pela genética das árvores, pelo espaçamento de plantio, pela composição e dose do adubo e pelas condições edafoclimáticas do sítio (ZOBEL et al., 1961; SMITH et al., 1977).

Segundo Andrade et al. (1994), a fertilidade do solo, às vezes modificada pela adubação, pode influenciar a qualidade da madeira, sobretudo, por interferir na taxa de crescimento da árvore. Os efeitos do uso de fertilizantes dependem da idade das árvores, tipo de fertilizante, época de aplicação, quantidade aplicada, frequência de aplicação, entre outros.

As alterações nas condições de crescimento, devido à aplicação de fertilizantes, são freqüentemente associadas com importantes alterações na qualidade da madeira. Tal importância se refere a atributos físicos, químicos e anatômicos (LARSON, 1968). Porém, os efeitos da adubação sobre a qualidade da madeira são difíceis de prever. Alguns estudos mostram melhoria na qualidade, enquanto outros mostram declínio (PUNCHES; COUNTRY, 2004). Na árvore, o efeito do adubo é imediato e se mantém por um período que pode variar entre três a cinco anos, segundo a espécie e as condições de aplicação; passado este período, as características da madeira tendem a voltar ao que seria normal se as árvores não tivessem sido adubadas (ERICKSON; HARRISON, 1974; BRIX; MITCHELL, 1980; JAYAWICKRAMA, 2002).

Entre as principais características da madeira que são afetadas pela fertilização, Shimoyama e Barrichelo (1989) destacam a quantidade de lenho nas coníferas, a densidade básica, as características das fibras, a composição química e as quantidades de madeira juvenil e adulta. Nesses estudos, pôde-se perceber que os atributos físicos do solo se relacionou, com maior frequência, à capacidade produtiva dos sítios florestais e, conseqüentemente, com a qualidade da madeira produzida (GONÇALVES

et al., 1990). Ainda são poucos os estudos que relacionam diretamente a interferência dos atributos do solo sobre a qualidade de espécies florestais (RIGATTO et al., 2004).

Estudos mostram que a adubação causa aumento na produtividade, porém muito pouco é sabido sobre seus reflexos nos atributos da madeira, principalmente de folhosas como o *Eucalyptus*. A maioria desses trabalhos mostram o efeito da fertilização sobre os atributos da madeira de coníferas de clima temperado (WEETMAN, 1971; CUTTER; MURPHY, 1978; SHEPARD; SHOTTAFFER, 1979; BRIX; MITCHELL, 1980; SHEPARD, 1982; JOZSA; BRIX, 1989; EKLUND; ELIASSON, 1990; DUNISCH et al., 1998), do gênero *Pinus* (WILLIAMS; HAMILTON, 1961; POSEY, 1964; MALAVOLTA et al., 1966; GRAY; ZEEUW, 1975; BALLONI, 1984; BRITO, 1985; DOWNES; TURVEY, 1986; YANG et al., 1988; WOOLLONS et al., 1995; RIGATTO et al., 2004) e poucos são os que tratam, por exemplo, do gênero *Eucalyptus* (HIGGS; RUDMAN, 1973; BAMBER et al., 1982; ANDRADE et al., 1994; JIAN JU et al., 1998; SGARBI et al., 2000; LIMA, 2005). A maior parte desses trabalhos verificaram o efeito da aplicação conjunta, principalmente de NPK ou de fertilizantes nitrogenados, não se preocupando com os efeitos isolados nem com as interações entre os nutrientes sobre os atributos da madeira.

O efeito da aplicação de NPK e calcário sobre a qualidade da madeira de *Eucalyptus saligna*, foi estudado por Mello (1968), o qual verificou que a densidade básica da madeira, a espessura e o comprimento das fibras não foram afetados pela aplicação dos macronutrientes primários, com exceção à aplicação de calcário (2 t ha^{-1}), que diminuiu o comprimento das fibras. Em concordância, Andrade et al. (1994) constatarem reduções significativas no comprimento das fibras e aumento no teor de extrativos da madeira de *E. grandis* devido à aplicação de calcário calcítico (2 t ha^{-1}). Os mesmos autores verificaram também que a aplicação de gesso e fosfato reduziu a presença de extrativos na madeira.

Em híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla*, Sgarbi et al. (2000) observaram que a deficiência de Ca produziu madeira com menor teor de lignina e fibras mais curtas, quando comparado com o tratamento completo e com as deficiências de N, P, K e Mg.

Bamber et al. (1982), examinando o efeito do rápido crescimento nas propriedades da madeira de *E. grandis*, aos 2,5 anos, sob adubação com N, P, K e S, concluíram que a madeira das árvores de crescimento mais rápido apresentou um comportamento similar às de crescimento mais lento com respeito à densidade básica e dimensões das fibras. Entretanto, de acordo com Higgs e Rudman (1973), para o *E. regnans*, a aplicação de N, P e K diminuiu o comprimento das fibras e a densidade básica da madeira.

Avaliando o efeito da adubação fosfatada, sulfatada (gesso) e da calagem do solo sobre a qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* com 6 anos de idade, Andrade et al. (1994) observaram que a aplicação de P e S afetou negativamente o diâmetro e a espessura da parede das fibras, e, que a aplicação da calagem afetou positivamente o diâmetro e a espessura da parede das fibras, bem como o teor de cinzas na madeira. O teor de lignina e a densidade básica não foram alteradas significativamente.

Em *E. globulus*, Raymond e Muneri (2000) estudaram o efeito da aplicação de N e P na qualidade da madeira, e, observaram que as propriedades da madeira em sítios mais secos foram contrariamente afetadas em relação a sítios mais úmidos. Verificaram que em sítios mais secos, a aplicação de N e P, sozinhos ou em combinação, resultaram em mudanças na densidade básica, fibras mais curtas, menor rendimento de polpa e aumento dos níveis desses nutrientes na madeira. Concluíram também que essas mudanças ocorreram nas propriedades da madeira na ausência de respostas de crescimento para os fertilizantes aplicados, indicando que tais mudanças não foram induzidas pelas taxas de crescimento. Zobel e Buijtenen (1989) notaram que a fertilização nitrogenada produziu madeiras com características juvenis, reduzindo sua densidade e estabilidade dimensional.

Desse modo, procurou-se ressaltar nesta revisão aspectos fundamentais das modificações e inter-relações de atributos de qualidade da madeira quando sob efeito da adubação química e/ou orgânica.

Atributos físicos

Massa específica básica da madeira

Massa específica (ou densidade) básica da madeira é a relação que expressa o peso por unidade de volume. Quando a relação é entre o peso seco e o volume saturado, a densidade denomina-se básica e é expressa em g cm^{-3} ou kg m^{-3} (VITAL, 1985). É um parâmetro quantitativo, adotado como índice de qualidade da madeira por estar diretamente relacionada com as características morfológicas, anatômicas e químicas da madeira (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989).

Uma vez que a madeira é formada por compostos de elevado grau de polimerização e massas moleculares, estes devem colaborar para o aumento da densidade básica (SHIMOYAMA, 1990). Entretanto, Shimoyama e Barrichelo (1989) relataram que, em geral, as coníferas têm como resposta à adubação, um aumento na percentagem de lenho inicial, tendo como conseqüência um decréscimo na densidade básica.

Com relação à massa específica dos constituintes químicos da madeira, Kellog (1975) encontrou $1,521 \text{ g cm}^{-3}$ para a holocelulose, $1,366 \text{ g cm}^{-3}$ para a lignina, $1,457 \text{ g cm}^{-3}$ para as hemiceluloses e $1,528 \text{ g cm}^{-3}$ para a α -celulose.

Rigatto et al. (2004), estudando a qualidade da madeira de *Pinus taeda* em vários sítios, verificaram que a madeira proveniente de sítios com ritmo de crescimento elevado, sítios com textura mais argilosa, mostrou tendência a ter menores valores de densidade básica. Tsoumis e Panagiotidis (1980) também observaram este fato

estudando o efeito das condições de crescimento nas características da madeira de *Pinus nigra*.

Com a aplicação de N, P e K em *E. regnans* e em *E. grandis*, respectivamente, Higgs e Rudman (1973) e Andrade et al. (1994) observaram que a densidade da madeira diminuiu com a aplicação desses nutrientes. Diferentemente, Wilkins e Horne (1991) e Cromer et al. (1998) encontraram que a adubação produziu madeira com maior densidade básica para a madeira de *E. grandis*.

Border et al. (2004) estudando o efeito da fertilização nitrogenada em loblolly pine (*Pinus taeda*) observaram que esse tratamento diminuiu a qualidade da madeira por diminuir sua densidade básica e prolongar a transição da madeira juvenil para a adulta de 4 para 5 anos.

Com relação ao efeito do espaçamento e da adubação química sobre o crescimento e a qualidade da madeira de um clone de *E. saligna* Smith, com 10,5 anos de idade, Berger (2000) verificou que o fator adubação mostrou-se significativo para a densidade básica da madeira, proporcionando aumento com a aplicação da maior dosagem de adubo.

Quando os povoamentos são adubados muito jovens, pode-se não verificar efeito da fertilização sobre a densidade da madeira. Se o N é aplicado quando a copa está ainda sendo formada, seu aumento tem pouco efeito sobre a madeira. Somente depois da copa formada é que sua expansão tem efeito nas características das células do tronco (MEGRAW, 1986).

Todavia, ainda necessita-se de estudos mais precisos para, realmente, dizer o quanto cada um destes elementos constituintes da madeira influenciam sua massa específica básica.

Poder calorífico da madeira

O uso da madeira para fins energéticos deve basear-se, entre outros fatores, no conhecimento do seu poder calorífico. Este expressa a capacidade de geração de energia de um combustível durante a sua combustão. Sua unidade de medida é quilocalorias por quilo (kcal kg^{-1}) ou calorias por grama (cal g^{-1}) de combustível (BRITO, 1993).

Vital (1990) compilando algumas informações quanto à influência da adubação na qualidade da madeira, concluiu que esta prática, causando um aumento de vigor na árvore, resulta num maior número de células que podem conter paredes mais espessas, podendo ocasionar aumento no teor de lignina e no teor de extrativos, que podem elevar o poder calorífico. Segundo Doat (1977), madeiras tropicais ricas em extrativos solúveis em compostos orgânicos e lignina possuem elevado poder calorífico. Assim, presume-se que as madeiras de espécies florestais exóticas de rápido crescimento, bem como as técnicas que promovem este crescimento, podem ser variáveis importantes com relação ao poder calorífico, neste caso: a adubação nas árvores de eucalipto.

Howard (1973) afirma que, para as folhosas, o poder calorífico está dentro da faixa de 4.600 a 4.800 kcal kg^{-1} e, para coníferas, 5.000 a 5.390 kcal kg^{-1} , a 0% de umidade. Por outro lado, Brito (1993) afirma que a variação do poder calorífico da madeira está entre 3.500 kcal kg^{-1} a 5.000 kcal kg^{-1} . As espécies que contêm consideráveis teores de resina em sua madeira respondem pelos maiores valores. Contudo, a maior concentração de valores médios de poder calorífico de madeiras, em geral, situa-se na ordem de 4.300 kcal kg^{-1} .

Estudando a influência de diferentes níveis de adubação (fatorial 2 x 2 x 2 para N, P, e K, com e sem calcário) no poder calorífico das madeiras de *Acácia mangium* e *E. grandis*, com 7 anos de idade, espaçamento 3 x 2 m, num Latossolo Vermelho-

Amarelo no município de São Paulo, Vale et al. (2000) verificaram que não houve influência da adubação no poder calorífico das duas espécies.

Algumas características da madeira influenciam o valor do seu poder calorífico, como por exemplo: a umidade, a composição química elementar, bem como os constituintes químicos da madeira, como a lignina, a celulose, as hemiceluloses e os extrativos.

Atributos químicos

Não são muitos os estudos que tratam com clareza a influência da adubação na composição química da madeira.

Os componentes químicos da madeira podem ser compreendidos em dois grandes grupos: componentes de alta massa molecular, que são a celulose, as hemiceluloses e a lignina, e os componentes de baixa massa molecular, que são os extrativos e as cinzas (PANSIN; ZEEUW, 1970).

Os estudos que têm tratado do efeito da adubação na composição química da madeira, em geral, mostram uma diminuição no teor de celulose e de extrativos e um aumento no teor de lignina em consequência da elevação no ritmo de crescimento das células devido à adubação (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989).

Jian Ju et al. (1998), estudando o efeito de 5 tratamentos de adubação (testemunha, N, P, NP e NPK + micronutrientes) sobre os componentes químicos da madeira de *Eucalyptus urophylla* com 9 anos de idade, notaram que a adubação não influenciou significativamente o teor de lignina e celulose. Porém, aumentou o teor de extrativos e pentosanas da madeira quando comparada com a testemunha.

Semelhantemente, Miranda e Pereira (2002) estudando a qualidade da madeira de *Eucalyptus globulus*, com 2, 3 e 6 anos de idade, verificaram que a composição

química (celulose, lignina e extrativos) não mostrou diferenças significativas entre a testemunha e o tratamento que recebeu fertilização.

Siddiqui et al. (1972) verificaram que a adubação aumentou o teor de celulose nos anéis iniciais de crescimento e diminuiu nos tardios. Erickson e Arima (1974) encontraram poucas mudanças nos extrativos, menor incremento na percentagem de lignina, e correspondente decréscimo na celulose. Enquanto essas mudanças parecem pequenas, até mesmo um ponto percentual pode ter um largo efeito nos processos econômicos da polpação química.

O aumento no vigor da árvore por causa da adubação pode resultar em maior número de células com parede celular ligeiramente mais espessa, resultado de uma maior proporção de lamela média e parede primária em relação à parede secundária (BRAZIER, 1977). Devido à maior concentração de lignina, normalmente observada na lamela média e na parede primária, esta alteração na estrutura da parede celular pode ocasionar ligeiro aumento no teor de lignina e ligeira redução no teor de celulose da madeira (HAYGREEN; BOWYER, 1982). Por outro lado, Gauch (1972) demonstrou que a deficiência de Ca pode acarretar alterações na composição química e na estrutura da lamela média, bem como enfraquecimento da parede celular. A adubação mineral pode também ocasionar ligeiro aumento no teor de substâncias extratáveis (HAYGREEN; BOWYER, 1982), e o teor de cinzas parece não ser afetado (LARSON, 1968).

As madeiras do gênero *Eucalyptus*, segundo Clarke et al. (1997), apresentam a seguinte composição química: 5 a 10% de extrativos, 20 a 24% de lignina, 48 a 55% de celulose e 17 a 22% de hemiceluloses.

A composição química da madeira é importante, particularmente para processos químicos de polpação. Altos teores de celulose e hemiceluloses e baixos teores de lignina, extrativos e cinzas são desejáveis para a produção de polpa.

Andrade et al. (1994) avaliando os efeitos das adubações fosfatadas, sulfatada e da calagem do solo sobre a produção e a qualidade da madeira de *E. grandis*, com seis anos de idade, observaram que os teores de lignina não foram afetados, porém os teores de extrativos e de cinzas se elevaram em função da calagem. Embora as várias espécies de eucalipto sejam pouco exigentes, com relação à acidez do solo e aos fatores a ela associados (NEVES et al., 1982), a calagem do solo é recomendada para elevar os teores de Ca e, ou, Mg, em substratos pobres nestes nutrientes.

Vital (1990) compilando algumas informações quanto à influência da adubação nos atributos químicos da madeira, concluiu que a mesma causou um aumento de vigor na árvore, e, que pode resultar em células com paredes mais espessas, ocasionando o aumento nos teores de lignina e extrativos, bem como a redução no teor de celulose.

Celulose

A celulose é o componente mais importante da parede celular da madeira em termos de massa (~ 50%) e efeitos nas características da madeira (CLARKE et al., 1997). É conceituada como um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear de suficiente comprimento para ser insolúvel em água, solventes orgânicos neutros, ácidos e hidróxidos diluídos, todos à temperatura ambiente, consistindo de unidades β -D-anidroglicopirranose ligadas através de ligações glicosídicas entre carbonos 1 e 4 e possui uma estrutura organizada e parcialmente cristalina. Valores médios encontrados para o grau de polimerização estão na faixa de 1.000 a 15.000, sendo os valores mais altos para o algodão e os mais baixos para a polpa de madeira (D'ALMEIDA, 1988). As moléculas de celulose, uma vez alinhadas, dão origem às microfibrilas, que por sua vez levam à formação das macrofibrilas, as quais se ordenam para formar a parede celular (ESAU, 1974).

O rendimento em celulose está associado à composição química da madeira, e a qualidade da celulose aos fatores anatômicos, como comprimento e espessura das paredes das fibras (NICHOLS, 1971). O *Eucalyptus grandis* e o *E. saligna* são espécies

importantes para a fabricação de celulose no Brasil por apresentarem alto rendimento, alta produtividade florestal e menor conteúdo mineral minimizando as possibilidades de causar problemas industriais como contaminações da polpa, corrosões, incrustações e entupimentos que reduzem a vida útil dos equipamentos (FREDDO et al. 1999).

O método de análise do teor de celulose e hemiceluloses da madeira por cromatografia de troca aniônica de alta resolução foi estudado por Wallis et al. (1996). Esses autores relataram que os resultados observados foram muito similares àqueles encontrados por determinação gravimétrica, embora a eficiência do método cromatográfico esteja estritamente vinculada à capacidade de se interpretar corretamente os resultados por ele fornecidos. Por outro lado, os métodos gravimétricos de determinação de celulose na madeira, além de oferecerem facilidades de interpretação dos resultados, são, até então, os mais acessíveis e fáceis de executar.

Hemiceluloses

As hemiceluloses constituem uma fração dos polissacarídeos totais da madeira, dos quais, a maior parte é solúvel em soluções alcalinas diluídas e se hidrolisam facilmente em ácidos diluídos para açúcares. Constituem de 20 a 35% da massa seca da madeira (PANSIN; ZEEUW, 1970). A fração de hemiceluloses é composta, principalmente, por duas classes de substâncias: as xilanas que são moléculas formadas por polimerização de formas anidro de pentoses (típicas de madeiras de folhosas) e as glucomananas, as quais são formadas pela polimerização de formas anidro de hexoses (típicas da madeira de coníferas), principalmente glicose e manose. As hemiceluloses são polímeros que apresentam cadeia curta e ramificada. O grau de polimerização está compreendido entre 150 a 200. Sua reatividade é semelhante à relatada para celulose, porém reagem mais rapidamente devido à ausência de cristalinidade (SANSÍGOLO, 1994).

Lignina

A lignina é o segundo componente químico da madeira em quantidade e a principal fonte natural de carbonos aromáticos. Sua unidade básica é o fenilpropano, diferindo consideravelmente em estrutura da holocelulose da madeira. Ela é mais solúvel e muito menos higroscópica que a celulose. Na madeira atua como agente ligante, reduzindo a variação dimensional da madeira com as mudanças de umidade, devido à sua baixa higroscopicidade. A madeira contém cerca de 15 a 30% de lignina, sendo usualmente encontrados valores de 25 a 30% para madeiras de coníferas e 15 a 25% para madeiras de folhosas (SANSÍGOLO, 1994).

A quantidade de lignina total depende dos requerimentos físicos e mecânicos da árvore e pode ser alterada durante o seu desenvolvimento, variando a quantidade dos precursores ou micronutrientes específicos. Plantas com deficiência de boro produzem menos lignina a partir da glicose pela via do ácido chiquímico. Deficiência de zinco também diminui a quantidade de lignina devido à redução da atividade enzimática para converter os álcoois precursores em lignina (GLASSER; KELLEY, 1987).

As técnicas para o isolamento da lignina podem ser classificadas em: isolamento por extração, isolamento como resíduo e isolamento como derivado. O isolamento da lignina por extração é efetuado com solventes neutros, os quais dissolvem uma pequena fração da lignina. O isolamento da lignina como resíduo é obtido através da remoção dos extrativos e dos polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) da madeira. O isolamento da lignina como derivado solúvel pode ser obtida através da utilização de solventes orgânicos ou inorgânicos (D'ALMEIDA, 1988). A solubilidade em água é conseguida através da introdução de grupos polares na estrutura da lignina, os quais levam adicionalmente a uma diminuição da massa molecular da lignina, facilitando desta forma a solubilização. A massa molecular da lignina solubilizada é em função do método de isolamento, do tipo de matéria-prima e do método de determinação utilizado (SANSÍGOLO, 1994).

Extrativos

Os extrativos da madeira compreendem um grande número de componentes, os quais, ao contrário da maioria dos polissacarídeos e da lignina, podem ser extraídos da madeira por meio de solventes orgânicos tais como etanol, acetona, diclorometano, éter etílico e tetracloreto de carbono. Na categoria de extrativos também podem ser englobados os componentes solúveis em água, como alguns carboidratos, compostos fenólicos e sais inorgânicos. Os extrativos mais importantes em termos de quantidade, ocorrência natural e importância econômica são as resinas da madeira e os polifenóis. A resina da madeira contém cerca de 25% de compostos voláteis conhecidos como terebintina e 75% de um resíduo não-volátil denominado breu. Os polifenóis ocorrem tanto em madeiras de coníferas quanto em folhosas, e incluem vários compostos de importância como os taninos, os flavonóides, as lignanas e fenóis simples. Outros compostos orgânicos também ocorrem nos extrativos como as gorduras, ceras e hidrocarbonetos voláteis. O teor de extrativos representa pequena percentagem da massa de madeira seca. Entretanto, a quantidade pode ser considerável em algumas espécies. Para a maioria das madeiras de folhosas o teor de extrativos está na faixa de 1 a 5% e em coníferas de 2 a 10%, conforme análise da composição química de várias madeiras apresentada por Fengel e Wegener (1984). Os extrativos também influenciam nas propriedades das madeiras. O odor e a coloração típica de muitas madeiras se devem aos extrativos. Também influenciam no consumo de reagentes nos processos químicos de utilização da madeira e na permeabilidade (SANSÍGOLO, 1994).

Cinzas

Os componentes inorgânicos da madeira são usualmente denominados de cinzas e são obtidos após a combustão da matéria-orgânica. O teor de cinzas na madeira está na faixa de 0,1 a 1,0% base madeira seca, porém esse teor pode ser maior em espécies de clima tropical e sub-tropical (FENGEL; WEGENER, 1984). Metais alcalinos e alcalinos terrosos, como cálcio, potássio e magnésio representam cerca de 70% dos cátions presentes (PANSIN; ZEEUW, 1970).

Atributos anatômicos

A madeira de folhosas apresenta uma estrutura anatômica mais complexa que a das coníferas, em função da especialização de seus elementos anatômicos. As principais características anatômicas apresentadas pelas folhosas são: o lenho contém vasos, apresenta diversos tipos de fibras, raios multisseriados, elementos anatômicos dispostos em forma não alinhada, perfeita correlação entre forma e função desses elementos; apresenta parênquimas longitudinal e radial, ocorrendo em diversas percentagens em função da espécie (PANSIN; ZEEUW, 1970).

As dimensões das fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume) representam diversos estágios no seu desenvolvimento, que são controlados por diferentes processos fisiológicos (SIDIQI, 1972).

O comprimento das fibras é influenciado, principalmente, pela taxa de divisões transversais no câmbio, e a frequência de divisões varia com a espécie, fatores ambientais e ritmo de crescimento. O elevado ritmo de crescimento provoca rápidas divisões transversais das células cambiais iniciais, impedindo o desenvolvimento total das mesmas em comprimento. Dessa maneira, o comprimento das fibras diminui em consequência deste ritmo de crescimento (NICHOLS, 1971).

O comprimento das fibras pode permanecer inalterado ou aumentar ligeiramente (MAEGLIN et al., 1977). Contudo, Higgs e Rudman (1973) observaram uma redução significativa no comprimento das fibras, de 1,010 mm para 0,950 mm, após a adubação em *E. regnans*. Semelhante observação obteve Mello (1968), de 0,998 mm para 0,965 mm no comprimento das fibras de *E. saligna*, após aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário, porém a espessura da parede da fibra não foi alterada.

Da mesma forma que para o comprimento, verificou-se também uma redução na espessura das paredes das fibras, já que as rápidas divisões não permitem o espessamento das mesmas (SANTOS et al., 1967; BRIX; MITCHELL, 1980).

A lamela média é rica em cálcio, e este, como nutriente estrutural, é responsável pelo aumento da rigidez da parede celular, dificultando o aumento do volume da célula. A sua deficiência provoca alterações na composição química e na estrutura da lamela média, bem como, aumenta a permeabilidade da membrana celular (MALAVOLTA, 1980).

Com relação à largura das fibras e diâmetro do lume em função do aumento do ritmo de crescimento, os resultados encontrados são contraditórios. Enquanto que alguns autores verificaram um aumento na largura das fibras, outros dizem não haver alteração. Porém, segundo Shimoyama e Barrichelo (1989), se a largura da fibra aumenta ou permanece constante, o diâmetro do lume se apresentará maior, uma vez que a espessura da parede diminui com a adubação.

Andrade et al. (1994) avaliando os efeitos da adubação fosfatada, sulfatada e da calagem do solo sobre a produção e a qualidade da madeira de *E. grandis*, com seis anos de idade, observaram fibras com menores diâmetros e espessura de parede no lenho das árvores que receberam fosfato e gesso e fibras com diâmetro e espessura de paredes maiores naquelas que receberam calagem.

Ainda, em relação aos atributos anatômicos da madeira, Subrahmanyam (1988) verificou que altas doses de N proporcionaram fibras mais longas em *E. grandis*, e o contrário foi observado para a aplicação do P. Quanto ao N e P, não afetaram o diâmetro das fibras. No entanto, observou que as plantas cultivadas em altas doses de P e baixas de N apresentaram parede celular mais espessa.

Quanto à aplicação do elemento S, os resultados obtidos por Sgarbi et al. (2000) divergiram dos encontrados por Yang et al. (1988), uma vez que ocorreu diminuição no comprimento das fibras e na densidade básica da madeira do híbrido *E. grandis* vs. *E. urophylla* quando cultivado na ausência de S em relação ao tratamento completo.

Não existe uma teoria clara sobre a influência da adubação sobre a espessura da parede celular (ROQUE, 2000). Em alguns casos, a variação que ocorre na parede celular depende do tipo de adubo aplicado e do crescimento inicial que tenha tido a árvore antes da aplicação (KLEM, 1968). No caso específico do *Pinus elliottii*, com a aplicação de K ocorreu diminuição na espessura da parede celular, enquanto que quando se aplicou N não foram observadas mudanças significativas (WILLIAMS; HAMILTON, 1961).

Smith et al. (1977) observaram que em *Pinus nigra* var. *marítima*, o diâmetro das células não foi influenciado pela adubação nitrogenada. Por outro lado, a espessura da parede celular, tanto no sentido radial como no tangencial, diminuiu, implicando num aumento do diâmetro do lume dessas células.

Efeitos das dimensões das fibras da madeira na polpa

Os maiores determinantes da qualidade da polpa e do papel, bem como os mais comuns atributos medidos são os atributos físicos das fibras (diâmetro, espessura da parede e comprimento das fibras) e os atributos químicos da madeira (os teores de lignina, celulose e extrativos) (RAYMOND, 1998).

O comprimento e a espessura da parede da fibra são as dimensões mais importantes para conferir, por exemplo, propriedades ao produto papel. O comprimento da fibra influencia nas resistências à tração, arrebentamento e rasgo do papel. Pode ter efeito direto no uso da madeira e na qualidade do produto final. A resistência do papel, por exemplo, depende da proporção de fibras longas e curtas utilizadas na sua composição. É uma característica fortemente controlada geneticamente e pode ser alterada por mudanças dos padrões de crescimento resultantes de práticas silviculturais (XAVIER et al., 1997). O comprimento das fibras é um fator determinante no controle da resistência ao rasgo do papel, apresentando maior resistência (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989). O tamanho das fibras de folhosas tem papel importante na qualidade da madeira (HUDSON et al., 1998).

Entretanto, Pereira et al. (1995).verificaram que a aplicação da fertilização não influenciou o comprimento das fibras, nem a densidade básica da madeira de *Eucalyptus globulus* plantado em Portugal.

Quanto à espessura da parede da fibra, aquelas com paredes espessas são mais rígidas e na estrutura do papel não se ajustam perfeitamente, dando origem a papéis pouco densos, de menor resistência à tração e ao arrebetamento e com alta opacidade. Já as fibras com paredes delgadas formam folhas de papel mais densas e, devido a sua maior flexibilidade, ocorre maior número de ligações entre fibras, conduzindo a papéis com maior resistência à tração e ao arrebetamento e menor opacidade. A espessura da parede das fibras tem efeito importante nas propriedades de resistência, flexão e rasgo do papel. Fibras com paredes espessas tendem a produzir papel com superfície de impressão de baixa qualidade e pouco resistente. A largura das fibras também influencia na qualidade do produto.

A largura das fibras é praticamente constante em um anel de crescimento mas apresenta grande variação radial, sendo maior no lenho inicial e menor no lenho tardio (ZOBEL; BUIJTENEM, 1989). Assim, a madeira produzida após uma adubação apresentará fibras mais curtas e paredes mais finas, conferindo ao papel uma baixa opacidade, maior uniformidade, superfície lisa, alta ligação entre fibras e portanto alta resistência à tração e estouro e menor resistência ao rasgo (HAGNER, 1967; KLEM, 1968).

Polpação

Vários são os estudos que indicam a possibilidade de se prever as propriedades da polpa celulósica através da análise das características da madeira ou de seus elementos anatômicos (GOODWIN-BALEY, 1989; SILVA JÚNIOR; BRAGA, 1997).

A qualidade da polpa celulósica é altamente dependente dos aspectos químicos, anatômicos e físicos da matéria-prima, destacando-se como parâmetros principais para

a caracterização da madeira a massa específica básica, as características morfológicas das fibras e os teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos (BARRICHELO, 1983).

Segundo Shimoyama e Barrichelo (1989), a qualidade da celulose está associada aos fatores anatômicos como comprimento e espessura da parede das fibras, enquanto para o rendimento em celulose está associada à composição química da madeira. Neste sentido, a composição química da madeira assume grande importância frente ao rendimento em polpa kraft. A lignina e os extrativos, por exemplo, influenciam diretamente o consumo de álcali, rendimento da deslignificação e o potencial de produção industrial (FONSECA et al., 1996).

O rendimento em celulose pode ser gravimétrico ou volumétrico. O rendimento gravimétrico é expresso como a relação percentual entre a quantidade de celulose produzida e a quantidade de madeira empregada, ambas expressas em termos de peso absolutamente seco, enquanto que o rendimento volumétrico pode ser expresso de diversas maneiras, destacando-se entre elas, a quantidade de celulose produzida, expressa em peso absolutamente seco, por metro cúbico de madeira empregada ou por metro cúbico de digestor (FOELKEL; BARRICHELO, 1975).

A massa específica básica tem sua principal influência no rendimento volumétrico do processo, penetração do licor de cozimento, tempo de cozimento e qualidade da celulose (DINWOODIE, 1965). No estudo dos parâmetros de qualidade da madeira, Zobel e Buijtenen (1989) observaram que a densidade básica apresentou alta correlação com o rendimento bruto gravimétrico, qualidade e propriedades de resistência da polpa.

Cromer et al. (1998), analisando 5 tratamentos diferentes de adubação em plantações de *Eucalyptus grandis*, concluíram que um aumento na velocidade de crescimento se mostrou associado a um aumento na densidade básica, assim como um aumento no rendimento em polpa kraft. Uma vez comprovada sua influência sobre a

qualidade da polpa, passou-se a verificar se o rendimento da deslignificação, ou seja, de conversão da madeira em polpa, também podia sofrer efeito desta propriedade física da madeira. Neste sentido, vários estudos foram realizados, existindo, assim, um consenso de que o rendimento volumétrico do digestor está altamente associado à densidade básica. Sua influência no rendimento volumétrico (consumo específico de madeira) é entendida em razão do manuseio de menor volume de toras e cavacos, respectivamente, para uma mesma quantidade de massa (WEHR, 1991; FOELKEL et al., 1992).

O uso de madeiras muito leves levam à redução do rendimento em celulose, enquanto que madeiras muito pesadas apresentam dificuldades na picagem e impregnação do licor, consomem quantidades elevadas de reagentes, podem conduzir a baixos rendimentos de processo e elevados teores de rejeitos (WEHR, 1991). Este mesmo autor encontrou alta correlação entre hemiceluloses e rendimento gravimétrico, num estudo com 4 lotes de tipos diferentes de *Eucalyptus grandis*, verificando que madeiras com baixo teor de extrativos e lignina conduziram a um aumento no rendimento.

Utilizando árvores de 5 a 10 anos de *Eucalyptus grandis*, em um total de 25 árvores para cada idade, com seções transversais retiradas no DAP, base, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, Barrichelo et al. (1983), encontraram que o rendimento gravimétrico em celulose está altamente correlacionado com o teor de hemiceluloses.

Wallis et al. (1996) tentaram correlacionar composição química ao rendimento e composição da polpa kraft de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens*, onde encontraram para ambas as espécies forte correlação positiva entre celulose e rendimento em polpa kraft. Os autores afirmam que uma análise do teor de celulose na madeira pode indicar um meio rápido e seguro de se avaliar o potencial em polpa kraft de uma floresta de *Eucalyptus*.

Num estudo da qualidade da madeira de *Eucalyptus globulus*, com 2, 3 e 6 anos de idade, Miranda e Pereira (2002) encontraram rendimento de polpa médio global de 56,5% e número kappa 15, bem como nenhuma diferença no rendimento de polpa ou grau de deslignificação pôde ser associado com a fertilização, concluindo que nestas condições, árvores de crescimento intensivo e mais curtas rotações podem ser usadas para polpação sem perda de qualidade da matéria-prima.

A seleção de sítios para formação de florestas mediante a qualidade da madeira, tem levado em consideração os efeitos das propriedades físicas e químicas da madeira sobre o processo de deslignificação e a qualidade da polpa produzida (SANSÍGOLO, 2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O presente trabalho foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, unidade vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), município de Itatinga, estado de São Paulo. Está localizada entre os paralelos 23° 02' 01 "e 23° 02' 30" latitude Sul e os meridianos 48° 37' 30 "e 48° 38' 34" longitude Oeste de Greenwich, com 830 m de altitude média.

O clima da região, segundo a classificação de Köeppen, foi caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), com precipitação média mensal do mês mais seco entre 30 e 60 mm e média anual de 1635 mm. A temperatura média do mês mais frio é de 12,8 °C e a média do mês mais quente é de 19,4 °C. A umidade relativa média anual é de 83,3%. O balanço hídrico apresenta um excedente de 762 mm e um déficit de 3 mm nos meses de julho e agosto, com uma evapotranspiração potencial de 877 mm, e capacidade de armazenamento do solo de 150 mm.

Os dados pluviométricos e de temperatura (Figura 1), durante o período de condução do experimento, foram coletados numa estação meteorológica situada na área experimental. Os valores anuais podem ser observados na Figura 2 (GUEDES, 2005).

O solo da área foi caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico (areia = 830 g kg⁻¹, silte = 50 g kg⁻¹ e argila = 120 g kg⁻¹, na camada 0-20 cm). Este tipo de solo é representativo de extensas áreas de plantações de eucaliptos no estado de São Paulo. Na Tabela 2, são apresentados alguns atributos químicos do solo.

Figura 1 - Valores da precipitação média (P) e da temperatura média (T), em cada mês do período em que o experimento foi conduzido, desde a aplicação do bio sólido até a coleta das amostras

No local do experimento, a vegetação nativa era o cerrado. Depois de sua remoção, foi conduzido um povoamento de *Eucalyptus saligna* por aproximadamente cinquenta anos. Neste período, o povoamento sofreu vários cortes rasos para obtenção de madeira para energia e carvão. Depois dos cortes, as brotações foram conduzidas, sem qualquer adição de fertilizantes.

Para implantar este experimento, a madeira foi colhida e a área foi replantada em março de 1998, com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis*. O preparo do solo consistiu em uma passagem de um rolo-faca para picar os galhos do cultivo anterior, seguido da abertura de um sulco de 30 cm de profundidade com escarificador de uma haste. Em seguida, efetuou-se o plantio neste sulco. O replantio das mudas que não sobreviveram, fez-se necessário após 35 dias do plantio.

Figura 2 - Médias anuais da temperatura medida diariamente às 9:00h (Ta), da temperatura do mês mais quente (Tq) e mais frio (Tf) de cada ano com os respectivos nomes dos meses, e valores totais da precipitação anual (P)

Tabela 2 - Atributos químicos¹ do Latossolo Vermelho-Amarelo por ocasião da instalação do experimento

Prof.	pH	MO	P	K	Ca	Mg	H + Al	Al	SB	T ²	V ³	m ⁴
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³					%	%
0-5	3,6	56	2	0,9	3	2	92	19	6	98	6	76
5-10	3,8	18	1	0,9	2	2	53	12	5	58	8	71
10-20	3,8	15	1	0,9	4	1	45	10	5	51	11	65
		Cu	Zn		Mn		Fe	S-SO ₄ ²⁻			B	
					mg dm ⁻³							
0-5	0,5		0,5		2,4		123	12,8			0,2	
5-10	0,6		0,3		0,5		76	13,9			0,2	
10-20	0,7		0,3		0,4		67	26,6			0,2	

Notas: ¹ Segundo métodos apresentados por Raij et al. (1987); ² Capacidade de troca catiônica em pH 7,0; ³ Saturação por bases; e ⁴ Saturação por alumínio.

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

A caracterização do biossólido usado no experimento é apresentado na Tabela 3. Trata-se de um resíduo produzido por digestão aeróbica (fase de decantação) e anaeróbica (fase final do biodigestor). Após esta fase, o produto é adensado e higienizado com cal extinta (250 kg t⁻¹ de biossólido) e cloreto férrico (100 kg t⁻¹ de biossólido), e desidratado em prensas hidráulicas.

O biossólido gerado na Estação de Tratamento de Esgoto – ETE de Barueri, região metropolitana de São Paulo, foi classificado como do tipo B (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, 1999), com teor de matéria orgânica em torno de 300 g kg⁻¹ e relação C:N de 4,3, umidade em torno de 60% e pH (em H₂O) igual a 12.

Tabela 3 - Composição química total média do biossólido, base seca a 65°C, tipo B, produzido na Estação de Tratamento de Esgoto - ETE de Barueri-SP

Elemento	Concentração	Elemento	Concentração
C	114,0 (g kg ⁻¹)	S	6,0 (g kg ⁻¹)
N	26,2 (g kg ⁻¹)	Fe	39.200,0 (mg kg ⁻¹)
MO	300,0 (g kg ⁻¹)	Cu	917,0 (mg kg ⁻¹)
Relação C:N	4,3	Zn	1.500,0 (mg kg ⁻¹)
P	9,5 (g kg ⁻¹)	Mn	300,0 (mg kg ⁻¹)
K	1,3 (g kg ⁻¹)	Cd	21,0 (mg kg ⁻¹)
Ca	95,0 (g kg ⁻¹)	Pb	200,0 (mg kg ⁻¹)
Mg	3,0 (g kg ⁻¹)	pH	12,0
Na	0,5 (g kg ⁻¹)	Umidade	60,0 (%)

Fontes: CETESB (1999), Molina (2004) e Guedes (2005)

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com 6 tratamentos e 4 repetições. A espécie utilizada no experimento foi o *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden, procedente de Bounville – Coff's Harbour, Austrália. O plantio com mudas formadas a partir de sementes foi realizado em março de 1998. Cada parcela experimental foi

composta por 100 plantas (10 linhas com 10 plantas em cada linha), com espaçamento 3,0 x 2,0 m, totalizando 600 m² por parcela. Somente as 36 plantas centrais foram consideradas nas avaliações e, as demais, deixadas como bordadura dupla.

Em meados de julho de 1998, o biofóssido foi aplicado com sua umidade original (60%), em faixas de 2 m, sobre a superfície do solo, a uma distância de 0,5 m de cada lado da linha de plantio do eucalipto. Os tratamentos (base seca) foram: **1) Testemunha (Test)** – sem fertilização mineral e sem aplicação de biofóssido; **2) Adubação Química (AQ)** - 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lanço em área total), 110 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo (45% de P₂O₅; aplicado no sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de NPK 10-20-10 (sulco de plantio), 80 kg ha⁻¹ de NPK 20-00-20 (aplicado 45 dias pós-plantio em meia lua ao redor da muda), 180 kg ha⁻¹ de NPK 16-00-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (aplicado 6 meses pós-plantio numa faixa contínua de 40 cm na entrelinha de plantio) e 240 kg ha⁻¹ de NPK 16-00-32 + 0,3% de B + 0,5% de Zn (aplicado 12 meses pós-plantio numa faixa contínua de 40 cm na entrelinha de plantio); **3) 10 t ha⁻¹ de biofóssido, com suplementação de K (10B+K); 4) 10 t ha⁻¹ de biofóssido, com suplementação de K e P (10B+KP); 5) 20 t ha⁻¹ de biofóssido, com suplementação de K (20B+K); e 6) 40 t ha⁻¹ de biofóssido, com suplementação de K (40B+K).**

Os tratamentos 3, 4, 5 e 6 receberam suplementação de K (KCl, 60% de K₂O), até que as quantidades de K contidas no biofóssido somada às do fertilizante potássico ficassem iguais à do tratamento 2 (165 kg ha⁻¹ de K₂O). O tratamento 4 recebeu suplementação de P (superfosfato triplo), de modo que a quantidade de P contida no biofóssido somada ao do fertilizante fosfatado ficasse igual à do tratamento 2 (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

As doses de biofóssido foram calculadas em base seca. Assim, por exemplo, uma dose de 10 t ha⁻¹ (base seca), corresponde a 25 t ha⁻¹ de material com 60% de umidade. A dose máxima de biofóssido aplicada, 40 t ha⁻¹, foi definida em função do seu elevado teor de Ca, resultante do processo de tratamento do esgoto, que poderia causar desequilíbrios nutricionais. Outros fatores, como teor e taxa de mineralização do

N e teores de metais pesados, também foram considerados na determinação das doses aplicadas.

Realizou-se uma capina química, à base de glifosato, um mês após o plantio, e uma roçada manual, treze meses após esta capina. O controle de formigas cortadeiras foi feito pré e pós-implantação do povoamento, com uso de iscas formicidas. Aos 12 meses de idade, foi realizada aplicação do fungicida Bayfidan (2 kg ha^{-1}) para controle de ferrugem.

3.3 Amostragem das árvores

Para a caracterização física, química e anatômica da madeira, selecionaram-se duas árvores por parcela da classe de Diâmetro a Altura do Peito (DAP) predominante e com bom perfil fenotípico: fuste reto, bom aspecto de sanidade e copa uniformemente distribuída. A classe de diâmetro predominante foi estimada em função da maior frequência de indivíduos presentes, quando dispostos numa distribuição normal. Quando predominaram 2 classes de diâmetro por tratamento, foi amostrada uma árvore em cada classe, mantendo-se a quantidade de 2 árvores por parcela. Esse critério de seleção foi adotado com o intuito de selecionar árvores que fossem representativas das respostas dos tratamentos efetuados.

Após a medição dos DAPs, as árvores foram abatidas e, em seguida, medidas as suas alturas total (HT) e comercial (H), sendo esta correspondente ao diâmetro mínimo de 6 cm com casca, diâmetros (D) e comprimento dos segmentos entre os discos (Z). Logo em seguida foram retiradas seções transversais (discos com 4 cm de espessura) a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da H de cada árvore. Portanto, foram amostradas 48 árvores (2 árvores por parcela x 4 blocos x 6 tratamentos).

Em condições de laboratório, a preparação das amostras a partir dos discos ocorreu nas condições seca ao ar (s.a.) com, aproximadamente, 12% de umidade e as

análises químicas e físicas da madeira ocorreram nas condições absolutamente secas (a.s.).

Foram amostrados 5 discos por árvore. Eles tiveram seus diâmetros medidos com e sem cascas (2 medições perpendiculares entre si) imediatamente após o corte, antes que secassem e começassem a rachar. As medidas foram posteriormente utilizadas nos cálculos de seus diâmetros médios, cálculos de densidade básica ao longo do fuste e volume das árvores, determinado segundo o método de Smalian.

Para cada árvore, todos os discos foram descascados, cortados em 4 cunhas de 90° (interceptando a medula). De cada disco, a primeira cunha foi colocada em água até que se saturasse para a determinação da densidade básica da madeira. A segunda cunha foi cortada na forma de palitos, que depois foram agrupados e reduzidos à serragem em moinho tipo wiley. Essa serragem produzida foi classificada em um conjunto de peneiras sob vibração, para a obtenção da fração 40/60 mesh, que é a recomendada para as análises químicas e de poder calorífico da madeira. A terceira cunha foi picada em cavacos para a polpação da madeira e a quarta cunha ficou como reserva, caso houvesse necessidade de repetição de análise.

As amostras foram preparadas para se determinar suas características e propriedades seguindo os métodos preconizados pelas respectivas associações de normas técnicas vigentes nacional e internacionalmente, tais como: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel - ABTCP (1974), Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI (1999) e Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984), bem como por Bataglia et al. (1983) e Malavolta et al. (1997).

As análises físicas, químicas e anatômicas da madeira, bem como a polpação e a análise da polpa foram realizadas nos laboratórios do departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) e no laboratório do departamento de Química do Instituto de Biociências (IB), ambos da Universidade Estadual Paulista (UNESP) do Campus de Botucatu, e no laboratório do departamento

de Ciências Florestais da ESALQ, Universidade de São Paulo (USP), Campus de Piracicaba.

3.4 Caracterização física da madeira

Massa específica básica da madeira

Dos discos coletados e cortados transversalmente (passando pela medula) em 4 cunhas, foi utilizada uma das cunhas, sem qualquer indício de nó, para a determinação da massa específica básica da madeira nas respectivas alturas ao longo do fuste da árvore. Essa determinação foi feita conforme o método da balança hidrostática, norma ABTCP M 14/70 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP, 1974).

Inicialmente as cunhas de madeira foram colocadas numa caixa com água para a saturação completa da madeira. As cunhas imersas em água foram pesadas em balança hidrostática com precisão de 10 mg. Após a remoção da água superficial das cunhas, porém, ainda saturadas, elas foram pesadas na mesma balança e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ até que adquiriram peso constante. A densidade básica de cada cunha foi determinada segundo o método de imersão em água, descrito por Vital (1984).

Massa específica básica média

Para o cálculo da massa específica básica média ou densidade básica média da madeira de cada árvore, calcularam-se os volumes de madeira das toras compreendidas entre dois discos sucessivos e os respectivos pesos secos, expressos pelo produto desses volumes pelas densidades básicas dos discos. A densidade básica média de cada árvore foi então calculada por meio de uma média ponderada, em função da densidade básica de cada cunha, que na verdade representa o disco, e o

respectivo diâmetro do disco sem casca, conforme descrito por Sansígolo e Barreiros (1998)

Poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico dos componentes químicos da madeira, foi utilizada uma amostra composta, formada por uma cunha de cada disco de cada altura de cada árvore, transformada em serragem, em moinho tipo wiley, e classificada na fração 40/60 mesh. Tais determinações seguiram o Manual de Instruções do Calorímetro PARR 1201, norma NBR 8633/84 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984).

O poder calorífico da madeira foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica PARR 1201. O calor desprendido na combustão da amostra foi absorvido pela massa do calorímetro (água + equivalente água). Conhecendo-se a massa de água, o equivalente de água do calorímetro e da bomba, ainda medindo a elevação da temperatura, determinou-se o poder calorífico da madeira conforme Cunha et al. (1989). A quantidade disponibilizada de calor foi obtida pelo produto da massa seca de madeira com o respectivo poder calorífico para cada amostra em kcal kg^{-1} ou cal g^{-1} .

3.5 Caracterização química da madeira

As determinações químicas da madeira foram realizadas de acordo com os métodos das associações Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) e os descritos por Bataglia et al. (1983) e Malavolta et al. (1997).

Os atributos químicos da madeira determinados foram: extrativos totais, lignina Klason insolúvel, lignina Klason solúvel, lignina total, holocelulose, celulose, hemiceluloses, cinzas, macronutrientes e micronutrientes. O teor de extrativos totais da madeira foi determinado conforme a norma ABTCP M3/69 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP, 1974). Com a mesma serragem, porém, livre de extrativos, determinou-se o teor de lignina Klason insolúvel da madeira pelo método apresentado em TAPPI T222 om-83 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 1999). O teor de lignina klason solúvel da madeira foi determinado no filtrado da lignina Klason insolúvel, por meio do método relatado por Goldschmid (1971) e baseado na norma TAPPI T249 cm-85 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 1999). Para cada amostra, pela soma dos teores de lignina insolúvel e solúvel estimou-se o teor de lignina total da madeira.

O teor de holocelulose (celulose + hemiceluloses) da madeira foi determinado, para cada amostra, por meio da diferença entre 100% menos os teores totais de lignina e de extrativos, descrito por Sansígolo e Barreiros (1998).

O teor de celulose da madeira seguiu um método não-convencional, descrito por Wright e Wallis (1998), denominado método do ácido peroxiacético (SANTOS, 2000).

O teor de hemiceluloses da madeira foi calculado pela diferença entre o valor de holocelulose e de celulose determinados anteriormente, como descrito em Sansígolo e Barreiros (1998).

A determinação do teor de cinzas na madeira seguiu o método apresentado em TAPPI T211 om-85 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 1999).

As análises químicas elementares (macro e microelementos) da madeira e folhas foram realizadas após o material ser seco a 65 °C em estufa de ventilação forçada até peso constante, e trituração em moinho tipo Wiley (peneira de 20 mesh = 0,8 mm). O N foi determinado por titulação após digestão em micro-Kjeldhal. Os demais elementos foram determinados após digestão nítricoperclórica: o P por colorimetria; o S por turbidimetria; o Ca, o K, o Mg, o Mn, o Fe, o Cu, o B e o Zn por espectrofotometria de

absorção atômica, conforme descritos em Bataglia et al. (1983) e Malavolta et al. (1997).

3.6 Caracterização anatômica da madeira

As características anatômicas da madeira determinadas foram: comprimento das fibras, largura das fibras, diâmetro dos lumes das fibras e espessura das paredes das fibras. Para a caracterização anatômica da madeira, de cada árvore, foi utilizada uma amostra composta de todos os discos. Cada amostra composta foi obtida por meio do agrupamento de partículas (palitos) com dimensões de aproximadamente 1,0 x 0,1 x 0,2 cm (comprimento x espessura x largura) obtidas manualmente de cunhas retiradas dos discos amostrados nas diferentes alturas de cada árvore. As amostras compostas foram identificadas e separadas em tubos de ensaios e submetidas a um processo de maceração.

O processo de maceração das partículas (palitos) de madeira foi efetuado mediante uma solução de maceração, constituída por uma mistura de ácido acético e peróxido de hidrogênio (1:1), conforme procedimentos descritos por Franklin (1945) modificado, citados em Kraus e Arduin (1997), para a individualização dos elementos anatômicos da madeira.

Assim, para obtenção das dimensões das fibras (espessura da parede, diâmetro do lume, comprimento da fibra e largura da fibra) utilizou-se o programa computacional Axiovision versão 3.1, depois de efetuar uma foto microscópica com aumento de 100 vezes para comprimento e 400 vezes para as demais medições, com uma câmera digital marca AxioCam, modelo MRc, um microscópio marca Axioskop 40 e um microcomputador Pentium.

3.7 Polpação da madeira

A polpação, que visa à separação das fibras da madeira, pode ser definida como um processo de deslignificação. As propriedades determinadas foram: rendimento bruto gravimétrico, número kappa e consumo específico de madeira.

Para a polpação da madeira, foi empregado o processo Kraft-antraquinona, que se caracteriza pela composição do licor de cozimento, cujos agentes de deslignificação são o hidróxido e sulfeto de sódio (Kraft) mais o reagente antraquinona, resultando numa celulose de cor relativamente escura e resistente (SANSÍGOLO; BARREIROS, 1998).

Na polpação da madeira também foram utilizadas amostras compostas, ou seja, foi tomada uma cunha de cada disco, de cada altura e de cada árvore, as quais foram picadas manualmente na forma de cavacos com o uso de facão e martelo. Os cavacos foram agrupados, homogeneizados e separados em quadrantes. De um dos quadrantes foi separada uma quantidade de cavacos (aproximadamente 50 gramas de madeira s. e.) suficiente para encher uma cápsula de aproximadamente 200 cm³, constituída de chapa de aço inoxidável microperfurada. Cada cápsula representou uma amostra composta de apenas uma árvore. A utilização dessas cápsulas permitiu a deslignificação da madeira de todas as árvores, sob uma mesma condição.

As cápsulas foram colocadas em um digestor rotativo laboratorial de 2 a 3 rotações por minuto (rpm), 20 L de capacidade, aquecido eletricamente, dotado de termômetro, manômetro e reostato manual, onde, junto com o licor de cozimento, previamente preparado, se realizou a deslignificação da madeira em condições pré-estabelecidas.

O método utilizado foi o kraft-antraquinona, cujas condições foram estabelecidas como sendo as comumente utilizadas para a madeira de eucalipto, ou seja:

- Álcali ativo¹, base madeira seca = 18,00% como NaOH (14,00% como Na₂O);
- Álcali efetivo² base madeira seca = 15,80% como NaOH (12,25% como Na₂O);
- Sulfidez³ do licor base madeira seca = 25,00%;
- Antraquinona base madeira seca = 0,05%;
- Relação licor/madeira = 4/1;
- Temperatura máxima = 170 °C;
- Tempo até a temperatura máxima = 90 minutos;
- Tempo na temperatura máxima = 60 minutos.

O licor de cozimento foi preparado minutos antes da deslignificação em função da quantidade de madeira s. e., teor de umidade da madeira, percentagem de álcali ativo, sulfidez e da relação licor/madeira.

Após a deslignificação, as amostras de cavacos contidas nas cápsulas foram, separadamente, desfibradas, lavadas com água até a retirada do licor de deslignificação e determinados os respectivos teores de secos para os cálculos do rendimento bruto gravimétrico, consumo específico de madeira e número kappa.

Rendimento bruto gravimétrico é a quantidade em massa de celulose absolutamente seca produzida, baseada na quantidade em massa de madeira absolutamente seca utilizada.

¹ Álcali ativo é a concentração de Hidróxido de Sódio e Sulfeto de Sódio, expressa como Óxido de Sódio.

² Álcali efetivo é a concentração de Hidróxido de Sódio e meio de Sulfeto de Sódio, expressa como Óxido de Sódio.

³ Sulfidez é a relação percentual entre a quantidade de Sulfeto de Sódio, expresso como Óxido de Sódio, e o álcali ativo.

Após a deslignificação, determinou-se o teor absolutamente seco das amostras de polpas segundo a norma TAPPI T 210 OM - 93 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 1999) e o rendimento bruto gravimétrico da polpação. Este foi calculado como a relação percentual entre o peso absolutamente seco de polpa e o peso absolutamente seco de madeira utilizada, para cada amostra, descrito em Sansígolo e Barreiros (1998).

Uma vez determinados a densidade básica média de cada árvore e o correspondente rendimento bruto gravimétrico, pôde-se calcular o consumo específico de madeira em m^3 por tonelada de polpa seca, descrito em Sansígolo e Barreiros (1998).

O número kappa, que se refere à quantidade de lignina residual na polpa, é, por definição, o número de mililitros de uma solução decinormal de permanganato de potássio, consumido por um grama de pasta celulósica s.e., sob certas condições específicas e cuidadosamente controladas. Sua determinação foi efetuada nas amostras de polpas obtidas, conforme descrito em Sansígolo e Barreiros (1998).

3.8 Caracterização dendrométrica das árvores

O volume comercial sem casca de cada árvore foi determinado pela equação geral de Smalian, descrito por Veiga (1984).

A massa seca comercial de cada árvore foi determinada multiplicando-se a densidade básica da árvore pelo seu respectivo volume comercial, ambos calculados anteriormente.

3.9 Análise dos dados

Somente os dados dos tratamentos Test, 10B+K, 20B+K e 40B+K foram usados nas análises de regressão. O programa estatístico utilizado nas análises foi o Sigmaplot (2002).

Os dados foram submetidos ao procedimento “stepwise” de regressão, para seleção dos melhores modelos ajustados. Esta seleção se baseou no valor de p ($p < 10\%$) e no coeficiente de determinação (R^2) de cada equação. Cada variável considerada neste estudo foi estimada, mediante os modelos, com um conjunto de 8 pontos ($n = 8$), e, suas médias foram plotadas com os respectivos desvios padrões.

Os dados dos tratamentos AQ e 10B+KP tiveram seus valores médios plotados em gráficos de barras simples ao lado das equações de regressão ajustadas, também com seus respectivos desvios padrões, para serem analisados em conjunto.

Quando o nível de significância foi significativo ($p < 0,10$), permaneceu, no gráfico, a equação e o coeficiente de determinação (R^2). Quando o valor de p foi não significativo ($p > 0,10$), foi colocado, no gráfico, a indicação $y = n.s.$

As análises de correlações foram determinadas utilizando-se todos os dados (pares de valores) de todos os tratamentos, os quais foram plotados em gráficos, juntamente com as curvas dos modelos selecionados. Correlações muito baixas e/ou não significativas não foram apresentadas graficamente. As demais correlações foram mostradas graficamente, e ajustadas para todos os tratamentos a 95% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produtividade de madeira

A produtividade de madeira apresentou uma relação exponencial com o aumento das doses de lodo de esgoto (biossólido). Os tratamentos que receberam adubação mineral e biossólido com suplementação de adubação potássica e fosfatada apresentaram produção de madeira semelhante às maiores doses de biossólido (Figura 3). A variável volume de madeira apresentou maior relação com o aumento das doses de biossólido do que a massa de madeira. Independentemente desta diferença, o volume e a massa de madeira apresentaram alta correlação entre si (Figura 4). Corroborando esses resultados obtidos com os tratamentos aplicados, Shimoyama e Barrichelo (1989) relataram que o volume de madeira produzido é geralmente superior em árvores adubadas quando comparado às aquelas não adubadas. A mudança no estado nutricional das árvores influencia a atividade da copa, por exemplo, aumentando a superfície das folhas e conseqüentemente a produção de hormônios (SIDDIQUI, 1972). Isso aumenta a taxa de crescimento da planta (CLEVELAND et al., 1974), por conseguinte, o tamanho do fuste.

Figura 3 - Produção de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade em volume (a) e em massa seca (b) nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Figura 4 - Correlação entre o volume e a massa seca de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

O volume e a massa seca de madeira por árvore apresentou alta correlação com o tamanho do tronco, quando expresso pela variável combinada $DAP^2 \cdot H$ (Figura 5).

Figura 5 - Correlação entre o volume (a) e a massa seca (b) de madeira por árvore de *E. grandis* aos cinco anos de idade e a variável combinada $DAP^2 \cdot H$ nos diferentes tratamentos. DAP é o diâmetro médio à altura do peito e H é a altura da árvore até 6 cm de diâmetro

O aumento do volume de madeira proporcionado pela adubação compensou a diminuição da densidade básica (Figura 8a), o que resultou em maior massa seca de madeira, quando se considerou a massa seca total como referência.

4.2 Qualidade da madeira

Atributos físicos

O aumento da dose de biossólido resultou numa resposta exponencial e negativa com a densidade básica da madeira. O coeficiente de determinação da equação obtida foi muito baixo ($R^2 = 0,21$). O tratamento que recebeu adubação química (AQ) e o que recebeu 10 t ha⁻¹ de biossólido mais KP (10B+KP) também apresentaram densidade básica da madeira menor do que a testemunha (Figura 8a). Não houve modificação significativa do poder calorífico da madeira entre os diferentes tratamentos (Figura 8b).

Bamber et al. (1982) não encontraram mudança na densidade básica da madeira de *E. grandis* adubada com N, P, K e S aos 30 meses de idade, cujo valor (0,460 g cm⁻³) foi semelhante ao do tratamento controle deste estudo. Da mesma forma, Andrade et al. (1994) estudando o efeito da adubação nas características físicas da madeira de *E. grandis* com seis anos de idade, não encontraram diferenças significativas na densidade básica da madeira entre árvores adubadas e não adubadas.

Normalmente, a densidade básica da madeira tende a aumentar com a idade, devido à produção de madeira adulta: com maior espessura da parede celular e diminuição do lume e da largura das células (TRUGILHO et al., 1996). Neste estudo, foi observado comportamento inverso, principalmente quanto aos tratamentos que receberam biossólido. Ou seja, a densidade básica diminuiu com o aumento da taxa de crescimento (Figuras 3, 5 e 8). Uma vez que a densidade básica é uma característica resultante, entre outras características, das dimensões celulares (PANSIN; ZEEUW, 1980), neste estudo, tanto a espessura da parede quanto a largura da fibra tenderam a diminuir com aplicação de biossólido. Efeito atribuído ao aumento da taxa de crescimento e a não existência de madeira madura nesta idade (5 anos).

Freddo et al. (1999) encontraram em povoamentos de *E. grandis*, de 5 anos, um valor de densidade básica da madeira (0,438 g cm⁻³) semelhante ao dos tratamentos

AQ e dos que receberam biossólido. Quando os povoamentos são adubados muito jovens, ocorre que a adubação não altera a densidade básica da madeira (MEGRAW, 1985). Segundo este pesquisador, se o N for aplicado no início da formação do povoamento florestal, seu efeito fica restrito à expansão da área foliar, dreno principal de plantas jovens. Nesta fase, a produção de madeira é muito pequena.

Brasil e Ferreira (1971), analisando o comportamento das espécies de *Eucalyptus*, com 5 anos de idade, mais plantadas no estado de São Paulo, concluíram que em regiões com solo mais férteis e povoamentos florestais mais produtivos, a densidade básica da madeira é menor. Comportamento semelhante foi observado por Shimoyama e Barrichelo (1989), onde as árvores tiveram como resposta à adubação um decréscimo na densidade básica da madeira, em consequência de um aumento na porcentagem de lenho inicial. A diminuição da densidade básica encontrada nesses trabalhos possivelmente estava relacionada a menor espessura de parede da fibra em árvores com maior taxa de crescimento.

Estudos realizados com madeiras de clones de *Eucalyptus* das principais empresas florestais brasileiras demonstraram que 40% das madeiras apresentaram densidades básicas acima de $0,500 \text{ g cm}^{-3}$ a maioria apresentou densidade de madeira entre $0,465$ e $0,490 \text{ g cm}^{-3}$ (GOMIDE et al., 2005). Segundo estes pesquisadores, isso indica que as empresas têm priorizado densidades próximas a $0,500 \text{ g cm}^{-3}$, com tendência para densidades ligeiramente inferiores

Quando se considerou todos os tratamentos em conjunto, a densidade básica da madeira só se correlacionou significativamente com a espessura e o lume das fibras da madeira (Figura 6). Com a espessura, a correlação foi linear e positiva ($r = 0,70$; $p < 0,05$); com o lume, linear e negativa ($r = -0,57$; $p < 0,05$). Tais resultados estão de acordo com Shimoyama (1990), segundo o qual a espessura da parede e o lume das fibras são os fatores que mais influenciam na densidade da madeira. Neste estudo, nas árvores em que a adubação diminuiu a espessura da parede, também foi constatada diminuição da densidade básica e aumento do lume, e, nas árvores em que a adubação

aumentou a espessura da parede, a densidade básica aumentou e o lume diminuiu (Figura 6). Comparativamente, as árvores que recebem adubação respondem com aumento no lenho inicial, tendo como consequência o decréscimo da densidade básica (BRITO et al. 1986). O lodo de esgoto diminuiu a densidade básica da madeira o que se constatou está relacionado à diminuição da espessura da parede das fibras (Figuras 6a e 14b).

Figura 6 - Correlação entre a espessura (a) e o lume (b) de fibra e a densidade básica da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

A correlação entre a densidade básica da madeira e o número kappa da polpa foi insignificante ($r = 0,05$; $p < 0,05$). Santos (2000) encontrou coeficiente de correlação significativo ($r = 0,45$; $p < 0,01$) entre estas variáveis para a mesma espécie florestal, porém numa idade maior (7 anos). As árvores deste estudo também apresentaram maior teor de lignina (25,7%), maior densidade básica ($0,447 \text{ g cm}^{-3}$) e maior número kappa. No presente estudo, o número kappa tendeu a valores menores, o que está associado aos menores valores de densidade básica e de lignina. Quanto maior o teor de lignina na madeira, aliado à maior densidade básica, mais difícil será a deslignificação, conseqüentemente, maior será o número kappa (SANTOS, 2000).

A correlação entre o rendimento bruto gravimétrico e a densidade básica da madeira foi baixa e negativa ($r = -0,27$; $p < 0,05$). Mokfienski et al. (2003), Sansígolo e

Santos (2000), Turner et al. (1983) e Valente et al. (1992) não encontraram correlação significativa entre essas variáveis para espécies de *Eucalyptus*. Segundo estes autores, as madeiras mais densas não produzem, necessariamente, maior rendimento em polpa. Assim, tendo em vista a seleção de árvores, quanto à produção de polpa, faz-se necessário pesquisar outras características indicadoras, que se correlacionam com este atributo.

O consumo específico de madeira apresentou média correlação ($r = -0,61$; $p < 0,05$) com a densidade básica da madeira (Figura 7). De acordo com Gomide et al. (2005), o uso de madeiras de baixa densidade básica resulta em maior consumo específico de madeira, o que dificulta a operação industrial, sobretudo, quando há carência no fornecimento de matéria-prima. Com relação ao consumo de reagentes no processo de polpação, os reflexos da densidade básica podem ser diferentes. Lanna et al. (2001) demonstraram vantagens na utilização de madeiras com densidades básicas mais baixas. Tais vantagens corresponderiam à necessidade de utilização de menores cargas alcalinas, com reflexos favoráveis no rendimento e viscosidade da polpa e, também, na carga mais baixa de sólidos para o setor de recuperação de licores.

Figura 7 - Correlação entre o consumo específico de madeira e a densidade básica da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Os resultados deste estudo corroboram a afirmação de Gomide et al. (2005), segundo a qual a densidade da madeira representa o somatório de diversas

características da madeira, e nem sempre é possível estabelecer correlações perfeitas entre os resultados da produção de polpa e essa característica da madeira.

No caso da variável poder calorífico, Vale et al. (2000) obtiveram, num experimento fatorial com aplicação de N, P, K e Ca, valor médio de 4.641 cal g^{-1} de madeira para o *E. grandis* com sete anos de idade: valor superior ao obtido nesta pesquisa. Eles não encontraram diferenças significativas entre os tratamentos. Jara (1989) encontrou 4.790 cal g^{-1} de madeira para o *E. grandis* aos dez anos de idade. Estes estão de acordo com Howard (1973) que cita valores para folhosas entre 4.600 a 4.800 cal g^{-1} de madeira. Os valores encontrados neste estudo foram menores, porém dentro da faixa encontrada por Brito (1993), que cita valores de 3.500 a 5.000 cal g^{-1} de madeira.

Figura 8 - Densidade básica (a) e poder calorífico (b) da madeira das árvores de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

As correlações entre os atributos físicos, químicos e anatômicos e o poder calorífico da madeira foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto as variáveis relacionadas à polpação.

Atributos químicos

Os teores de lignina, de celulose e de extrativos totais da madeira não apresentaram alteração significativa com o aumento das doses de biossólido. Os tratamentos AQ e 10B+KP apresentaram teores de celulose próximos entre si e da testemunha, e maiores do que os tratamentos que receberam 10 a 40 t ha⁻¹ de biossólido. No tratamento que recebeu adubação química, o teor de extrativos totais foi menor do que nas doses 0 a 40 t ha⁻¹ de biossólido (Figura 9).

O aumento da dose de biossólido resultou numa relação quadrática com o teor de hemiceluloses e exponencial com o teor de cinzas da madeira (Figura 9c, e). No primeiro caso, o grau de relação entre as variáveis foi muito baixo ($R^2 = 0,17$), e, no segundo caso, médio ($R^2 = 0,61$). A aplicação de biossólido resultou em aumento dos teores de hemiceluloses e de cinzas da madeira, o que não ocorreu com o tratamento que só recebeu adubação química. O aumento no teor de hemiceluloses parece estar relacionado com a diminuição do teor de celulose, embora não significativa, e, indiretamente, com o aumento no rendimento bruto gravimétrico dado pelo aumento no consumo específico de madeira. O aumento no teor de cinzas está relacionado com a maior absorção de nutrientes, principalmente Ca, nos tratamentos que receberam lodo de esgoto (Figuras 9e, 19d e 21c).

Andrade et al. (1994) também não encontraram diferenças significativas entre os teores de lignina no lenho de *E. grandis* com 6 anos de idade em resposta às adubações fosfatada e, ou, sulfatada e à calagem. Eles encontraram teores ligeiramente superiores de extrativos em resposta à calagem, e, aumentos significativos dos teores de cinzas em resposta à aplicação de fosfato de Araxá (2 t ha⁻¹) e calcário calcítico (2 t ha⁻¹). Ao contrário do observado neste estudo, Haygreen & Bowyer (1982) verificaram que a adubação mineral ocasionou ligeiro aumento no teor de extrativos; e Larson (1968) verificou que a adubação não afetou o teor de cinzas. Jacob e Balloni (1978) verificaram no gênero *Pinus* que a composição química, principalmente o teor de celulose, não respondeu à fertilização.

Figura 9 - Teores de lignina (a), de celulose (b), de hemiceluloses (c), de extrativos (d) e de cinzas (e) da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Os teores de celulose, de hemiceluloses e de extrativos correlacionaram-se, respectivamente, em grau médio ($r = -0,56$; $p < 0,05$), alto ($r = -0,76$; $p < 0,05$) e baixo ($r = 0,42$; $p < 0,05$) com o teor de lignina na madeira (Figura 10). A correlação do teor de lignina com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos.

O teor de extrativos da madeira correlacionou em grau médio ($r = -0,68$; $p < 0,05$) e negativamente com o teor de celulose na madeira (Figura 11). A correlação do teor de celulose com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto às variáveis relacionadas à polpação.

Figura 10 - Correlação entre os teores de celulose (a), de hemiceluloses (b) e de extrativos (c) e o teor de lignina da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 11 - Correlação entre o teor de extrativos e o teor de celulose da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

A espessura do lume das fibras correlacionou em grau médio ($r = 0,52$; $p < 0,05$) com o teor de hemiceluloses na madeira (Figura 12). A correlação do teor de hemiceluloses com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto às variáveis relacionadas à polpação. Wallis et al. (1996) e Amidon (1981) também encontraram em madeiras de *Eucalyptus* uma fraca e negativa correlação entre o rendimento da deslignificação e o teor de hemiceluloses.

Figura 12 - Correlação entre a espessura do lume das fibras e o teor de hemiceluloses da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

De modo geral, os valores encontrados para os teores de lignina, celulose, hemiceluloses e extrativos estão dentro da faixa esperada para o gênero *Eucalyptus* Clarke et al. (1997). Os teores de extrativos totais ficaram abaixo do encontrado por Trugilho (1996), que foi de 3,68%, em *E. saligna* de 4 anos de idade. Gomide et al. (2005) encontraram, em clones de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla* teores que vão desde os encontrados neste estudo até maiores do que os obtido por Trugilho (1996), ou seja, de 1,76 a 4,13%. Os baixos teores encontrados podem ser explicados por se tratarem de árvores jovens (SANTOS; SANSÍGOLO, 2002), com 5 anos de idade. Baixos teores de extrativos tende a ser priorizado pelas empresas nacionais de celulose de eucalipto, pois são substâncias potencialmente formadoras de “pitch” (GOMIDE et al., 2005).

Vital (1990) afirma que a adubação pode ocasionar ligeiro aumento nos teores de lignina e extrativos, e leve redução no teor de celulose da madeira. Neste caso, a adubação química também diminuiu o teor de extrativos, porém, manteve os teores de lignina e celulose.

As correlações entre os atributos físicos, químicos e anatômicos e o teor de extrativos da madeira foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto às variáveis relacionadas à polpação. Raymond e Balodis (1994) também não encontraram correlação significativa entre rendimento gravimétrico e teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus regnans*. Ao contrário deste estudo, Turner et al. (1983) encontraram correlação significativa entre rendimento gravimétrico e extrativos da madeira de *E. globulus* solúveis em água quente. Segundo Gomide et al. (2005), madeiras com maiores teores de extrativos apresentam menor rendimento gravimétrico de polpação, com perdas de até 4% de rendimento, devido exclusivamente à remoção dos extrativos existentes.

Os principais componentes das cinzas de madeira são Ca, K e Mg, sendo que o Ca é o elemento que se apresenta em maior quantidade, chegando até a representar 50% das cinzas (CUTTER; MURPHY, 1978).

Os teores de cinzas encontrados ficaram dentro da faixa considerada normal para o gênero *Eucalyptus*, ou seja, raramente menor que 0,20% ou maior que 1,00% da massa seca de madeira (TSOUMIS, 1991). Porém, Freddo et al. (1999) encontraram para o *E. grandis* de 5 anos de idade maior teor de cinzas na árvore (0,38%), quando comparada com todos os tratamentos deste estudo.

O valor da espessura da parede e do lume das fibras correlacionaram-se, respectivamente, em grau médio ($r = -0,52$; $p < 0,05$) negativamente e baixo ($r = 0,44$; $p < 0,05$) positivamente com o teor de cinzas da madeira (Figura 13). A correlação do teor de cinzas com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto às variáveis relacionadas à polpação.

Figura 13 - Correlação entre a espessura da parede (a) e do lume (b) das fibras e o teor de cinzas da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Atributos anatômicos

O comprimento de fibra da madeira não alterou significativamente com a aplicação de adubação química ou biofósforo, exceto no tratamento em que a aplicação de biofósforo foi suplementada com adubação fosfatada, que teve o comprimento de fibra diminuído (Figura 14a). A largura da fibra se relacionou linear e negativamente, a espessura da parede da fibra se relacionou exponencialmente, e o lume da fibra se

relacionou quadraticamente com o aumento da dose de biossólido (Figura 14). Os coeficientes de determinação foram baixos para a largura de fibra ($R^2 = 0,37$) e lume da fibra ($R^2 = 0,44$) e médio para espessura de parede da fibra ($R^2 = 0,61$). A aplicação de biossólido resultou em diminuição da largura e da espessura de parede, e em aumento da largura do lume da fibra da madeira. Com a aplicação exclusiva de adubação mineral, a largura, a espessura de parede e o lume da fibra ficaram próximos dos verificados na testemunha; a largura e a espessura de parede da fibra ficaram maiores, e o lume da fibra ficou menor do que a dos tratamentos que receberam suplementação potássica. O tratamento 10B+KP apresentou largura de fibra menor que a testemunha e que AQ, e próximo dos tratamentos que receberam biossólido (Figura 14b); a espessura de parede da fibra foi menor do que o da AQ e da testemunha (Figura 14c); o lume foi maior que o da testemunha e do AQ (Figura 14d). Assim, a suplementação de P diminuiu o comprimento e a espessura da parede da fibra, ocasionando aumento do lume.

O conhecimento das características anatômicas dos elementos fibrosos permite que sejam previstas indicações das características de sua polpa e seus papéis. Alguns trabalhos que estudaram o efeito da adubação mineral nas propriedades anatômicas da madeira de eucalipto não produziram resultados consistentes, às vezes até contraditórios quanto às mudanças dos atributos das fibras. Higgs et al. (1973) encontraram decréscimo significativo no comprimento das fibras da madeira de *E. regnans*, enquanto Taylor (1974) encontrou, em árvores de *E. grandis* com taxa de crescimento alta, fibras mais longas em relação às outras espécies de crescimento menor. Por outro lado, Hans e Burley (1972) e Wilkins (1990) não encontraram efeito significativo da fertilização nas propriedades das fibras de *E. grandis*. Bamber et al. (1982) não encontraram mudanças no comprimento, largura e espessura de fibra da madeira de *E. grandis* adubada com N, P, K e S aos 30 meses de idade, cujos valores, respectivamente, 0,82 mm, 13,5 μm e 2,1 μm foram inferiores aos obtidos nos tratamentos deste estudo. Num estudo contemplando os clones mais produtivos de *Eucalyptus* de várias empresas florestadoras do Brasil, Gomide et al. (2005) encontraram maior valor médio de comprimento (0,99 mm) e menor valor médio de

largura (18,2 μm) de fibra em relação aos obtidos neste estudo (Figura 6a e 6b). Segundo esses mesmos autores, tais valores são típicos dos observados no Brasil em madeiras deste gênero.

Figura 14 - Comprimento (a), largura (b), espessura de parede (c) e espessura de lume (d) de fibra da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Gentle et al. (1968) também não encontraram diferenças significativas no comprimento de traqueídes após adubação mineral. Contudo, autores como Mello (1968) e Higgs e Rudman (1973) encontraram redução significativa no comprimento médio das fibras de *E. saligna* e *E. regnans*, respectivamente, após adubação. Semelhantemente a este estudo, Andrade et al. (1994) observaram diferenças significativas na diminuição da espessura e da largura das fibras de *E. grandis* com 6 anos de idade, adubados com calcário calcítico (2 t ha⁻¹), fosfato de Araxá (2 t ha⁻¹) e

gesso (100 g por planta). Mello (1968) verificou pequena redução no comprimento das fibras de *E. saligna*, influenciada pela aplicação de calcário.

Segundo vários autores (WILLIAMS; HAMILTON, 1961; POSEY, 1964; SANTOS et al., 1967 e NICHOLS, 1971), o aumento do ritmo de crescimento em resposta à adubação provoca rápidas divisões transversais das células cambiais iniciais, impedindo seu desenvolvimento total em comprimento. Siddiqui et al. (1972) e Brix e Mitchell (1980) verificaram diminuição da espessura das paredes das fibras de Douglas-fir (*Pseudotsuga* sp), porque as rápidas divisões celulares não permitiram seu espessamento. Assim, o comprimento e a espessura da parede da fibra tende a diminuir em resposta à adubação. Efeito similar foi encontrado no presente estudo.

Polpação

O aumento da dose de biossólido apresentou uma resposta exponencial negativa para o número kappa (NK) e quadrática positiva para o rendimento bruto gravimétrico (RBG), embora com coeficientes de determinação muito baixos, respectivamente, $R^2 = 0,24$ e $R^2 = 0,27$ (Figura 15). Tanto a AQ quanto o tratamento 10B+KP resultaram em valores de NK semelhantes e próximos aos relacionados às doses 10 a 40 t ha⁻¹ de biossólido, e consideravelmente inferiores à testemunha. No caso da variável RBG, os tratamentos AQ e 10B+KP mostraram-se muito superiores à testemunha, e o tratamento 10B+KP foi superior aos tratamentos que só receberam biossólido suplementado com K, enquanto que a AQ apresentou resultado semelhante a estes tratamentos.

De modo geral, todos os tratamentos apresentaram rendimentos superiores a 52%, principalmente o tratamento 10B+KP, que superou os demais, chegando a 60%. As indústrias brasileiras de celulose estabelecem o rendimento gravimétrico de polpação de 50% como o limite inferior (GOMIDE et al., 2005). Esse rendimento elevado pode ser explicado pelas características da madeira, que apresentaram baixos teores de densidade básica (~0,440 g cm⁻³), de extrativos (~2%), de lignina (~24%) e de

cinzas (~0,26%), e, altos teores de celulose (~53%) e hemiceluloses (~22%). Os menores teores de rendimento gravimétrico foram obtidos nos tratamentos que receberam biossólido, o que está associado aos menores teores de celulose e maiores teores de extrativos e cinzas obtidos nesses tratamentos. O aumento do RBG resultante da aplicação do biossólido parece estar associado aos altos teores de hemiceluloses. Tal fato pode ser explicado devido as xilanas não terem sido degradadas durante o processo de polpação, pois a carga alcalina se manteve a mesma em todos os tratamentos. Dentre as hemiceluloses da madeira de eucalipto, as xilanas são as mais importantes (COSTA et al., 2000). Elas são sensíveis ao aumento da carga alcalina o que poderia implicar na diminuição do rendimento, que é comum de acontecer no caso de madeiras folhosas (EK et al., 2001). Santos e Sansígolo (2002) encontraram valor de rendimento bruto gravimétrico médio de 54,87% para árvores jovens de *E. grandis* com seis anos de idade, ou seja, abaixo dos valores encontrados com a aplicação dos tratamentos em questão.

O consumo específico de madeira (CEM) não apresentou relação significativa com o aumento das doses de biossólido; porém, o tratamento 10B+KP diminuiu o CEM abaixo da testemunha e do tratamento AQ (Figura 15c).

Os valores do comprimento e da espessura das fibras da madeira correlacionaram-se, respectivamente, em grau médio ($r = -0,64$; $p < 0,05$) e baixo ($r = -0,42$; $p < 0,05$), ambos negativamente, com o rendimento bruto gravimétrico da polpação (Figura 16). A correlação do rendimento bruto gravimétrico com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos.

A correlação entre a espessura e o rendimento bruto gravimétrico não foi alta (Figura 16b). Ao contrário, Paula (1999) relatou que existe uma correlação positiva entre a espessura da parede e o rendimento em produção de celulose, devido ao maior teor relativo de celulose da parede. Se a fertilização promove aumento no tamanho das células, espera-se diminuição da parede e, conseqüentemente, do rendimento em celulose. No entanto, Siddiqui (1972) que realizou estudos sobre o assunto, salienta

que pode haver pequeno aumento no rendimento gravimétrico ou este permanecer inalterado em função da adubação.

Figura 15 - Número kappa da polpa (a), rendimento bruto gravimétrico da polpação (b) e consumo específico de madeira (c) de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

O valor do consumo específico de madeira para a produção de uma tonelada seca de polpa correlacionou em grau médio ($r = -0,58$; $p < 0,05$) e negativamente com o rendimento bruto gravimétrico (Figura 17). As correlações entre as demais variáveis relacionadas à polpação e o rendimento bruto gravimétrico foram muito baixas ou não significativas.

Figura 16 - Correlação entre o comprimento (a) e a espessura (b) das fibras e o rendimento bruto gravimétrico da polpação da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

As correlações entre os atributos físicos, químicos e anatômicos da madeira e o número kappa da polpa foram muito baixos ou não significativos. O mesmo foi observado quanto as variáveis relacionadas à polpação.

Figura 17 - Correlação entre o consumo específico de madeira e o rendimento bruto gravimétrico da polpação de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

O valor do comprimento das fibras da madeira correlacionou em grau médio ($r = 0,51$; $p < 0,05$) e positivamente com o consumo específico de madeira (Figura 18). A correlação do consumo específico de madeira com os demais atributos da madeira foram muito baixos ou não significativos.

Figura 18 - Correlação entre o comprimento das fibras e o consumo específico de madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

4.3 Concentração de nutrientes na madeira

Os teores de N, Mg e S da madeira não apresentaram alteração significativa com o aumento da dose de biossólido. Por outro lado, o aumento da dose de biossólido resultou numa relação exponencial positiva com os teores de P, K e Ca (Figura 19). No caso do P, o grau de relação entre as variáveis foi muito baixo ($R^2 = 0,34$), e, nos outros casos, foram baixo para o K ($R^2 = 0,52$) e médio a alto para o Ca ($R^2 = 0,79$). A aplicação de biossólido tendeu a aumentar o teor de P, e, principalmente, de Ca e de K. Com a aplicação exclusiva da adubação química, os teores de P e de Ca ficaram próximos dos verificados na testemunha e menores que os obtidos com o aumento da dose de biossólido; e, o teor de K ficou próximo aos obtidos com os tratamentos 10 e 20 t ha⁻¹ de biossólido. O tratamento 10B+KP apresentou teor de P maior, e teores de K e Ca próximos das maiores doses de biossólido aplicadas. Freddo et al. (1999) encontraram para o *E. grandis* maiores valores de K (0,823 g kg⁻¹) e Mg (0,182 g kg⁻¹), e menor valor de Ca (0,541 g kg⁻¹).

Figura 19 - Teores de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Os teores de B, Fe e Cu da madeira não apresentaram alteração significativa com o aumento da dose de biossólido. Os teores de Mn e Zn da madeira se relacionaram exponencial e negativamente com o aumento da dose de biossólido (Figura 20). A melhor relação foi obtida para o Mn, que apresentou alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,87$), enquanto o Zn apresentou baixo coeficiente de determinação

($R^2 = 0,27$). A diminuição do teor de Mn com o aumento da dose de biossólido resultou em valores menores do que os da testemunha, AQ e 10B+KP. Para o Zn, os baixos valores resultantes com o aumento da dose de biossólido ficaram bem menor do que o da testemunha, próximo do AQ e maior do que o do 10+KP. Freddo et al. (1999) encontraram para o *E. grandis* de mesma idade maior valor de Mn ($16,60 \text{ mg kg}^{-1}$), menor valor de Fe ($3,52 \text{ mg kg}^{-1}$) e semelhante valor de Cu ($1,11 \text{ mg kg}^{-1}$).

Figura 20 - Teores de B (a), Mn (b), Zn (c), Fe (d) e Cu (e) da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Cutter e Murphy (1978) relataram que em muitas madeiras o Ca é o elemento que se apresenta em maior quantidade, representando até 50% das cinzas, seguido, respectivamente, pelo K, Mg, Mn, Na, P e outros. Entre esses nutrientes, o que geralmente se apresenta em grande quantidade na madeira é o Mn, o qual afeta desfavoravelmente o branqueamento da polpa resultante. Este elemento aumenta a decomposição de reagentes, como o peróxido de hidrogênio, e diminui a viscosidade e a resistência da polpa (JOHNSON, 2001). Allison et al. (2000), estudando os elementos que são introduzidos dentro do processo de polpação em amostras de madeiras de coníferas e folhosas, encontraram a concentração relativa: $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Na} > \text{Fe}$. O Ca e o Mg se encontram concentrados na membrana plasmática entre as fibras. Estes e outros minerais encontram-se também incorporados na parede celular, depositados no lume das células parenquimáticas e fibras. Suas formas são diversificadas: carbonatos, oxalatos ou silicatos. Os elementos que mais preocupam o processo de polpação são aqueles mais solúveis e, que podem acumular no licor, tais como Al, Si, Cl e K, e, no ciclo de cal, como P e Mg (ULMGREN et al., 1999). Ljunggren e Johansson (1994) relataram que, principalmente Fe, Mn e Cu têm forte influência sobre os processos de branqueamento da celulose, principalmente aqueles que usam peróxido de hidrogênio ou oxigênio, pois estes reagentes são oxidados ou reduzidos, afetando a qualidade da polpa quanto à sua resistência. A diminuição dos elementos de transição (Fe, Mn, Cu e Zn) com a aplicação da adubação é um fator favorável, visto que implicará no menor consumo de reagentes durante o branqueamento da polpa.

4.4 Concentração de nutrientes na folha

O teor de S não apresentou alteração significativa com o aumento das doses de biossólido (Figura 21e). O tratamento AQ apresentou teor de S próximo dos que receberam biossólido e inferior à testemunha. O tratamento 10B+KP foi o que apresentou o mais baixo teor de S em relação aos demais. O aumento das doses de biossólido apresentou respostas positivas para alguns nutrientes, sendo linear para o N (Figura 21a) e exponencial para o P (Figura 21b). Contudo, os graus de determinação foram muito baixos, respectivamente, $R^2 = 0,23$ e $R^2 = 0,34$. O Ca (Figura 21c) e o Mg

(Figura 21d) responderam exponencialmente às doses de biossólido. No primeiro caso, a relação entre as variáveis foi positiva e com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,85$), e, no segundo caso a relação foi negativa e com baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,48$). A aplicação de biossólido tendeu a aumentar os teores de N e de Ca, o que não ocorreu com os tratamentos que receberam adubação química e 10B+KP. A suplementação com P em 10B+KP aumentou o teor deste nutriente na folha acima dos teores obtidos com o aumento das doses de biossólido aplicadas. Enquanto em AQ o teor de Mg na folha ficou bem acima dos teores obtidos nos tratamentos que receberam lodo de esgoto. O aumento das doses de biossólido elevou o teor de Ca na folha bem acima dos tratamentos testemunha, AQ e 10B+KP. No caso do Mg, este teve seu teor reduzido bem abaixo do obtido pelos tratamentos testemunha e AQ, e igualmente aquele obtido pelo 10B+KP.

O aumento das doses de biossólido resultou em respostas negativa e quadrática para o Mn foliar (Figura 22a), e positiva e exponencial para o Zn (Figura 22b). Os coeficientes de determinação encontrados foram alto para o Mn ($R^2 = 0,84$) e baixo para o Zn ($R^2 = 0,32$). Os teores de Mn nos tratamentos que receberam biossólido foi menor do que o da testemunha e próximo dos obtidos em AQ e 10B+KP. Ao contrário, o teor de Zn foliar teve seu teor aumentado bem acima do obtido pelos tratamentos testemunha, 10B+K, AQ e 10B+KP. Este efeito também foi verificado por Rocha & Gonçalves (2004), na mesma área experimental, numa fase mais jovem do povoamento florestal. O maior teor foliar de Zn está diretamente relacionado ao aumento dos teores de Zn disponível no solo nos tratamentos que receberam lodo de esgoto, pois esta é uma fonte rica deste micronutriente.

Apesar da grande variação de valores (Figuras 21 e 22), os teores foliares de macro e de micronutrientes nos tratamentos que receberam lodo de esgoto e adubos ficaram dentro da faixa de suficiência (SILVEIRA et al., 2000).

Figura 21 - Teores de N (a), P (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

Figura 22 - Teores de Mn (a) e Zn (b) na folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos. As barras junto às médias são os desvios padrões

4.5 Relação entre qualidade da madeira e teor de nutrientes na madeira e na folha

As correlações entre os teores de macro e micronutrientes na madeira e a produtividade, os atributos físicos, o número kappa, o rendimento bruto gravimétrico e o consumo específico de madeira foram muito baixos e não significativos. Quanto aos atributos químicos e anatômicos, apenas a lignina (Figura 23) e o lume (Figura 24) da fibra correlacionaram-se, respectivamente, alta ($r = 0,90$; $p < 0,05$) e medianamente ($r = -0,56$; $p < 0,05$) com o teor de N da madeira; o teor de cinzas (Figura 25) correlacionou-se medianamente ($r = 0,51$; $p < 0,05$) com o teor de Ca da madeira; o número kappa da polpa (Figura 26) correlacionou-se medianamente ($r = -0,50$; $p < 0,05$) com o teor de S da madeira; e a espessura da fibra (Figura 27) correlacionou-se medianamente ($r = 0,51$; $p < 0,05$) com o teor de Fe da madeira.

Segundo Moraes et al. (2005), a lignina é uma substância química que confere rigidez à parede celular e atua como um composto de ligação da celulose e de polioses, gerando uma estrutura resistente a impacto, compressão e dobra. Estes autores relatam que os teores de lignina apresentam alta correlação como os teores de grupos metoxilas, de C, de H e de N, elementos precursores dessa molécula.

Figura 23 - Correlação entre o teor de lignina da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade com o teor de N da madeira nos diferentes tratamentos

Figura 24 - Correlação entre espessura de lume de fibra e o teor de N da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 25 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira com o teor de Ca da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 26 - Correlação entre o número kappa da polpa e o teor de S da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 27 - Correlação entre espessura de parede de fibra e o teor de Fe da madeira de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

As correlações entre os teores de macro e micronutrientes da folha e a produtividade, os atributos físicos, o número kappa, o rendimento bruto gravimétrico e o consumo específico de madeira foram muito baixos e não significativos. Dentre os atributos químicos, apenas o teor de cinzas da madeira (Figura 28) correlacionou-se medianamente ($r = 0,60$; $p < 0,05$ e $r = 0,56$; $p < 0,05$) com os teores de Ca e Mg na folha, respectivamente (Figuras 28 e 30).

Figura 28 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira e o teor de Ca da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Quanto aos atributos anatômicos, as correlações entre os teores de Ca foliar e os valores de largura e de espessura de fibra da madeira apresentaram média correlação, respectivamente, $r = -0,65$ ($p < 0,05$) e $r = -0,64$ ($p < 0,05$) (Figura 29); a espessura da parede da fibra (Figura 31) correlacionou-se medianamente ($r = 0,62$; $p < 0,05$) com o teor de Mg na folha; a espessura do lume da fibra (Figura 32) correlacionou-se medianamente ($r = 0,65$; $p < 0,05$) com o teor de S na folha; a massa de madeira (Figura 33) correlacionou-se medianamente ($r = -0,56$; $p < 0,05$) com o teor de Mn na folha; a largura da fibra (Figura 34) correlacionou-se medianamente ($r = 0,70$; $p < 0,05$) com o teor de Mn na folha; a largura e a espessura de fibra (Figura 35) correlacionaram-se medianamente com o teor de Zn foliar, respectivamente, $r = -0,60$ ($p < 0,05$) e $r = -0,66$ ($p < 0,05$).

Figura 29 - Correlação entre a largura (a) e a espessura (b) de fibra da madeira e o teor de Ca da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 30 - Correlação entre o teor de cinzas da madeira e o teor de Mg da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 31 - Correlação entre espessura de parede de fibra da madeira e o teor de Mg da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 32 - Correlação entre espessura de lume de fibra da madeira e o teor de S da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 33 - Correlação entre o volume (a) e a massa (b) da madeira e o teor de Mn da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 34 - Correlação entre largura de fibra da madeira e o teor de Mn da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

Figura 35 - Correlação entre a largura (a) e a espessura (b) de fibra da madeira e o teor de Zn da folha de *E. grandis* aos cinco anos de idade nos diferentes tratamentos

5 CONCLUSÕES

O lodo de esgoto diminuiu a densidade básica da madeira, bem como a espessura da parede das fibras. O decréscimo de densidade básica da madeira, promovido pela adubação com lodo de esgoto, foi compensado pelo aumento da produtividade de madeira.

O rendimento bruto gravimétrico da polpação aumentou e o número kappa diminuiu com a aplicação de lodo de esgoto.

O teor de celulose, bem como o poder calorífico da madeira não foram modificados com a aplicação de lodo de esgoto.

O lodo de esgoto diminuiu o teor de elementos de transição (Mn, Fe, Cu e Zn) na madeira, o que, conseqüentemente, implicará em menor consumo de reagentes durante o branqueamento da polpa.

REFERÊNCIAS

ALLISON, L.; RAGAUSKAS, A.J.; HSIEH, J.S. Metal profiling of southeastern U. S. softwood and hardwood furnish. **Tappi**, Atlanta, v. 83, n. 8, p. 97, Aug. 2000.

AMIDON, T.E. Effect of the wood properties of hardwoods on Kraft paper properties. **Tappi**, Atlanta, v. 64, n. 3, p. 123-126, Mar. 1981.

ANDRADE, A.M. de; VITAL, B.R.; BARROS, N.F. de; DELLA LUCIA, R.M.; CAMPOS, J.C.C.; VALENTE, D.F. Efeitos da fertilização mineral e da calagem do solo na produção e na qualidade da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 18, n. 1, p. 69-78, 1994.

ANDREOLI, C.V.; FERNANDES, F.; LARA, A.I.; BONET, B.; DOMAZAK, S.C. A reciclagem agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná. In: WORKSHOP SUL-AMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORÍGEN FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA-CNPQ/IBAMA/Universidade Federal do Paraná, 1997. p. 83-104.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas NBR 8633**. Brasília, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Métodos de ensaio**. São Paulo, 1974.

BALLONI, E.A. **Efeitos da fertilização mineral sobre o desenvolvimento do *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* (Guiseb) Barret e Golfari em solo cerrado do Estado de São Paulo**. 1984. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

BAMBER, R.K.; HORNE, R.; GRAHAM-HIGGS, A. Effect of fast growth on the properties of *E. grandis*. **Australian Forest Research**, Camberra, v. 12, n. 2, p. 163-167, 1982.

BARRICHELO, L.E.G. Densidade básica e características da fibra de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, [S.l.]. **Anais...** [S.l.:s.n.], 1983. p. 123-125.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; COUTO, H.T.Z.; CAMPINHOS JUNIOR, E. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento em celulose de madeiras de *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 32, p. 802-808, set. 1983.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: IAC, 1983. 48 p. (IAC. Boletim Técnico, 78).

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 187-192, 1989.

BEVACQUA, R.F.; MELLANO, V.J. Cumulative effects of sludge compost on crop yields and soil properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 395-406, 1994.

BORDER, B.E.; WIL, R.E.; MARKEWITZ, D.; CLARK, A.; HENDRICK, R.; TESKEY, R.O.; ZHANG, Y. Effect of complete competition control and annual fertilization on stem growth and canopy relations for a chronosequence of loblolly pine plantations in the lower coastal plain of Georgia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 21-37, Apr. 2004.

BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., *E. Alba* Reinw e *E. grandis* Hill ex Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 129-149, 1971.

BRAZIER, J.D. The effect of Forest practices on quality of the harvested crop. **Forestry Commission**, Edinburgh, v. 50, p. 49-66, 1977.

BRITO, J.O. **Influência da adubação mineral nas características dos anéis de crescimento da madeira de *Pinus caribaea* var. *bahamensis***. 1985. 113 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7.; 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS, SBEF, 1993. p. 280-282.

BRITO, J.O.; FERRAZ, E.S.B.; BARRICHELO, L.E.G.; COUTO, H.T.Z. A adubação mineral e seus efeitos sobre os anéis de crescimento da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 32, p. 5-17, 1986.

BRIX, H.; MITCHELL, A.K. Effects of thinning and nitrogen fertilization on xylem development in Douglas Fir. **Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 10, p. 121-28, 1980.

CLARKE, C.R.E.; GARBUTT, D.C.F.; PEARCE, J. Growth and wood properties of provenances and trees of nine Eucalypt species. **Appita**, Melbourne, v. 50, n. 2, p. 121-130, Mar. 1997.

CLEVELAND, M.K.; WOOTEN, T.E.; SAUCIER, J.K. **Annotated bibliography on the effects of fertilization on wood quality**. South Carolina: Clemson University – Department of Forestry, 1974. 53 p. (Forest Research Series, 29).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas**: critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999. 35 p. (Manual Técnico, norma P230).

COSTA, M.M.; FONSECA, M.J.O.; PIMENTA, D.L.; COLODETTE, J.L. Branqueamento ECF de baixo investimento para a produção de 1 milhão ADT/ano na CENIBRA. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL - CIADICYP, 1., 2000, Iguazú. **Trabalhos ...** Iguazú, 2000. 1 CD-ROM.

CROMER, R.N.; BALODIS, V.; CAMERON, D.; GARLAND, C.P.; RANCE, S.; RYAN, P. *Eucalyptus grandis* fertilizer trials: growth, wood properties and kraft pulp yield. **Appita**, Melbourne, v. 51, n. 1, p. 45-49, Jan. 1998.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I.A.; CABRAL, M.T.F.D.; NETO, Z.B.C.; BARBOSA, A.P. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1989, São Carlos. **Anais ...** São Carlos: USP, 1989. v. 2, p. 93-120.

CUTTER, B.E.; MURPHY, W.K. Effects of potassium on growth and wood anatomy of *Populus hybrid*. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 9, n. 4, p. 282-288, 1978.

D'ALMEIDA, M.L.O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: _____. **Tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v.1, cap.3, p. 45-106.

DINWOODIE, J.M. The relationship between fiber morphology and paper properties: a review of literature. **TAPPI**, Atlanta, v. 48, n. 8, p. 440-446, 1965.

DOAT, J. Le puouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, Nancy, Fr, n. 172, p. 33-48, 1977.

DOWNES, G.; TURVEY, N.D. Reduced lignification in *Pinus radiata* D.Don. **Australian Forest Research**, Camberra, v. 16, n. 4, p. 317-377, 1986.

DUNISCH, O.; BAUCH, J.; MULLER, M.; GREIS, O. Subcellular quantitative determination of K and Ca in phloem, cambium and xylem cells of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) during earlywood and latewood formation. **Holzforschung**, München, v. 52, n. 6, p. 582-588, 1998.

EK, M.; GUSTAVSSON, C.; KADIRIC, J.; TEDER, A. Formation and dissolution/degradation of hexenuronic acids during kraft pulping of *Eucalyptus globules*. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF LIGNIN AND OTHER WOOD COMPONENTS, 7., 2001, Belo Horizonte. **Proceedings ...** Belo Horizonte: UFV, 2001. p. 99-106.

EKLUND, L.; ELIASSON, L. Effects of calcium ion concentrations on cell wall synthesis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 41, n. 228, p. 863-867, 1990.

ERICKSON, H.D.; ARIMA, T. Douglas-fir wood quality studies. Part II: Effects of age and stimulated growth on fibril angle and chemical constituents. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 8, p. 255-265, 1974.

ERICKSON, H.D.; HARRISON, A.T. Douglas-fir wood quality studies. Part I: Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 8, p. 207-226, 1974.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blücher; EDUSP, 1974. 293 p.

FARIA, L.C.; RODRIGUEZ, L.C.E. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: avaliação do potencial de uso do resíduo da ETE de Barueri, SP. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaquariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 12, p. 209-213.

FENGEL, D.; WEGENER, O. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Walter de Gruyter, 1984. 613 p.

FERNANDES, F.; ANDREOLI, C.V. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96 p.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. **Boletim Técnico ABTCP**, São Paulo, v.13, p.28-33, 1975.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 53, n. 5, p. 35-40, maio 1992.

FONSECA, S.M.; OLIVEIRA, R.C.; SILVEIRA, P.N. Seleção da árvore industrial. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 69-85, jan. 1996.

FREDDO, A.; FOELKEL, C.E.B.; FRIZZO, S.M.B.; SILVA, M.C.M. Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose Kraft branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 193-209, 1999.

GAUCH, H.G. **Inorganic plant nutrition**. Stroudsburg: Dowden Hutchinson, 1972. 488p.

GENTLE, S.W.; BAMBER, R.K.; HUMPHREYS, F.R. Effect of two phosphate fertilizers on yield, financial yield and wood quality of radiata pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 14, p. 282-286, 1968.

GLASSER, W.G.; KELLEY, S.S. Light stability of polymers: lignin. In: MARK, H. F. (Ed.). **Encyclopedia of polymer science and engineering**. New York: J. Wiley, 1987. v. 8, p. 795-852.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWING, C.H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. cap. 6, p. 241-298.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. de; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan./fev. 2005.

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

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.

GOODWIN-BAILEY, C.J. **Relationship between anatomical and end use properties of the wood of selected tropical pines**. Oxford: Oxford Forestry Institute, 1989. 184p.

GRAY, R.L.; ZEEUW, C. Effects of potassium fertilizer on the wood density and related anatomical characteristics of Red Pine wood. In: NORTHEASTERN FOREST TREE IMPROVEMENT CONFERENCE, 22., 1974, Durham. **Proceedings ...** Durham: NEFES, 1975. p. 72-110.

GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GUEDES, M.C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (Biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 168 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GUEDES, M.C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 188-201, jun. 2003.

HAGNER, S.O. **Fertilization as a production factor in industrial forestry**. Vancouver: University Brit. Columbia, 1967. 43 p. (McMillan Lectureship Series).

HANS, A.S.; BURLEY, J. Wood quality of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden in a fertilizer trial at Siamambo Zambia. **African Agricultural Forestry**, Petroria, v. 38, p. 340-346, 1972.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. Ames: Iowa State University, 1982. 459p.

HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HARRISON, R.B. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Pack Forest Sludge Research Program. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 66, p. 137-149, 1994.

HIGGS, M.L.; RUDMAN, P. The effects of fertilising and thinning on wood properties of *E. regnans*. **Appita**, Melbourne, v. 27, n. 1, p. 51-55, 1973.

HOWARD, E.T. Heat of combustion of various southern pine materials. **Wood Science**, Madison, v. 5, p. 194-197, 1973.

HUDSON, I.; WILSON, L.; BEVEREN, K. van. Vessel and fibre property variation in *Eucalyptus globules* and *E. nitens*: some preliminary results. **IAWA**, Leiden, v. 19, n. 2, p. 111-130, 1998.

JACOB, W.S.; BALLONI, E.A. Efeitos da fertilização na qualidade da Madeira. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-12, 1978.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: IPI, 1989. 6 p. (IPI. Comunicação Técnica, 1797).

JAYAWICKRAMA, K.J.; BRACHER, G.; HOWE, G.T. Genetic improvement of wood quality in coastal douglas fir and western hemlock. In: PACIFIC NORTHWEST TREE IMPROVEMENT RESEARCH COOPERATIVE, 2002, Corvallis. **Proceedings ...** Corvallis: DFS/OSU, 2002. p. 82-86.

JIAN JU, L.; CAO, L.; LIN, J.A.; SHANHUA, W.; LUO, J.J.; YANG, J.L.; WEI, S.H. Effects of fertilization treatments on contents of wood chemical components of *Eucalyptus urophylla*. **Scientia-Silvae Sinicae**, Beijing, v. 34, n. 5, p. 96-102, 1998.

JOHNSON, T. Manganese: a controllable NPE. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 84, n. 5, p. 35, May 2001.

JOZSA, L.A.; BRIX, H. The effects of fertilization and thinning on wood quality of a 24 year old Douglas-fir stand. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 19, n. 9, p. 1137-1145, 1989.

KELLOG, R.M. Relations between cell-wall composition and cell-wall density. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 7, p. 170-177, 1975.

KLEM, G. Quality of wood from fertilized forests. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 51, n. 11, p. 99-102, 1968.

KRAUS, J.E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Seropédica: Edur, 1997. 198p.

LANNA, A.E. Maximizing pulp yield potential of Cenibra's wood supply. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF LIGNINS AND OTHER WOOD COMPONENTS. 7., 2001, Belo Horizonte. **Proceedings ...** Belo Horizonte: UFV, 2001. p.159-167.

LARSON, P.R. Assessing wood quality of fertilized coniferous tree. In: FOREST FERTILIZATION THEORY AND PRACTICE, 1967, Gainesville. **Proceedings ...** Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority, 1968. p. 275-280.

LIMA, I.L. de. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. 2005. 137 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LJUNGGREN, S.; JOHANSSON, E. The kinetics of lignin reactions during oxygen bleaching: The reactivities of different lignin model compounds and the influence of metal-ions on the rate of degradation. **Journal of Wood Chemical Technology**, Syracuse, v. 14, n. 4, p. 507-525, 1994.

MAEGLIN, R.R.; HALLOCK, H.; FRESSE, F.; MCDONALD, K.A. **Effect of nitrogen fertilization on black walnut growth, log quality and wood anatomy**. Madison: Forest Products Laboratory, 1977. 11p. (Research Paper FLP 294).

MALAVOLTA, E. **Elementos da nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, E.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas (princípios e aplicações)**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E.; HAAG, H.P.; SARRUGE, J.R.; VENCOVSKY, R.; VALSECCHI, O.; SANTOS, C.L.O. The relation of the concentration of nitrogen, phosphorus and potassium in the substrate and in the foliage to cell wall thickness and cellulose concentration in the xylem of Slash Pine. **Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 1, p. 173-186, 1966.

MARTINS, L.F.S.; POGGIANI, F.; OLIVEIRA, R.F.; GUEDES, M.C.; GONÇALVES, J.L. M. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de bioossólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 207-218, jun. 2004.

MEGRAW, R.A. **Wood quality factors in Loblolly pine**. Atlanta: Tappi Press, 1985. 102 p.

MELLO, H.A. **Aspectos do emprego de fertilizantes minerais no reflorestamento de solos de cerrado do Estado de São Paulo, com *E. saligna***. 1968. 176 p. Tese (Doutorado em Silvicultura) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

MIRANDA, I; PEREIRA, H. The variation of chemical composition and pulping yield with age growth factors in young *Eucalyptus globules*. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 140-145, 2002.

MOKFIENSKI, A. Importância da densidade e do teor de carboidratos totais da madeira de eucalipto no desempenho da linha de fibras. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO, 2003, Viçosa. **Colóquio...** Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, 2003. p. 15-38.

MOLINA, M.V. **Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinqüenta e cinco meses após a aplicação de bio sólido**. 2004. 66 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MORAIS, S.A.L. de; NASCIMENTO, E.A. do; MELO, D.C. de. Chemical analysis of the Pinus oocarpa wood: characterization of the milled wood lignin. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 471-478, 2005.

NEVES, J.C.L.; LEITE, R.A.; NOVAES, R.F.; BARROS, N.F. Efeito do alumínio em solução nutritiva no crescimento e absorção de nutrientes por *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, n. 1, p. 1-16, 1982.

NICHOLS, J.W.P. The effect of environment on wood characteristics. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 20, n. 3, p. 67-73, 1971.

PANSHIN, A.J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**: structure, identification, uses and properties of the commercial woods of the United States and Canada. 3.ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970. 705 p.

PANSHIN, A.J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**. 3th ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PAULA, J.E. Caracterização anatômica de madeiras nativas do cerrado com vistas à produção de madeira. **Revista Cerne**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 26-40, 1999.

PEREIRA, H.; ALMEIDA, M.H.; TOMÉ, M.; PEREIRA, J.S. *Eucalyptus globulus* plantations: genetic, silvicultural and environmental control of fibre yield and quality. In: POTTS, B.M.; BORRALHO, N.M.G.; REID, J.B.; CROMER, P.N.; TIBBITS, W.N.; RAYMOND, C.A. (Ed.). **Eucalypt plantations: improving fibre yield and quality**. Hobart: CRC for temperate hardwood forestry, 1995. p. 46-48.

PHILLIPS, R.; FISHER, J.T.; MEXAL, J.G. Fuelwood production utilizing *Pinus eldarica* and sewage sludge fertilizer. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 16, p. 95-102, 1986.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantations for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIGE, K.G.; CROWE, M.P.; OLD, K.M. (Ed.). **Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species**. Calligwood: CSIRO, 1996. p. 100-109.

POSEY, C.E. **The effects of fertilization upon wood properties of loblolly pine (*Pinus taeda* L.)**. Raleigh: School of Forestry, 1964. 62 p. (Technical Report, 22).

PUNCHES, J.; COUNTRY, D. **Tree growth, forest management and their implications for wood quality**. Roseburg: Pacific Northwest Extension Publication, Sep. 2004. p. 245-253.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RAYMOND, C.A. **Wood properties, silviculture and growth: a review of published literature for eucalypts**. Hobart: Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, 1998. 18 p. (Technical Report, 6).

RAYMOND, C.A.; BALODIS, V. Hot water extract and pulp yield in provenances of *Eucalyptus regnans*. **Appita**, Melbourne, v. 47, n. 2, p. 159-162, mar. 1994.

RAYMOND, C.A.; MUNERI, A. Effect of fertilizer on wood properties of *Eucalyptus globules*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 1, n. 30, p. 136-144, 2000.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. de. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 267-273, mar./abr. 2004.

ROCHA, G.N. **Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2002. 48p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ROCHA, G.N. da; GONÇALVES, J.L.M.; MOURA, I.M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.3, p. 340-357, 2004.

ROQUE, R.A.M. **Efecto de la fertilización de la pradera y manejo intensivo sobre la flexión estática y algunas propiedades de la madera de *Pinus radiata* D. Don de 16 años**. 2000. 127 p. Tesis (Magister en Ciencias Forestales) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile, 2000.

SANSÍGOLO, C.A. **Deslignificação em metanol-água de *Eucalyptus globulus*, Labill:** características da lignina e da polpa. 1994. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

SANSÍGOLO, C.A. **Seleção de árvores matrizes para a produção de polpa Kraft-aq.** 2000. 157 p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

SANSÍGOLO, C.A.; BARREIROS, R.M. Qualidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de celulose kraft. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31., São Paulo, 1998. **Anais ...** São Paulo: ABTCP, 1998. p. 417-429.

SANSÍGOLO, C.A.; SANTOS, C.R. Métodos não convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-aq. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP-TAPPI, 33., São Paulo, 2000. **Anais ...** São Paulo: ABTCP; TAPPI, 2000. p. 147-159.

SANTOS, C.R. dos. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-aq.** 2000. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, C.F.O.; MALAVOLTA, E.; HAAG, H.P. The effect of concentrations of the majors nutrients N, P and K on the increase in thickness of the tracheid walls of *Pinus elliotii* (pot plants). **Boletim Técnico IPEF**, Piracicaba, v. 24, p. 317-322, 1967.

SANTOS, S.R.; SANSÍGOLO C.A. Deslignificação e resistências de polpas obtidas pelos processos kraft, kraft-aq, soda-aq e soda de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL - CIADICYP, 2., 2002, Campinas, São Paulo, Brasil. **Trabalhos ...** Campinas, 2002. 1 CD-ROM.

SGARBI, F.; SILVEIRA, R.L.V.A.; BRITO, J.O. Características químicas, físicas e dimensões das fibras da madeira juvenil de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivado na omissão de macronutrientes e boro em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 323-331, jul./set. 2000.

SHEPARD, R.K. Jr. Fertilization effects on specific gravity and diameter growth of red spruce (*Picea abies*). **Wood Science**, Madison, v. 14, n. 3, p. 138-144, 1982.

SHEPARD, R.K. Jr.; SHOTTAFER, J.E. Effects of fertilization on specific gravity and grown rate of red spruce (*Picea rubens* Sarg.). **Wood Science**, Madison, v. 12, n. 2, p. 100-102, 1979.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira de *Eucalyptus* spp.** 1990. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Importância da adubação na qualidade da madeira e celulose. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DE PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1., 1989, Ilha Solteira. **Anais ... Ilha Solteira: UNESP**, 1989. p. 61-76.

SIDDIQUI, K.M. **Influence of fertilizations on the ultra structure and chemical composition of wood.** Syracuse:[s.n.], 1972. 151 p.

SIGMAPLOT software. Version 8 ed. Chicago: SPSS, 2002.

SILVA JÚNIOR, F.G. da; BRAGA, E. P. Potencial da seleção precoce do *Pinus taeda* em função da qualidade da madeira destinada à produção de celulose. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 30., 1997, São Paulo. **Anais ... São Paulo: ABTCP**, 1997. p. 135-143.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do eucalipto: diagnose visual, diagnose foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. v. 1, cap. 3, p. 79-104.

SKOUSEN, J.; KLINGER, C. Sewage sludge land application program in West Virginia. **Journal of Soil and Water Conservation Society**, Ankeny, v. 48, p. 145-151, 1998.

SMITH, C.J.; WELLWOOD, R.W.; ELLIOT, G.K. Effects of nitrogen fertilizer and current climate on wood properties of Corsican pine (*Pinus nigra* var. *maritime* (Ait Melv)). **Forestry Commission**, Edinburgh, v. 50, n. 2, p. 117-138, 1977.

SOARES, T.S.; CARVALHO, R.M.M.A.; VALE, A.B. do. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 689-694, 2003.

SOUZA, C.R.; ROSSI, L.M.B.; AZEVEDO, C.P. de; LIMA, R.M.B. de. Comportamento da *Acácia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 95-101, jun. 2004.

SUBRAHMANYAM, S.V. Effect of nitrogen and phosphorus on fibre morphology of *Eucalyptus grandis*. **Forestry Research in Índia**, Dehradun, v. 1, p. 207-215, 1988.

TAYLOR, F.W. Differences in the wood of *Eucalyptus grandis* grown in different parts of South Africa. **South African Forestry**, Petroria, v. 91, p. 14-18, 1974.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods**. Atlanta: TAPPI Press, 1999. 573 p.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties and utilization**. New York: Van Nostrand Reinold, 1991. 494 p.

TSOUMIS, G.; PANAGIOTIDIS, N. Effect of growth condition on quality characteristics of Blake Pine (*Pinus nigra* Arn.). **Wood Science and Technology**, Madison, v. 14, p. 301-310, 1980.

TSUTIYA, M.T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 753-761.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamentos de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Brasília: EMBRAPA, 2000. cap. 4, p. 69-105.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TURNER, C.H.; BALODIS, V.; DEAN, G.H. Variability in pulping quality of *Eucalyptus globulus* from Tasmanian provenances. **Appita**, Melbourne, v. 36, n. 5, p. 371-376, Nov. 1983.

ULMGREN, P.; RADESTROM, R.; EDBLAD, M.; WENNERSTROM, M. On the chemistry of non-process elements in system with a pressurized black liquor gasifier. **Journal of Pulp and Paper Science**, Quebec, v. 25, n. 10, p. 344-350, Oct. 1999.

VALE, A.T. do; BRASIL, M.A.M.; CARVALHO, C.M. de; VEIGA, R.A.A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex- maiden e *Acácia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. **Revista Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALENTE, C.A.; SOUSA, A.P.M.; FURTADO, F.P.; CARVALHO, A.P. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: Technological component. **Appita**, Melbourne, v. 45, n. 6, p. 403-407, Nov. 1992.

VAZ, L.M.S.; GONÇALVES J.L.M. Uso de biossólido em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 747-758, 2002.

VEIGA, R.A.A. **Dendrometria e inventário florestal**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1984. 108 p. (Boletim Didático, 1).

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico).

VITAL, B.R. **Fatores que afetam a densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1985. 6 p. (Informativo SIF, 3).

VITAL, B.R. Reflexos da fertilização mineral na qualidade e na utilização da madeira. In: BARROS N.F.; NOVAIS R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita**, Melbourne, v. 49, n. 6, p. 427-432, Nov. 1996.

WEETMAN, G.F. **Effects of thinning and fertilization on the nutrient uptake, grown and quality of upland Black spruce**. Ottawa: Pulp Paper Research Institute Canadian, 1971. n.28, 18 p.

WEETMAN, G.F.; MCDONALD, M.A.; PRESCOTT, C.E.; KIMMINS, J.P. Responses of western hemlock., Pacific Silver Fir, and western red cedar plantations on northern Vancouver island to applications of sewage sludge and inorganic fertilizer. **Canadian Journal of Forestry Research**, Ottawa, v. 23, p. 1015-1020, 1993.

WEHR, T.R. **Variações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex- Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos kraft.** 1991. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

WILKINS, A.P. Influence of silvicultural treatment on growth and wood density of *Eucalyptus grandis* grown on a previous pasture site. **Australian Forestry**, Queen Vitoria, v. 53, n. 3, p. 168-172, 1990.

WILKINS, A.P.; HORNE, R. Wood density variation of young plantation grown *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden in response to silvicultural treatment. **Forestry Ecology and Management**, Amsterdam, v. 40, n. 1/2, p. 39-50, 1991.

WILLIAMS, R.F.; HAMILTON, J.R. The effect of fertilization on four wood properties of Slash Pine. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 59, n. 9, p. 662-665, 1961.

WOOLLONS, R.C.; CRANE, W.J.B.; SNOWDEN, P. Response to nitrogen, phosphorus and sulfur applications to a *Pinus radiata* stand in the Tumut region, New South Wales. **Australian Forest Research**, Camberra, v. 58, n. 3, p. 135-141, 1995.

WRIGHT, P.J.; WALLIS, A.F.A. Rapid determination of cellulose in plantation eucalypt woods to predict kraft pulps yields. **Tappi**, Atlanta, v. 81, n. 2, p. 126-130, Feb. 1998.

XAVIER, A.; BORGES, R.C.G.; CRUZ, C.D.; CECON, P.R. Parâmetros genéticos de características de qualidade da madeira em *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 71-78, 1997.

YANG, R.C.; WANG, E.I.C.; MICKO, M.M. Effects of fertilization on wood density and tracheid length of 70 year-old lodgepole pine in West Central Alberta. **Canadian Forest Research**, Ottawa, v. 18, n. 7, p. 954-956, 1988.

ZOBEL, B.J.; BUIJTENEN, J.P. **Wood variation:** its causes and control. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

ZOBEL, B.J.; THORBJORSEN, E.; HENSON, F. Geographic, site and individual tree variation in wood properties of loblolly pine. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 9, n. 7, p. 149-158, 1961.