ANA CLÁUDIA SILVA DE LIRA

**Lodo de esgoto em plantações de eucalipto:
carbono, nitrogênio e aspectos da fotossíntese**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, para a
obtenção do Título de Doutor em Ciências da
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Assoc. Valdir Schalch

São Carlos

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP**

L768r Lira, Ana Cláudia Silva de
 Lodo de esgoto em plantações de eucalipto: carbono,
 nitrogênio e aspectos da fotossíntese / Ana Cláudia Silva
 de Lira ; orientador Valdir Schalch. -- São Carlos, 2006.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação e Área de
 Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
 Paulo.

 1. Biossólido. 2. *Eucalyptus grandis*.
 3. Área foliar. 4. Nutrientes. 5. Seqüestro de C.
 I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dedico esta conquista aos meus filhos: Pedro Miguel, Alex, Túlio e Fábio César e ao meu marido Marcelino Guedes, que são a minha fonte de amor, alegria, paz e companheirismo; aos meus pais Antônio e Delvira que são exemplo de trabalho, dedicação e simplicidade; aos meus irmãos: João, Ana Carla, Ana Maria, Ana Cristina, João Paulo e Antônio Carlos, que possamos sempre trilhar o caminho do bem e sejamos exemplo vivo de honestidade e humanismo para os nossos filhos; e aos meus sobrinhos: Natan, Carol, Tainá, Taís, Stephannie, Árilla e Fernanda, que possam presenciar e valorizar a beleza das flores, o canto dos pássaros e o verde das florestas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre estar presente, mostrando e iluminando o meu caminho;

ao Prof. Dr. Valdir Schalch, não só pela orientação, mas principalmente pela confiança, compreensão e amizade;

ao Walter Decio e Adriana Antunes, pelo apoio, paciência e generosidade durante a finalização desta tese, imprimindo, formatando...enfim, por viabilizarem a entrega desta dentro do prazo;

à Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa;

à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), pelo financiamento de parte deste trabalho;

ao Prof. Dr. Fábio Poggiani, coordenador do projeto "Estudo de Parâmetros de Aplicação do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Barueri no plantio de Eucaliptos", pela possibilidade de inserção na equipe;

ao Dr. Gustavo Maia Souza pelas sugestões durante o exame de qualificação, pelas conversas sobre fotossíntese e pela ajuda durante as medições e interpretações dos dados provenientes do LICOR;

ao Dr. Marcos André Piedade Gama pelas sugestões durante o exame de qualificação;

ao Dr. Marcelino Guedes pela co-orientação e ajuda na busca das respostas;

ao Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha pelas críticas e sugestões durante a redação desta;

aos funcionários da Estação Experimental de Itatinga, pelo constante apoio durante o trabalho de campo;

aos alunos, professores e funcionários do CRHEA/EESC-USP pelo convívio e pelos ensinamentos;

à secretária do LCF/ESALQ-USP, Margareth Z. Pinese, pelo apoio, amizade e pela permanente disposição em ajudar;

aos amigos de ontem, de hoje e de sempre: Edevaldo, Rosely, Cléniva, Marta, Antônio Vieira, Luciana, Ewerton, Vânia, Margarida, Selso, André, Dênmora, Lia, Marcelo, Marly, Reynaldo, Cristina Lacerda, Rosa, Zilda, Fanny, Beto, Betânia, Joelson, Rosângela, Andréia Mosca, Cláudia Irene, Oka Maria, Aninha, Sônia, Alexandre, Valério, Ana, Tadeu, Cristina, Natália, Paulo, Raimundo, Cris, Dário, Isabela, Andréia, Alexandre, Illona, Ozelito e Márcia Capellini, pelos excelentes momentos;

à Leda, Bianca, Érica, Silvana, Simone e Laudemira por me ajudarem com as tarefas domésticas e com as crianças para que eu pudesse redigir esta;

a todos que direta ou indiretamente contribuíram para mais esta conquista.

“Amar é uma atitude que nos leva a agir, tendo como limite inferior, a justiça, e não tendo limite superior. A vida é um dom. Nascemos um dia e não sabemos quando vamos morrer. Amar a vida é saber que não merecíamos nada, repito, nada!, mas o criador nos deu o viver e o ser; e nos elevou a uma dignidade maior que todas as outras criaturas. Obrigado, Senhor!”

Lacaz-Ruiz e Glaser

RESUMO

LIRA, A. C. S. **Lodo de esgoto em plantações de eucalipto: carbono, nitrogênio e aspectos da fotossíntese**. 2006. 126 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

O tratamento de esgoto gera um resíduo, o lodo de esgoto, que tem potencial para promover o crescimento de plantas e aumentar a produtividade de cultivos. O objetivo geral do trabalho desenvolvido foi avaliar como esse resíduo aplicado em plantações de eucalipto altera os estoques de C e N, aspectos do processo fotossintético, da área e nutrientes foliares. O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Itatinga – ESALQ/USP, com aplicação de doses até 40 t ha⁻¹ de biossólido para cultivo de *Eucalyptus grandis*. Considerando a biomassa total acima do solo, os eucaliptos que receberam 10 t ha⁻¹ de biossólido + K e P mineral (10+KP) e adubação mineral completa (AD) produziram, em média, 107,5 t ha⁻¹, 63% a mais do que a testemunha; além de maiores valores de conteúdo de C e N na biomassa. Não houve diferenças significativas entre os tratamentos para os conteúdos totais de C (F=1,3450; p=0,3096), N (F=1,2183; p=0,3536) e conteúdo de N mineral (F=0,5192; p=0,7218) no solo. Apenas o C do solo determinado por oxidação úmida foi alterado. A dose de 10 t ha⁻¹ propiciou aumentos no C Walkley e Black em relação às maiores doses, mostrando que o desenvolvimento das árvores é mais importante para propiciar entradas de material orgânico no sistema do que a própria aplicação do biossólido. A utilização de biossólido alcalino, em superfície, propiciou baixas taxas de decomposição aos 5 anos após aplicação e não contribuiu para aumentar os estoques totais de C e N no solo. Os eucaliptos que receberam nutrientes, seja pela adubação mineral, seja pela aplicação de biossólido apresentaram maior área foliar. A diferença entre o maior IAF (4,3), do tratamento 40+K, e o controle superou uma unidade. As doses de biossólido polimerizado foram correlacionadas positivamente com os teores foliares de N, P, S, e Zn e com a clorofila do eucalipto com 3 meses de idade. Esse biossólido pode aumentar a fotossíntese líquida, quando as medições são realizadas no período da manhã, sendo também capaz de promover aumentos na eficiência do uso da água e no desenvolvimento de eucaliptos jovens.

Palavras-chave: Biossólido. *Eucalyptus grandis*. Área foliar. Nutrientes. Sequestro de C.

ABSTRACT

LIRA, A. C. S. **Sewage sludge in eucalypt plantation: carbon, nitrogen and photosynthesis aspects**. 2006. 126 f. Ph. D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

The wastewater treatment generates a residue, the sewage sludge, that has potential to promote plants growth and to increase its productivity. The general aim of this research was to evaluate how the applied residue in eucalypt plantations modify C and N stocks, aspects of the photosynthetic process, leaf area and leaf nutrients. The study was developed at the Experimental Station of Itatinga - ESALQ / USP. The experiment was installed with application of rates up to 40 t ha⁻¹ of biosolids in *Eucalyptus grandis* plantation. Considering the total biomass above the soil, the eucalypts that received 10 t ha⁻¹ of biosolids + K and P mineral (10+KP) and complete mineral fertilization (AD) produced, on average, 107.5 t ha⁻¹, which represents 63% more than control treatment and larger values of C and N contents in the biomass. There were not significant differences among the treatments for total contents of C (F=1.3450; p=0.3096), N (F=1.2183; p=0.3536) and mineral N (F=0.5192; p=0.7218) in the soil. Just the soil carbon content, determined by wet oxidation, was altered. The 10 t ha⁻¹ biosolids rate increased the Walkley and Black C in relation to the largest doses, showing that trees development is more important to input organic material in the system than the biosolids application. The alkaline biosolids application to the soil surface resulted in low decomposition rates, 5 years after application, and did not contribute to increase C and N total stocks in the soil. The eucalypts that received nutrients even by mineral fertilization or by biosolids application, presented larger leaf area. The difference between the higher LAI (4.3) observed (treatment 40+K) and the control treatment was one unit. The polymeric biosolids rates were positively correlated with N, P, S, and Zn concentrations and with chlorophyll in eucalypts leaves at 3 months of age. The studied biosolid can increase net photosynthesis, being also capable to promote the water use efficiency and young eucalypts development.

Keywords: Biosolids. *Eucalyptus grandis*. Leaf area. Nutrients. Carbon sink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização da área experimental	41
Figura 2 -	Médias mensais das temperaturas medidas diariamente às 9:00h e valores totais da precipitação de cada mês do ano de 2003	58
Figura 3 -	Médias mensais das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin) medidas diariamente na Estação Experimental de Itatinga	59
Figura 4 -	Efeito dos tratamentos sobre a biomassa epígea de <i>Eucalyptus grandis</i> aos cinco anos de idade	62
Figura 5 -	Efeito dos tratamentos sobre a produção de volume comercial de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> ao longo da rotação	64
Figura 6 -	Partição da biomassa epígea total de eucalipto com cinco anos de idade entre seus componentes, para cada tratamento testado	65
Figura 7 -	Efeito dos tratamentos sobre o estoque de CARBONO na biomassa epígea de <i>Eucalyptus grandis</i> aos cinco anos de idade	68
Figura 8 -	Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de NITROGÊNIO na biomassa epígea de <i>Eucalyptus grandis</i> aos cinco anos de idade	70
Figura 9 -	Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de nitrogênio na serapilheira acumulada sobre o solo, cinco anos após a aplicação de biossólido em povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i>	73
Figura 10 -	Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de C Walkley e Black no solo, avaliado até 60 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de biossólido	83
Figura 11 -	Efeito dos tratamentos sobre o índice de área foliar das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos cinco anos de idade	94
Figura 12 -	Taxa fotossintética de plantas de <i>Eucalyptus grandis</i> fertilizado com biossólido polimerizado, medidas durante um dia em intervalos de duas horas, três meses após a realização do plantio	95

Figura 13 -	Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido sobre a fotossíntese líquida, medida às 09:00 h e 11:00 h, de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos três meses de idade	97
Figura 14 -	Valores médios (n=5) da eficiência do uso de água por plantas de eucalipto, aos três meses de idade, em função da aplicação de doses (base seca) crescentes de biossólido	99
Figura 15 -	Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido polimerizado sobre a área foliar média por folha das plantas de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos três meses de idade	102
Figura 16 -	Relação da área foliar média por folha com a altura (cm) e diâmetro (mm) do coleto de <i>Eucalyptus grandis</i> com 3 meses de idade fertilizado com biossólido polimerizado	103
Figura 17 -	Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido polimerizado sobre a altura de plantas de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 3 meses de idade	104
Figura 18 -	Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido polimerizado sobre o diâmetro do coleto de plantas de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 3 meses de idade	105

LISTA DE FOTOS

Foto 1 -	Poço distribuidor da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP	21
Foto 2 -	Decantadores da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP	22
Foto 3 -	Filtro Prensa da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP	23
Foto 4 -	Aspecto do resíduo (lodo), proveniente do tratamento do esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP	24
Foto 5 -	Fase inicial do experimento I: o biossólido alcalino aplicado entre as linhas de plantio de <i>Eucalyptus grandis</i> sob cultivo mínimo	47
Foto 6 -	Fase inicial do experimento II: o biossólido polimerizado aplicado nas linhas de plantio de <i>Eucalyptus grandis</i> com 3 meses de idade sob cultivo mínimo	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Atributos químicos e físicos do solo do experimento 1, em diversas profundidades (Pf), antes da aplicação do bio sólido	42
Tabela 2 -	Composição do bio sólido alcalino. Valores totais expressos em base seca	45
Tabela 3 -	Valores médios e desvio padrão de alguns parâmetros químicos de interesse agrônomo, calculados a partir dos resultados de análises químicas de bio sólidos utilizados em experimentos no Estado de São Paulo	45
Tabela 4 -	Composição do bio sólido polimerizado. Valores totais expressos em base seca	53
Tabela 5 -	Valores médios (n=4) dos teores de C e N em componentes de árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> abatidas nas parcelas de cada tratamento, cinco anos após o plantio	66
Tabela 6 -	Valores médios (n=4) do conteúdo de C e N nos componentes de <i>Eucalyptus grandis</i> , cinco anos após o plantio, em função dos tratamentos	71
Tabela 7 -	Valores médios (n=12) de biomassa seca, do conteúdo de C e N em serapilheira acumulada sobre o solo em cada tratamento, cinco anos após o plantio dos eucaliptos	73
Tabela 8 -	Porcentagem média (n=12) de perda de massa de bio sólido, cinco anos após a aplicação do resíduo, em função da massa remanescente (MR) sobre o solo após esse período	75
Tabela 9 -	Conteúdos de carbono orgânico e nitrogênio no bio sólido original e médias (n=12) dos conteúdos remanescentes nas parcelas de cada tratamento, cinco anos após a aplicação do resíduo. São apresentadas também, em negrito, as respectivas porcentagens de liberação	77
Tabela 10 -	Teores médios (n=4) de C total, C orgânico pelo método de Walkley e Black (C wb), N total, N mineral ($N_{min} = NO_3^- + NH_4^+$) e relação C/N em diferentes profundidades do solo sob <i>Eucalyptus grandis</i> , cinco anos após o plantio, em função dos tratamentos	80

Tabela 11 -	Influência dos tratamentos no coeficiente de utilização aparente (CUA) de nitrogênio, calculado de acordo com Labrecque (1995)	88
Tabela 12 -	Balanço de C total cinco anos após a implantação do experimento, mostrando as entradas e os conteúdos nos compartimentos e o efeito de cada tratamento sobre o saldo de C no ecossistema. O saldo representa a soma das diferenças do C de cada tratamento em relação à testemunha	89
Tabela 13 -	Balanço de N em cada tratamento, representando as diferenças entre as respectivas entradas de N com cada tratamento aplicado e os conteúdos de N estocados nos compartimentos, cinco anos após a implantação do experimento	90
Tabela 14 -	Valores médios (n=8) da área foliar total de uma árvore de eucalipto (AFT), da área média de cada folha (AFMF*), da área foliar específica (AFE) e do índice de área foliar (IAF), em função dos tratamentos, cinco anos após o plantio dos eucaliptos	92
Tabela 15 -	Efeito dos tratamentos sobre os coeficientes de correlação entre o IAF e a biomassa seca nos componentes das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> com cinco anos de idade	93
Tabela 16 -	Coeficientes de correlação entre as variáveis dose de biossólido (D), taxa fotossintética líquida (TF), condutância estomática (CON), carbono interno fixado (Ci), eficiência de utilização de água (EUA), área foliar média por folha (AFMF), área foliar específica (AFE), altura (H) e diâmetro do coleto (D) dos eucaliptos e teor de clorofila (CLO). Variáveis avaliadas durante cinco períodos em uma dia (n=25), em povoamento de <i>Eucalyptus grandis</i> aos três meses após o plantio, após aplicação de doses de 0 a 30 t ha ⁻¹ de biossólido polimerizado	101
Tabela 17 -	Coeficientes de correlação entre as variáveis citadas na tabela 16 e os teores de nutrientes nas folhas dos eucaliptos	106
Tabela 18 -	Teores foliares de nutrientes em povoamento recém-implantado de eucalipto (3 meses de idade), em função da aplicação de doses de biossólido polimerizado	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	O Processo do Tratamento de Esgoto em uma ETE	21
2.2	Aspectos Legais e Técnicos para o Uso do Lodo de Esgoto como Biossólido	24
2.3	Aspectos Técnicos para o Uso do Lodo de Esgoto como Biossólido	26
2.4	Estoque de Carbono em Ecossistemas Florestais	31
2.5	Nitrogênio no Biossólido	35
2.6	O Índice de Área Foliar	37
2.7	A Fotossíntese	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Área de Estudo	41
3.2	Condições Edáficas	41
3.3	Condições Climáticas	42
3.4	Condições Florísticas	43
3.5	Experimento I: Povoamento com Cinco Anos	43
3.5.1	Implantação, caracterização e aplicação do biossólido	43
3.5.2	Delineamento experimental e definição dos tratamentos	46
3.5.3	Estoque de C e N na biomassa florestal	48
3.5.4	Estoques de C e N na serapilheira e no biossólido	49
3.5.5	Estoque de C e N no solo	50
3.5.6	Determinação da Área Foliar	50
3.5.7	Análise dos dados	51

3.6	Experimento II - Povoamento Recém Implantado	52
3.6.1	Implantação, caracterização e aplicação do biossólido	52
3.6.2	Delineamento experimental e tratamentos	54
3.6.3	Desenvolvimento das plantas	56
3.6.4	Taxa fotossintética e taxas de trocas gasosas	56
3.6.5	Clorofila a e b	56
3.6.6	Área foliar	57
3.6.7	Análise dos dados	57
3.7	Monitoramento dos Dados Meteorológicos	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Estoques de C e N nos Compartimentos do Ecossistema	61
4.1.1	Estoque na biomassa aérea	61
4.1.2	Estoque na serapilheira	72
4.1.3	Estoque no biossólido remanescente	75
4.1.4	Estoque no solo	79
4.2	Balanço Biossólido/Solo/Planta	87
4.3	Efeitos Sobre a Área Foliar	92
4.4	Efeitos Sobre a Fotossíntese	95
4.5	Relações entre Área Foliar, Fotossíntese e Nutrientes	100
5	CONCLUSÕES	109
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	GLOSSÁRIO	125

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os problemas com a contaminação da água por resíduos urbanos, principalmente o esgoto, são cada vez mais comuns. A água desempenha um papel importante nas enfermidades parasitárias, pois muitos agentes patogênicos são veiculados por meio dela. Assim, torna-se fundamental proteger os cursos d'água do excesso de carga poluente que incrementam a multiplicação de organismos causadores de doenças humanas. O lançamento de esgoto direto sobre os cursos d'água é uma das principais fontes de poluição dos recursos hídricos. As águas para abastecimento humano apresentam risco de serem poluídas, dentre outros fatores, pelas águas residuárias, potencializando sua capacidade de veicular doenças.

Somado a isso vem o fator econômico: se gasta muito mais com os tratamentos químicos para tornar esta água própria para o consumo, caso ela esteja mais contaminada. Com isso, o número de estações de tratamento de esgoto (ETEs) vem aumentando nos últimos tempos, criando-se uma expectativa de que, em poucos anos, será produzida uma quantidade imensa de resíduo do tratamento. Esse resíduo, o lodo de esgoto, dependendo do manejo ao qual é submetido, pode gerar outros problemas. Assim, a disposição final adequada do lodo produzido nas estações de tratamento é uma etapa essencial de todo o processo em uma ETE.

Atualmente no Brasil, a maioria das estações de tratamento coloca o lodo em aterros sanitários, implicando em elevados custos financeiros, sociais e ambientais. De acordo com Tsutya (2000) o tratamento e a disposição final do lodo representam 20% a 40% das despesas operacionais de uma ETE. Mas o que fazer com esse lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto? Dentre as várias alternativas existentes, acredita-se que a reciclagem do lodo como biossólido em plantações florestais é uma das mais interessantes.

O lodo de esgoto devidamente tratado e filtrado, que vem sendo utilizado como fertilizante e condicionador de solo por ser rico em nutrientes, é chamado de biossólido.

Pesquisas vêm demonstrando que esse resíduo poderia ser reutilizado para fins agrícolas e/ou florestais, evitando sua disposição em aterros e lixões, geralmente localizados na periferia das grandes cidades. Assim, esse resíduo, hoje problemático, no futuro poderá ser considerado um insumo, gerando um estímulo para que mais esgotos urbanos sejam tratados antes de promoverem a eutrofização e poluição dos rios.

Para efetivar a utilização do biossólido em florestas e realizar um bom manejo da aplicação, é preciso entender bem seus efeitos sobre processos como a ciclagem dos nutrientes e a fotossíntese, que garantem o funcionamento e a sustentabilidade de ecossistemas.

Atualmente, as pesquisas sobre o uso do lodo de esgoto como biossólido, bem como a utilização do mesmo como fertilizante e condicionador de solos em áreas agrícolas e florestais estão bastante desenvolvidas, principalmente, em alguns países da América do Norte e Europa. No entanto, mesmo em caráter experimental, pouco se conhece sobre os efeitos da aplicação de biossólido na ciclagem do Carbono (C) e na fisiologia das plantas.

Este estudo fez parte de um projeto multidisciplinar, que pesquisa a viabilidade da aplicação de lodo de esgoto em plantações comerciais de eucalipto, envolvendo uma equipe de quinze docentes de três Departamentos da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), vários pós-graduandos e técnicos da Companhia de Saneamento Básico de Estado de São Paulo (SABESP). Para desenvolver tal projeto foi firmado um convênio entre o Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF)/Departamento de Ciências Florestais da ESALQ-USP e a SABESP.

Esta pesquisa foi baseada na hipótese geral de que a aplicação do lodo de esgoto tratado (biossólido) modifica aspectos do ciclo do carbono e Nitrogênio em ecossistema com cultivo de eucalipto, exercendo efeitos sobre processos como a utilização e imobilização de

nutrientes nos compartimentos do sistema, alterando aspectos da fotossíntese e da fisiologia das árvores.

O objetivo geral desta tese foi avaliar o efeito da utilização do biossólido sobre os estoques de C e N nos eucaliptos, na serapilheira, no biossólido remanescente após cinco anos de aplicação e no solo, assim como sobre o processo fotossintético, sobre a área e nutrientes foliares.

As hipóteses específicas testadas foram:

- a) a aplicação de biossólido contribui para aumentar a fixação de C no solo e na biomassa aérea de plantações de eucalipto. O maior desenvolvimento do eucalipto devido à utilização do resíduo incrementa o acúmulo de C e N em seus componentes. Os troncos respondem pela maior parte do aumento do estoque na vegetação. O aumento da biomassa dos outros componentes (casca, galhos e folhas) se transfere para o solo por meio da deposição de serapilheira, propiciando maiores entradas de C e N do que por meio do próprio material orgânico adicionado diretamente com o biossólido.
- b) A aplicação de biossólido altera a área foliar dos eucaliptos. Os tratamentos alteram a significância da correlação entre o índice de área foliar (IAF) e a biomassa acumulada nos componentes das árvores.
- c) O biossólido possui elevado potencial de fornecer nitrogênio e outros nutrientes às plantas de eucalipto, sendo assim, capaz de promover aumento do teor de clorofila e, consequentemente, da taxa fotossintética das folhas.

Em função das hipóteses específicas foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- a) quantificar os estoques de carbono e nitrogênio na biomassa aérea (tronco, galhos, folhas, casca) das árvores de eucalipto, na serapilheira, no biossólido remanescente e no solo, verificando o efeito do biossólido sobre os estoques, cinco anos após a aplicação do resíduo.
- b) Avaliar a área foliar das árvores, verificando como os tratamentos afetam a relação entre o IAF e a compartimentalização do C e da biomassa entre os componentes;
- c) avaliar a taxa fotossintética, a área foliar e teores de clorofila e nutrientes em plantio jovem de eucalipto, verificando qual parâmetro melhor se correlaciona com o desenvolvimento das plantas em sua fase inicial de crescimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo do Tratamento de Esgoto em uma ETE

Já que se faz necessário tratar o esgoto para que a água residuária possa ser lançada em corpos de água, é importante saber que todos os sistemas de tratamento, em sua fase líquida, em maior ou menor grau, dependendo do processo utilizado para tratar o esgoto, geram um resíduo denominado lodo. Quando se estuda o destino final de lodos de esgoto, como é o caso de seu uso em plantações florestais, se faz necessário conhecer o sistema de tratamento de esgoto sanitário que a ETE adota, pois as características que o resíduo apresenta dependem do sistema de tratamento.

Na ETE de Barueri a base do tratamento do esgoto é o processo de lodo ativado convencional. O esgoto chega, por gravidade, ao poço distribuidor (FOTO 1) e elevatório final da estação. A partir daí seu tratamento é composto por duas fases bem distintas, a líquida e a sólida. Sobrinho (2001) ressalta que na fase líquida, as matérias orgânicas e minerais suspensas e dissolvidas no meio líquido vão, progressivamente, sendo removidas. Na fase sólida, esses materiais vão sendo estabilizados e concentrados. De acordo com a SABESP (2006), a ETE de Barueri adota as seguintes etapas na fase líquida:

Foto 1 - Poço distribuidor da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP

a) Tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros e areia, que tem por objetivo principal proteger as unidades que darão seqüência ao tratamento, da abrasividade da areia e dos impactos de diferentes tipos de materiais sólidos que vêm junto com o esgoto. Essa etapa é realizada em grades mecanizadas e desarenadores compostos por caixas de areia aeradas.

b) Tratamento primário: remoção de sólidos sedimentáveis. Esta etapa ocorre por gravidade em uma unidade denominada decantador primário.

c) Tratamento secundário: composto por tanques de aeração e decantadores secundários. Nessa etapa ocorre a conversão biológica dos sólidos orgânicos (digestão aeróbia) que não foram removidos pela sedimentação nos decantadores primários.

Foto 2 – Decantadores da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP

Na fase sólida, as etapas adotadas na ETE de Baueri, são as seguintes (SABESP, 2006):

a) Adensamento: remoção de sólidos em suspensão e de material coloidal. No adensamento por flotação a estação usa como coagulantes o cloreto férrico e sulfato de alumínio.

b) Estabilização: ocorre através do processo de digestão do material orgânico por microorganismos em reatores anaeróbios.

c) Condicionamento: é realizado para facilitar o desaguamento, através da adição de polímero bipolar ou polieletrólito.

d) Desaguamento mecânico: ocorre no filtro prensa (FOTO 3) e seu funcionamento baseia-se principalmente, na pressão gerada por uma bomba de alimentação de lodo que provoca a força necessária para o trabalho nesse equipamento.

Foto 3 – Filtro Prensa da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP

Após as etapas citadas anteriormente, é produzido o resíduo (lodo) proveniente do tratamento de esgoto de grande parte da cidade de São Paulo e algumas localidades, como Jandira, Itapevi, Barueri, Carapicuíba, Osasco, Taboão da Serra e partes de Cotia e Embu. Na FOTO 4 é mostrado o aspecto do lodo, proveniente do tratamento do esgoto da ETE de Barueri.

A disposição final do lodo de esgoto ainda hoje é uma “etapa-problema” dentro da ETE. Para uma adequada solução é necessário conhecer o processo de geração do lodo, visando seu reaproveitamento.

Foto 4 - Aspecto do resíduo (lodo), proveniente do tratamento do esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri - SP

2.2 Aspectos Legais e Técnicos para o Uso do Lodo de Esgoto como Biossólido

A expansão do uso de biossólido em culturas agrícolas e florestais, assim como sua utilização para promover o desenvolvimento de plantas em áreas degradadas, depende da existência de um marco legal bem estabelecido. Esse marco legal é fundamental para definir os critérios de distribuição e aplicação do biossólido e para definir indicadores e frequência com que áreas que receberem o resíduo devem ser monitoradas, para garantir a segurança de toda operação e evitar a ocorrência de possíveis problemas como toxicidade associada aos metais pesados, contaminação de plantas e pessoas por patógenos e contaminação do lençol freático pela lixiviação de nitrato.

Muitos países possuem leis específicas para disciplinar o uso agroflorestal dos bio sólidos. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) determina as quantidades máximas de metais pesados que possam estar presentes no bio sólido e, em função desses teores podem ser calculadas doses e frequência de aplicação do material.

O Brasil foi, recentemente, contemplado com uma legislação federal específica para disciplinar a utilização de bio sólidos. **A Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006** define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. A norma estabelece que os lodos, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógeno e da atividade de vetores de doenças. O texto estabelece algumas restrições na aplicação do resíduo em pastagens, Unidades de Conservação, cultivo para consumo in natura (hortaliças), dentre outros.

Existem ainda outras leis federais pertinentes a esse tema que devem ser observadas. **A Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, deve ser observada para evitar que a atividade de utilização do bio sólido cause danos ambientais. Na seção da Poluição e outros Crimes Ambientais, o Art. 54. afirma que não é permitido causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora. Esse é um dos artigos que poderia ser infringido, por exemplo, se a disposição final de lodo de ETEs fosse mal planejada e chegasse a tornar uma área, urbana ou rural, imprópria para a ocupação humana; ou causar poluição hídrica que tornasse necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade.

Em nível estadual, poucas unidades da federação brasileira estão pesquisando a utilização do lodo de esgoto como bio sólido. Em termos de legislação, o número de estados

que apresentavam avanços na regulamentação do uso do biossólido, antes da aprovação da resolução nº 375, era muito pequeno.

No final da década de 90, no Estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1999), já possuía normas específicas para controlar a aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas, por meio da determinação de critérios específicos para projeto e operação, de modo que poderia ser utilizado o potencial do biossólido como fertilizante e condicionador de solos sem riscos à saúde humana ou ao meio ambiente.

As normas estabelecidas pela CETESB representaram um grande avanço e possibilitaram que a comunidade científica e técnicos ligados à área trabalhassem no desenvolvimento da lei federal (Resolução CONAMA nº 375) para propiciar o uso benéfico do lodo de esgoto em todo o Brasil.

2.3 Aspectos Técnicos para o Uso do Lodo de Esgoto como Biossólido

Segundo a EPA (1999), o biossólido (historicamente conhecido como lodo de esgoto) deve ter potencial de uso benéfico, especialmente, como corretivo de solo. Miles et al. (1994) também enfocam o uso benéfico desse resíduo, afirmando que o lodo deve ser chamado de biossólido quando seu destino final é o uso benéfico como fertilizante e/ou condicionador de solos, aproveitando seu valor como fonte de nutrientes para as plantas e matéria orgânica para o solo. Segundo Guedes (2005) o uso do biossólido representa a possibilidade de associar ganhos para o produtor, por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais, com vantagens inclusive para os geradores de lodo, por meio da efetivação de métodos adequados e mais econômicos de disposição final desse resíduo.

Para a aplicação do bio sólido em determinada área com fins de uso benéfico, deve-se respeitar certos limites de aplicação que garantam segurança na utilização e minimização de riscos à saúde humana e animal. A caracterização do material e o tratamento a que ele é submetido são fundamentais para evitar problemas como presença de microorganismos patogênicos, concentrações elevadas de nitrato e metais pesados. O tratamento e o manejo da aplicação no campo podem garantir a inexpressividade dos riscos. Para Miles et al. (1994), as melhores práticas de manejo são métodos operacionais que determinam características da aplicação de bio sólido visando proteger o ambiente. Elas incluem taxas de aplicação agronomicamente corretas, limitações devido à declividade e ao pH do solo, zonas tampões, restrições quanto ao acesso público, práticas de conservação do solo e outras restrições locais.

Nos Estados Unidos, durante o ano de 1998, 60% do lodo de esgoto produzido teve uso benéfico, sendo 41% aplicado no solo para favorecer o desenvolvimento da vegetação, incluindo as florestas (EPA, 1999). No ano de 2000, a produção de lodo nos EUA chegou a 7,1 milhões de toneladas, em base seca, com disposição final predominantemente por meio do uso agroflorestal para promover o uso benéfico do resíduo, que atingiu 55,5% do lodo produzido (EPA, 2001). Na Europa, são produzidas, aproximadamente, 9 milhões de toneladas de lodo, sendo que 40% desse material têm disposição final por meio da reciclagem agroflorestal. No Brasil, ainda é pequeno o número de estados em que há o tratamento de todo o esgoto gerado pela população. Ainda assim, já se faz necessário intensificar as pesquisas, visando à reciclagem e/ou reutilização desse resíduo.

A utilização de bio sólido propicia um melhor aproveitamento de nutrientes pelas plantas, visto que os mesmos estão na forma orgânica e são liberados gradativamente, suprimindo de modo mais adequado às exigências nutricionais no decorrer do ciclo biológico (CARVALHO e BARRAL, 1981). Desse modo, não se deve dispensar inicialmente uma complementação com fertilizantes minerais, para compensar essa lenta mineralização do

biossólido (VLAWIS e WILLIANS, 1971). Dos elementos presentes no biossólido que são disponibilizados para o vegetal por meio da mineralização, o N é o primeiro a ser liberado pois esse elemento faz parte de comopostos como as proteínas que são mais facilmente decomponíveis. Conforme pode ser observado na Tabela 18 desse trabalho, três meses após a aplicação de biossólido já foi possível detectar aumentos nos teores de N nas folhas dos eucaliptos.

Em geral, o lodo pode fornecer nitrogênio (N) e outros nutrientes como fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S), cobre (Cu) e zinco (Zn) em quantidades satisfatórias às plantas. O K é um elemento que sempre se encontra em baixos teores nos biossólidos, pois é um elemento solúvel que não fica retido na matéria orgânica do lodo, se perdendo com o efluente. Assim, durante aplicação de biossólido para nutrição de plantas, normalmente é necessária a complementação com esse nutriente.

Em função do conteúdo orgânico, têm sido propostas aplicações de biossólido como método para manutenção dos níveis de matéria orgânica em áreas agrícolas, bem como em florestas e áreas degradadas (BOYLE e PAUL, 1989 e DÍAZ-BURGOS e POLO, 1991). Em regiões de clima tropical e subtropical onde a matéria orgânica adquire papel fundamental na capacidade de troca catiônica (CTC) o uso de biossólido na agricultura torna-se ainda mais atrativo (MELO et al., 1994). Após certo tempo, o efeito direto da matéria orgânica contida no biossólido é, normalmente, menor do que o efeito indireto devido às entradas provenientes das plantas, conforme constatado por Guedes (2005). Esse autor afirma que, em relação à entrada de material orgânico no ecossistema, o efeito indireto do biossólido, em consequência do aumento da produtividade de fitomassa e da reciclagem biogeoquímica, é maior do que a própria matéria orgânica adicionada inicialmente com a aplicação do resíduo.

Do ponto de vista químico, quando o biossólido reage com o solo, ocorrem reações de óxido-redução e interações do tipo ácido-base, aumentando a CTC do solo e enriquecendo-

o em cátions básicos (Ca e Mg), aumentando o pH e diminuindo o alumínio trocável. Com relação às propriedades físicas do solo, o bio sólido, pelo efeito da matéria orgânica nele contida, reflete em melhoria da estrutura física, aumentando a agregação das partículas (estabilidade de agregados), favorecendo a infiltração de água no perfil, a aeração e a retenção de umidade (SABEY, 1974 e CARVALHO e BARRAL, 1981).

Comparando-se o uso de bio sólido em áreas cultivadas com floresta ou com culturas agrícolas, verifica-se que o ciclo das culturas florestais é mais longo e que a acumulação de biomassa durante esse período é uma maneira de armazenar certos elementos perigosos, que podem ser retirados do local com a colheita da madeira. Os solos florestais são geralmente pobres, ao contrário de solos agrícolas, resultando em melhor aproveitamento e menores perdas dos nutrientes. Normalmente, as florestas respondem à aplicação de bio sólido com significativos aumentos da biomassa arbórea e dos teores de nutrientes. As florestas oferecem menor oportunidade de contato humano com bio sólido recém aplicado. Os produtos das culturas florestais, normalmente não são comestíveis, diminuindo o risco quanto à entrada de possíveis contaminantes na cadeia alimentar. De acordo com Hart et al. (1988), todos esses fatores mostram que a aplicação de bio sólido em cultivos arbóreos apresenta uma série de vantagens em comparação com cultivos agrícolas.

Ainda em relação ao uso do bio sólido em florestas, Guedes (2005) afirma que o ciclo longo das culturas florestais permite maiores intervalos e uma maior dinâmica entre aplicações, aumentando a eficiência de absorção do sistema radicular perene, profundo e bem distribuído das árvores. Dessa maneira, os nutrientes do bio sólido, liberados de forma mais lenta, podem ser bem melhor aproveitados pelas árvores, com menores perdas por lixiviação ou escoamento superficial quando esse resíduo é aplicado a lanço sem incorporação.

Existem várias pesquisas, tanto na Europa quanto na América e na Austrália, mostrando incremento da produtividade de espécies florestais de interesse silvicultural,

principalmente, as do gênero *Pinus*, à adição de biossólido (McNAB e BERRY, 1985; PHILLIPS et al., 1986; HART et al., 1988; WEETMAN et al., 1993; POLGLASE e MYERS, 1995).

Estudos realizados durante 20 anos em uma floresta experimental localizada em Washington (EUA), confirmaram a grande potencialidade de biossólidos para aumentar a produtividade de áreas florestais. A aplicação de biossólidos, em quantidades ambientalmente aceitáveis, resultou em elevadas taxas de resposta de crescimento, tanto para plantios jovens, como para áreas já estabelecidas, promovendo o crescimento das árvores e da vegetação do sub-bosque (HENRY et al., 1993 e HENRY et al., 1994).

Como salientado anteriormente, o biossólido pode conter uma grande quantidade de metais pesados, por isso esses elementos devem ser monitorados no sistema. Fiskell et al. (1990) relatam baixa concentração de metais em plantio de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e no sub-bosque, após aplicação de até 22 t ha⁻¹ de biossólido em solo arenoso. Dos metais remanescentes no horizonte orgânico, somente Zn e cádmio (Cd) apresentaram alguma quantidade na forma trocável, sendo que apenas o Zn foi acumulado em quantidade apreciável na planta.

Andrade e Mattiazzo (2000), trabalhando na mesma área experimental, na qual foi desenvolvida a presente pesquisa, verificaram que não houve disponibilização de metais pesados do lodo de esgoto em questão (biossólido alcalino da ETE de Barueri) para o solo, nem para as árvores de eucalipto.

Ao avaliar a influência do biossólido no estoque de nutrientes do sistema “solo – sub-bosque – serapilheira”, em parcelas de *Eucalyptus grandis*, 68 meses após sua aplicação, Rezende (2005) verificou que, no solo à profundidade de 0 – 10 cm, os teores totais dos metais pesados cobre (Cu), níquel (Ni) e Zn foram semelhantes ao da testemunha e os elementos Cd e chumbo (Pb) não foram detectados em nenhum tratamento.

Em Vancouver, no Canadá, árvores tratadas com fertilizantes inorgânicos sofreram deficiência de enxofre (S), enquanto áreas tratadas com lodo de esgoto (biossólido) não apresentaram essa deficiência (WEETMAN et al., 1993).

Labrecque et al. (1995) aplicaram 6 doses de lodo estabilizado, desidratado e granulado, de forma a obter 0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg N disponível ha⁻¹, em grandes potes plásticos contendo solo arenoso e cultivados com duas espécies do gênero *Salix*, durante vinte semanas. A maior dose testada provocou o melhor desenvolvimento, em ambas as espécies. O coeficiente de transferência de metais não variou entre espécies, mas foi significativamente maior para Cd e Zn. As plantas absorveram mais Cd e Zn, mas foram menos hábeis para absorver Ni, mercúrio (Hg), Cu e Pb. Estes autores afirmam que um conteúdo elevado de metais em culturas agrícolas não é desejável, além de ser potencialmente perigoso. No entanto, para árvores isso é aceitável, desde que a atividade fisiológica não seja afetada. Assim, as plantações florestais podem ser usadas como filtros, por meio da captura, acúmulo e armazenamento de poluentes dentro da biomassa. Isso vai variar com a cultura florestal, pois existe uma captura seletiva de metais, provavelmente, devido às solubilidades diferentes no solo e preferência de determinada espécie vegetal por diferentes metais.

Em uma área dos EUA, cultivada com *Abies grandis* e *Pseudotsuga menziesii*, oito anos após a aplicação de 300 t ha⁻¹ (peso seco) de biossólido, houve sintomas de deficiência de Mg. Nessa área, apesar dos níveis de metais serem significativamente maiores para Ni, Cd e cromo (Cr) nas folhas das árvores plantadas na área tratada, as concentrações não atingiram níveis considerados tóxicos (HARRISON et al., 1994).

2.4 Estoque de Carbono em Ecossistemas Florestais

O ciclo do C é um dos mais abrangentes da biosfera, pois inclui não só o solo e suas abundantes fauna e flora, como também os vegetais superiores de todos os tipos e totalidade

da vida animal, inclusive o próprio homem. Esse ciclo tem uma importância tão vital que, com suas variadas ramificações, poderia ser corretamente designado como "ciclo da vida" (BRADY, 1989).

O'Brien e O'Brien (1995) afirmam que esse elemento representa apenas 1% dos elementos do planeta. A quantidade na biosfera é de 2×10^{16} toneladas, a maioria ocorrendo sob a forma de carbonatos inorgânicos encontrados nas rochas e nos oceanos, e sob a forma de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, petróleo e gás natural.

Nas últimas décadas, vem aumentando a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, proveniente de várias atividades, como a queima de combustíveis fósseis e de mudanças do uso da terra, ocasionando o chamado "efeito estufa" (SOARES e OLIVEIRA, 2002). Esse aumento provoca o super-aquecimento da Terra e as conseqüências são catastróficas: furacões, secas, inundações e incêndios florestais (KLINTOWITZ, 2006). Assim, o número de cientistas que se preocupam em avaliar os estoques, sumidouros e o ciclo do carbono no planeta, a partir do estudo dos ecossistemas, vem aumentando a cada dia.

De acordo com Feldmann (2001), o primeiro relatório apresentado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em 1990, já mostrava que houve uma elevação de $0,5^\circ\text{C}$ na temperatura média global, em relação ao século anterior. O relatório já alertava sobre a necessidade de se tomar medidas severas para diminuir a emissão de gases causadores do efeito estufa, como sendo a única forma de evitar o aquecimento global. Com base no relatório foi iniciada uma série de negociações que resultaram na Convenção sobre clima, assinada durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Cúpula da Terra realizada no Rio de Janeiro, em 1992, conhecida como "Rio 92", ou "Eco 92".

Em 1997 houve a reunião da Conferência das Partes no Japão, resultando em um tratado com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que provocam o

efeito estufa, o chamado "Protocolo de Quioto". De acordo com esse protocolo, a floresta pode ser usada pelos países industrializados para reduzir a quantidade dos gases que promovem o "efeito estufa" em pelo menos 5%, em relação aos níveis de 1990, dentro do período compreendido entre 2008-2012 (PROTOCOLO DE QUIOTO, 1997).

Em 2007 será divulgado o próximo relatório do IPCC. O mesmo deve estimar um aumento na temperatura média do planeta entre 2 e 4,5°C até 2050. Mas hoje, com o aumento de apenas 1 grau, já se pode presenciar “as seis pragas do aquecimento”, que são: 1) derretimento do Ártico; 2) furacões mais fortes; 3) o Brasil na rota dos ciclones; 4) a subida do nível do mar; 5) o avanço dos desertos e 6) milhares de mortos (KLINTOWITZ, 2006).

No entanto, acredita-se ainda que as florestas têm um papel importante na redução da quantidade CO₂, pois a árvore, por meio da fotossíntese, captura o C atmosférico que é incorporado às suas células onde fica armazenado até ser lançado na atmosfera pelo seu próprio metabolismo - a respiração (as folhas vivas liberam compostos orgânicos que são arrastados pela água da chuva - pluviolixiviados), ou pelo metabolismo dos herbívoros, ou então, pela decomposição (O'BRIEN e O'BRIEN, 1995) de suas folhas e galhos após a senescência, de suas raízes e/ou sua própria morte, possibilitando também um estoque no solo e nos pequenos organismos (macro, meso e microfauna) presentes neste.

Em relação ao papel da vegetação do planeta no ciclo global do C, Martinelli (1996) ressalta que as florestas, especificamente, são de extrema importância. Dos 560 Pg de C estocados na vegetação, cerca de 75% encontra-se estocado em florestas. Deste modo, o Conselho Científico do Governo Federal sobre Mudanças no Meio Ambiente (WBGU¹ apud MADEIRA, 2002) afirma que as plantações florestais são consideradas como sumidouros rápidos de C, assumindo um papel de armazenar temporariamente o C emitido. No entanto o

¹ WBGU (1998). *The account of biological sinks and sources under the Kyoto Protocol: a step forwards or backwards for global environmental protection*. Germany: Sondergutachten Bremerhaven.

papel e a importância da floresta como fontes ou sumidouros de C provavelmente variam com a região, o tipo de floresta e a idade das árvores.

Nobre e Nobre (2002) também ressaltam o grande papel da biota terrestre como principal sumidouro do excesso de C atmosférico. Os autores estimam que esse sumidouro tenha sido responsável por retirar $1,9 \text{ Gt ano}^{-1}$ de C da atmosfera na década de 80 e por um valor ainda maior na década de 90.

Segundo Soares e Oliveira (2002) é necessário conhecer os estoques de C nos diferentes compartimentos da floresta (parte aérea das árvores, sistema radicular, sub-bosque, solo, entre outros) para se ter ciência do seu potencial de seqüestro, bem como a sua viabilidade econômica.

Para Madeira et al. (2002), as plantações florestais podem acumular grandes taxas de C, principalmente quando são compostas por espécies de rápido crescimento em solos com baixo índice de C. Soares e Oliveira (2002) consideram que o gênero *Eucalyptus* seja importante para o seqüestro de C, pelo seu rápido crescimento e alta produtividade. Como o eucalipto é geralmente plantado para a produção de madeira para energia e/ou celulose, as árvores são cortadas com aproximadamente cinco a seis anos de idade. Considerando esse período de corte, Madeira et al. (2002) afirmam que a importância desses plantios para o seqüestro de C é diminuída. No entanto, quando um dos objetivos do reflorestamento for contribuir para o seqüestro desse elemento, uma alternativa interessante é a condução de rotações mais longas, de 20 a 30 anos, para que esta madeira seja destinada à produção de móveis.

Como ressaltado anteriormente, o solo também tem sua importância no ciclo global do C. Batjes (1996) afirma que o estoque de C no solo compreende o C orgânico (estimado em 1550 Pg) e o C inorgânico (estimado 750 Pg), ambos até 1m de profundidade. A partir destas

estimativas, Lal (2002) aponta que o "*pool*" total de C do solo é 2300 Pg, ou seja, 3,0 vezes o "*pool*" atmosférico, que é de 770 Pg e 3,8 vezes o "*pool*" biótico, que é de 610 Pg.

O C do solo é um componente muito significativo do acúmulo total do carbono em florestas nativas e em plantações florestais, mas até meados da década de 90 recebeu menos atenção do que o C nos diferentes componentes da árvore (TURNER e LAMBERT, 2000). Dos reservatórios de C na biosfera, passíveis de sofrerem as maiores interferências, a matéria orgânica do solo armazena cerca de três vezes mais C do que a vegetação terrestre ou a atmosfera. O C que chega ao solo é usado para a manutenção e crescimento da biomassa dos pequenos organismos (imobilização), parte se estabiliza na forma de substâncias húmicas (humificação) e parte é mineralizada, transformando-se em substâncias minerais solúveis ou gasosas, como gás carbônico (CERRI et al., 1992).

O estoque de C na vegetação é obtido por meio de sua concentração existente nos diferentes compartimentos, multiplicando pela massa dos mesmos (SANTOS et al., 2001), por isso é muito importante se ter uma boa estimativa da biomassa. Para estimar o estoque de C no solo é necessária a concentração deste elemento em cada camada amostrada, considerando a densidade do solo e a espessura de cada camada (GRAÇA, 1997).

2.5 Nitrogênio no Biossólido

A produtividade primária é determinada pela interação entre o metabolismo do C e do N. Estes dois processos estão estreitamente interligados, uma vez que; para haver a fixação do C, é necessária a Rubisco (mais de 50% é nitrogênio) e para a fixação do N é necessária a energia proveniente da fotossíntese (SEEMANN et al., 1987).

De acordo com Salisbury e Ross (1994) apud Torres (2003), de um modo geral, os fatores que favorecem a fotossíntese, como umidade, temperatura, luz solar e concentração de CO₂ adequados, também estimulam a fixação do N.

Como ressaltado anteriormente, o biossólido por ser rico em N, pode fornecer este elemento às plantas em quantidades satisfatórias. Sendo assim, presume-se que este resíduo possa aumentar a produção de biomassa.

Andrade (2004), trabalhando com quatro diferentes tipos de biossólido (biossólido anaeróbio condicionado com cal e cloreto férrico e desidratado mecanicamente; biossólido anaeróbio condicionado com polímero sintético e desidratado mecanicamente; biossólido anaeróbio seco termicamente e biossólido proveniente de lagoas de estabilização, condicionado com polímero sintético e desidratado mecanicamente), verificou que o N presente neste tipo de resíduo está, predominantemente, na forma de compostos orgânicos.

Vaz (2000) e Guedes e Poggiani (2003), na mesma área desta pesquisa (experimento I), ao avaliarem o efeito da aplicação de biossólido sobre os teores foliares de nutrientes, quando o povoamento de *Eucalyptus grandis* era jovem, constataram maiores teores de N e S no tecido foliar. Guedes e Poggiani (2003) verificaram ainda que o resíduo propiciou aumento nos teores de P e Ca nas folhas.

Rezende (2005) constatou que, no sub-bosque de parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* que receberam biossólido, os teores e estoques de N aumentaram na serapilheira acumulada sobre o solo e nas gramíneas do sub-bosque. A autora verificou ainda que a biomassa vegetal aérea aumentou com a adição do resíduo.

Vaz (2000) também reportou que o biossólido aumenta a biomassa vegetal. O autor afirma que houve uma resposta quadrática em termos de produção de madeira de *Eucalyptus grandis* com a elevação das doses de 0 a 40 t ha⁻¹ de biossólido.

De acordo com Melo et al. (2001) a recomendação da quantidade de biossólido a ser aplicado no solo, é normalmente feita em função dos teores de N presente neste resíduo. Vieira e Cardoso (2003) mencionam que, além disso, são considerados os requerimentos desse nutriente na cultura e feito um estudo de mineralização desse resíduo em laboratório com temperatura e umidade controladas. Baseado nisso, os últimos autores avaliaram a variação do N mineral, no período de seca e das águas, em solo cultivado com milho, após a incorporação crescente de lodo de esgoto e concluíram que a aplicação do resíduo de acordo com a recomendação descrita anteriormente pode ocasionar perdas de N do solo, principalmente no início do ciclo vegetativo da cultura, com conseqüências danosas para o meio ambiente.

No estudo que Velasco-Molina (2004) realizou na área do experimento I da presente pesquisa, foi verificado que, embora a aplicação de biossólido em quantidades superiores a 20 t ha⁻¹ tenha favorecido o aumento de N total em profundidade no solo, este incremento não supõe riscos ambientais diferentes dos decorrentes da fertilização mineral.

2.6 O Índice de área Foliar

De acordo com Bonan (1993), o índice de área foliar (IAF) é um importante parâmetro que estima muitos processos físicos e biológicos da vegetação, como: a fotossíntese, respiração, transpiração, ciclagem de nutrientes e de carbono e interceptação da água da chuva. Alguns autores como Tomé e Pereira (1991)² e Beadle e Inions (1990)³ apud Smethurst et al. (2003) assumem que o IAF é um fator determinante para a produtividade do

² TOMÉ, M., PEREIRA, J. S. (1991). Growth and management of eucalypts plantations in Portugal. In: RYAN, P.J. *Proceedings of the Trird Australian Forest Soils and Nutrition Conference on Productivity in Perspective*. Sydney: Forestry Commission NSW.

³ BEADLE, C. L., INIONS, G. (1990). Limits to growth of eucalypts and their biology of production. In: DARGAVEL, J., SEMPLE, N. *Prospects for Australian Forest Plantations*. Australian National University.

sistema. Eles ressaltam que em algumas plantações jovens de eucaliptos, acima de três anos de idade, existe uma estreita relação entre o IAF e a produção de biomassa. No entanto, Linhares et al. (2000), ao caracterizarem a relação entre volume de madeira e o IAF, em plantios adultos e densos de pinos, não encontraram correlação entre as duas variáveis.

XAVIER et al. (2002), ao avaliarem como o IAF varia ao longo do tempo do ciclo de crescimento em cinco clones de *Eucalyptus grandis*, concluíram que as relações entre as duas variáveis foram distintas para os clones analisados. Eles afirmam que nos clones em que houve o decréscimo do IAF com a idade, isso ocorreu devido ao fato de o incremento corrente anual, medido regularmente pelo inventário florestal, atingir seu pico entre 3 e 4 anos, decrescendo sensivelmente quando se aproxima do período de corte (7 anos). Houve clones em que a relação entre o IAF e a idade não foi significativa.

O IAF pode ser estimado por métodos diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a área foliar é estimada a partir de medidas métricas (largura, comprimento, área e perímetro) e de peso realizados sobre as folhas. XAVIER et al. (2002) ressaltam que os métodos indiretos são, usualmente, baseados na medição da atenuação de radiação pelo dossel, a partir da teoria de transferência de radiação. Esses mesmos autores salientam que, apesar de demorados e trabalhosos, os métodos diretos são mais precisos.

2.7 A Fotossíntese

A fotossíntese é o processo pelo qual, as plantas produzem as substâncias que necessitam, utilizando a radiação solar (O'BRIAN e O'BRIAN, 1995). O processo fotossintético das plantas ocorre nos cloroplastos e resulta na liberação de oxigênio molecular (O_2) e na captura de CO_2 da atmosfera, que é utilizado para sintetizar carboidratos. (MARTINEZ, 2002).

Pela fotossíntese, a energia radiante é absorvida e transformada em energia de ligação química: 479 kJ de energia química são fixados por cada átomo grama de C assimilado. Durante o processo de assimilação do C, tomam parte processos fotoquímicos dirigidos pela luz, processos enzimáticos não dependentes da radiação (as chamadas reações do escuro) e os processos de difusão, que são as trocas de CO₂ e O entre o cloroplasto e a atmosfera (LARCHER, 2000).

Muitos são os fatores ambientais que podem afetar a fotossíntese, mas fundamentalmente a energia radiante incidente, temperatura, disponibilidade de água e nutriente (GHOLZ e LIMA, 1997). Alguns autores como Evans (1989) e Harrington et al. (1989) ressaltam que as taxas máximas da fotossíntese são fortemente relacionadas com as concentrações de nitrogênio (N) na folha, porém Evans (1989) afirma que essa relação depende do tipo de folha e condições de crescimento.

A forte relação entre o N e a fotossíntese se dá devido os cloroplastos conterem mais de 50% do N foliar (SEEMANN et al., 1987), principalmente como parte da Rubisco (PIMENTEL, 1998). A Rubisco é uma enzima que catalisa a reação de carboxilação, que é uma das fases da fixação do C (fotossíntese) nas plantas de ciclo C₃ (LARCHER, 2000), como é o caso do *Eucalyptus grandis*. PIMENTEL (1998) ainda ressalta que o N é imprescindível para a formação das membranas dos tilacóides e pigmentos do cloroplasto.

Larcher (2000) apontando as características marcantes das plantas com diferentes vias de fixação de CO₂, baseado em Black (1973)⁴; Osmond (1978)⁵; Kluge e Ting (1978)⁶ e

⁴ BLACK, C. C. (1973). Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO₂ uptake. *Annual Review Plant Physiology*, v. 24, p. 253-86.

⁵ OSMOND, C. B. (1978). Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context. *Annual Review Plant Physiology*, v. 29, p. 379-414.

⁶ KLUGE, M. TING, I. P. (1978). Crassulacean acid metabolism. Analysis of an ecological adaptation. Berlin: Springer.

Sestak (1985)⁷, mostra que nas plantas do ciclo C₃ a capacidade fotossintética líquida é de baixa a alta enquanto que nas plantas do ciclo C₄ essa capacidade é de alta a muito alta.

Ao verificar, em condições de casa de vegetação, alguns aspectos relacionados à fotossíntese, Torres (2003) encontrou, para quatro espécies de plantas C₃ em estudo, valores de taxa fotossintética líquida relativamente baixos.

Num estudo sobre a taxa de fotossíntese líquida de mudas de *E. citriodora* e *E. grandis* cultivadas em vasos com diferentes níveis de água, Silva et al. (2001) verificaram que, com 70 dias após o transplante das mudas, os eucaliptos apresentaram em média 1,529, 1,992 e 2,579 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para 20, 23 e 26% de água no solo, respectivamente. Nesse mesmo estudo foi detectado que a maior taxa de fotossíntese líquida foi em folhas do terço superior dos eucaliptos.

Com o objetivo de determinar as taxas fotossintéticas máximas e as respostas da fotossíntese com relação ao déficit de pressão de vapor em sete clones de eucaliptos de alta produtividade, selecionados em vários estados do Brasil, Marrichi et al. (2005) verificaram que não houve diferença estatística entre as taxas fotossintéticas dos clones, que em média foram de 29 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Alguns trabalhos têm mostrado que o crescimento da planta e a taxa fotossintética são positivamente correlacionados (PENG e KRIEG, 1992). Porém, outros têm mostrado que o crescimento da planta não está, necessariamente, correlacionada com a taxa fotossintética (MATA-GONZÁLEZ et al., 2002). Esses mesmos autores ao verificarem como a assimilação de CO₂ e a área foliar de gramíneas de deserto são afetadas pela aplicação do biossólido, perceberam que esta resposta varia com o suprimento de água e a espécie em questão.

⁷ SESTÁK, Z. (1985) Photosynthesis during leaf development. Junj, Dordrecht.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O presente estudo foi conduzido na Estação Experimental de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", localizada no município de Itatinga - SP, entre os paralelos 23° 02' 01" e 23° 02' 30" latitude sul e os meridianos 48° 38' 34" e 48° 37' 30" latitude oeste de Greenwich, com altitude média de 830m.

Figura 1 - Localização da área experimental

3.2 Condições Edáficas

O solo das áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, com textura médio-arenosa, relevo suavemente ondulado. Apresenta baixos teores de

nutrientes (Tabela 1). Esse tipo de solo é um dos mais representativos das áreas onde, hoje, é praticada a silvicultura de eucalipto no Estado de São Paulo.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo do experimento 1, em diversas profundidades (Pf), antes da aplicação do bio sólido.

Pf	pH	M.O.	*P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	Sat. Al
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%	%
0-5	3,4	47	4	0,9	1	1	128	24	3	131	2	89
5-10	3,7	21	5	0,2	1	1	68	15	2	70	3	87
10-20	3,8	17	4	0,2	1	1	58	12	2	60	4	84
20-40	3,9	14	3	0,2	2	1	47	8	3	50	6	71

Pf	Cu	Zn	Mn	Fe	S	B	Areia	Silte	Argila	D A	D R
cm	-----mg dm ⁻³ -----						-----%-----			-----g cm ⁻³ -----	
0-5	1,0	1,4	1,8	87	5	0,07	88	4	8	1,25	2,30
5-10	1,4	0,6	0,8	76	7	0,06	85	5	10	1,26	2,30
10-20	1,0	0,8	0,4	68	10	0,07	85	5	10	1,21	2,30
20-40	1,2	0,4	0,4	55	13	0,06	85	5	10	1,30	2,33

*P = resina, conforme (Raij et al., 2001)

O tipo de solo em questão é naturalmente muito intemperizado e pouco fértil, por isso observam-se valores extremamente baixos de P disponível, de K, Ca e Mg trocáveis, além de elevada saturação por Al, baixo pH e baixos teores das frações de textura mais fina. Além disso, na área foram conduzidas, por aproximadamente cinquenta anos, seguidas rotações de *Eucalyptus saligna* sem qualquer reposição dos nutrientes via adubação.

3.3 Condições Climáticas

De acordo com a classificação de Köppen, o clima do local é do tipo mesotérmico úmido, com precipitação média mensal do mês mais seco entre 30 e 60 mm. A temperatura mínima anual é de 12,8°C e média anual de 19,4°C. A umidade relativa média anual é de

83,3%, e a precipitação média anual é de 1635 mm. O balanço hídrico apresenta um excedente de 762 mm, e 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.

3.4 Condições Florísticas

A vegetação natural da região é o cerrado, sendo que a maior parte da estação era ocupada por cerrado *sensu stricto*. Atualmente, existem algumas manchas desse tipo de vegetação, mas predominam culturas florestais de eucaliptos e pinheiros.

3.5 Experimento I: Povoamento com Cinco Anos

Este experimento foi desenvolvido no talhão 16 e nele foram coletados dados necessários para avaliar os estoques de C e N nas árvores, na serapilheira acumulada, no bio sólido remanescente e no solo até 60 cm de profundidade, e a área foliar dos eucaliptos. Conforme ressaltado na introdução, esse trabalho faz parte de um programa de pesquisa, que resultou em várias dissertações e teses desenvolvidas na mesma área experimental. No experimento I foram realizadas as seguintes dissertações e teses (ANDRADE, 1999; VAZ, 2000; GUEDES, 2000; MARTINS, 2002; ROCHA, 2003; ANDRADE, 2004; VELASCO-MOLINA, 2004, GUEDES, 2005). Assim, esses trabalhos são fontes de dados multidisciplinares coletados nas mesmas condições experimentais, em diferentes épocas de desenvolvimento da plantação de eucalipto.

3.5.1 Implantação, caracterização e aplicação do bio sólido

A área deste talhão experimental era ocupada por um povoamento de *Eucalyptus saligna* com idade aproximada de cinquenta anos e submetido a vários ciclos de corte. Para implantar este experimento, a madeira foi colhida e a área reformada com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis*, em março de 1998, no sistema de cultivo mínimo.

O biossólido utilizado neste experimento foi proveniente da ETE de Barueri, região metropolitana de São Paulo. A caracterização físico-química e manutenção da qualidade do biossólido foram de responsabilidade da SABESP. Para isso, a mesma levou em consideração o estabelecido pela norma norte-americana 40 CFR Part 503, elaborada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 1984) e pela norma do Estado de São Paulo (CETESB, 1999).

Na ETE, o esgoto passou por um tratamento biológico, que consiste na digestão aeróbia utilizando ar difuso durante a fase de decantação, e digestão anaeróbia dos lodos primários e secundários. Após isso houve o condicionamento químico com cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e cloreto férrico (FeCl_3) e desaguamento na fase final, deixando o resíduo (biossólido) com, aproximadamente, 60% de umidade.

A densidade de coliformes fecais no resíduo utilizado foi inferior a 2×10^6 NMP g ST⁻¹ (Número Mais Provável por grama de Sólidos Totais), sendo caracterizado como biossólido tipo B (CETESB, 1999). É válido ressaltar que o processo de estabilização com cal é aceito pelo órgão controlador como eficiente na redução de patógenos e a densidade dos organismos indicadores ficou abaixo do limite permitido.

Em julho de 1998, o biossólido foi aplicado a lanço, em cobertura, entre as linhas de plantio (faixa de 2 metros), deixando, aproximadamente, meio metro de distância das mudas. A composição do biossólido usado é mostrada na Tabela 2. Logo depois que o material foi depositado no campo, aproximadamente um mês antes da distribuição, foi realizada a amostragem para caracterização do biossólido. Foram coletadas oito amostras simples no monte estocado, nos quatro lados, em superfície e em profundidade, para compor uma amostra que foi levada ao laboratório.

Tabela 2 - Composição do biossólido alcalino. Valores totais expressos em base seca.

N	P	K	C. O	Ca	Mg	SO ₄ ⁻	C/N	pH
-----g Kg ⁻¹ -----								(em CaCl ₂)
19	9	2	172	86	4	7	9	10,6
Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb	
-----mg Kg ⁻¹ -----								
55056	900	258	1632	-	258	222	82	

- não detectado; C. O: Carbono Orgânico; análises realizadas segundo Eaton et al. (1995).

Ao analisar a composição do biossólido utilizado, verifica-se que seus atributos (pH, relação C/N e macronutrientes) são semelhantes aos valores médios apresentados em Andrade (2004). Esse autor, baseando-se na revisão de trabalhos da literatura, apresenta a composição média de parâmetros de biossólidos utilizados em experimentos no Estado de São Paulo, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios e desvio padrão de alguns parâmetros químicos de interesse agrônomo, calculados a partir dos resultados de análises químicas de biossólidos utilizados em experimentos no Estado de São Paulo. Valores expressos em base seca (Andrade, 2004).

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão
pH	9,1 ± 2,3
C-orgânico (g kg ⁻¹)	189 ± 70
N-total (g kg ⁻¹)	21,5 ± 7,0
C/N	9 ± 3
P-total (g kg ⁻¹)	10,8 ± 6,1
K-total (g kg ⁻¹)	1,4 ± 0,5
Ca-total (g kg ⁻¹)	102,8 ± 75,5
Mg-total (g kg ⁻¹)	4,0 ± 2,3
S-total (g kg ⁻¹)	10,1 ± 4,4

3.5.2 Delineamento experimental e definição dos tratamentos

O experimento foi implantado em quatro blocos casualizados, definidos em função da declividade da área. Foram aplicados 5 tratamentos com 4 repetições, totalizando 20 parcelas. Cada parcela possui 600 m^2 (30×20) e foi constituída por 10 linhas de 20 m de comprimento cada. Na linha as plantas foram espaçadas em 2m e nas entrelinhas em 3m, totalizando 100 plantas por parcela. A posição das parcelas dentro de cada bloco foi definida por sorteio. A área útil da parcela considerou as 36 plantas centrais, descontando-se a bordadura dupla, ou seja, uma área efetiva de amostragem de 216 m^2 .

Os cinco tratamentos avaliados foram:

- 1) testemunha absoluta, sem adubação e sem aplicação de biossólido (T);
- 2) adubação mineral (AD);
- 3) 10 t ha^{-1} de biossólido complementado com K e P no plantio (10+KP);
- 4) 20 t ha^{-1} de biossólido complementado com K (20+K) e
- 5) 40 t ha^{-1} de biossólido complementado com K (40 + K).

As doses de biossólido foram calculadas em base seca. No entanto, o material foi aplicado úmido. 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 biossólido 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.

A adubação mineral no tratamento “AD” foi realizada conforme descrito por Vaz (2000). Essa adubação propiciou a entrada das seguintes quantidades dos nutrientes que foram

analisados nesta pesquisa com a aplicação dos fertilizantes: 98 kg ha⁻¹ de N, 35 kg ha⁻¹ de P, 357 kg ha⁻¹ de Ca, 163 kg ha⁻¹ de Mg, 16 kg ha⁻¹ de S e 2,1 kg ha⁻¹ de Zn.

A complementação com K mineral (KCl, 60% de K₂O) foi necessária em todos os tratamentos onde foi aplicado biossólido, porque o teor desse elemento no resíduo é baixo, assim como no solo da área experimental. O KCl foi colocado em cada tratamento, de acordo com a dose de biossólido, até igualar a quantidade de K colocada no tratamento com adubação mineral “AD” (137 kg ha⁻¹). Desse modo, com o aumento da dose de biossólido foi adicionado menos K mineral. Para a suplementação de P nas parcelas do tratamento "10+KP" foi utilizada a formulação 0-45-0, aplicando-se 80 kg ha⁻¹ no sulco do plantio.

O sistema de amostragem seguiu delineamento sistemático durante a realização das coletas das amostras, que foram sempre realizadas dentro da área útil das parcelas.

A FOTO 5 mostra o biossólido alcalino aplicado nas entre linhas do plantio de eucalipto na área do experimento I. Observa-se também uma grande quantidade de resíduos vegetais proveniente do plantio anterior, por se tratar do sistema “cultivo mínimo”.

Foto 5 - Fase inicial do experimento I: o biossólido alcalino aplicado entre as linhas de plantio de *Eucalyptus grandis* sob cultivo mínimo

3.5.3 Estoque de C e N na biomassa florestal

Para determinar a biomassa e o conteúdo de C e N em cada componente das árvores, foram abatidas duas árvores por parcela, em março de 2003, quando as árvores completaram cinco anos de idade. O critério adotado para selecionar as árvores a serem abatidas foi a representação das classes de maior frequência. Foram abatidas oito árvores por tratamento, totalizando quarenta indivíduos.

Para determinação da biomassa do lenho e casca, foi realizada cubagem rigorosa das árvores abatidas, calculando-se os volumes com e sem casca, e a densidade básica (método da balança hidrostática) desses componentes. Foram coletados discos com casca da base da árvore e a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, além de mais um disco na altura do DAP. Esses discos, que tinham aproximadamente 2 cm de espessura, foram levados ao laboratório, medidos os diâmetros com e sem casca para calcular o volume pela fórmula de Smalian, e logo após foi retirada uma cunha de cada disco. As cunhas dos discos de cada árvore foram processadas juntas para se obter uma amostra representativa de todo o comprimento do lenho. Após processamento foram juntadas quantidades equivalentes das duas árvores de cada parcela para compor uma amostra de lenho por parcela para análise química. As cascas dos discos das árvores também foram submetidas ao mesmo procedimento anterior para compor uma amostra de casca por parcela.

Todas as folhas e os galhos de cada árvore foram separados no campo e tiveram o peso fresco total determinado utilizando balança de 10 kg com precisão de 50 g. Foram retiradas amostras que também foram pesadas (balança de 1 kg com precisão de 5 g), acondicionadas e levadas ao laboratório para determinação do peso seco e realização das análises químicas.

A mineralomassa de C e N de cada componente das árvores foi calculada multiplicando-se a biomassa, estimada por equações alométricas aplicadas em todas as

árvores da área útil de cada parcela, pelo respectivo teor de cada nutriente analisado nas amostras da parcela.

As análises químicas de material vegetal foram realizadas após o material ser seco a 65 °C em estufas de ventilação forçada até peso constante, e trituração em moinho tipo Wiley (peneira de 20 mesh = 0,8 mm). O C foi determinado por oxidação via úmida e o N foi determinado por titulação após digestão em micro- Kjeldhal.

3.5.4 Estoques de C e N na serapilheira e no biossólido

A serapilheira acumulada sobre o solo (manta florestal) foi determinada utilizando moldura de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m), com o auxílio de um facão. Foram coletadas, nas entre-linhas de plantio, três amostras por parcela, totalizando doze repetições por tratamento para a variável biomassa. As três amostras de cada parcela foram processadas juntas para compor uma amostra para realizar a determinação química dos nutrientes.

A coleta do biossólido foi realizada seguindo a diagonal da área útil das parcelas, sendo coletadas três amostras em cada uma, totalizando doze repetições por tratamento. Cada amostra foi coletada em área de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m), com o auxílio de um gabarito, de uma pequena pá e de duas peneiras (malhas de 2 mm e 1 mm), separando o biossólido em duas frações (a: > 2 mm; b: >1 e ≤ 2 mm). Antes da coleta, a área foi limpa manualmente, retirando-se, cuidadosamente, a serapilheira e a vegetação de sub-bosque que existiam no local. Após o peneiramento, a fração > 2 mm ficou constituída praticamente por biossólido puro. A fração mais fina ficou “contaminada”, principalmente por uma serapilheira bem fina e também, inevitavelmente, por um pouco de terra.

As análises do biossólido foram realizadas no após secagem a 40 °C em estufas de ventilação forçada até peso constante e moagem do material em cadinho com pistilo. As

determinações dos teores totais dos nutrientes foram realizadas no Laboratório de Química Ambiental do Departamento de Química Ambiental da ESALQ, após digestão Kjeldhal para N e combustão via seca para o C.

3.5.5 Estoque de C e N no solo

Foram coletadas cinco amostras de terra nas entrelinhas de cada parcela, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-60 cm, para compor uma amostra por profundidade por parcela. Foram coletadas duas amostras indeformadas para análise da densidade, no meio das mesmas profundidades anteriores, dentro da área útil da parcela, utilizando anéis de 65 cm³ (2,5 cm de diâmetro e 3,3 cm de altura).

As análises da terra coletada foram realizadas após secagem a 40 °C em estufas de ventilação forçada até peso constante e peneiramento em malha de 2 mm (9 mesh). Os teores totais de C e N foram determinados em equipamento auto-analisador Leco após reprocessamento das amostras em almofariz até se atingir granulometria com textura de pó (100 mesh). Foram também determinados teores de C pelo método de Walkley e Black modificado (ANDRADE, 2004).

Os teores de N mineral (NO^{-3} e NH^{+4}) foram determinados de acordo com Mulvaney (1996).

3.5.6 Determinação da Área Foliar

Das árvores abatidas para realização de cubagem rigorosa foram coletadas amostras, com aproximadamente sessenta folhas, do segundo e terceiro par de folhas de ramos do terço superior das copas. As folhas tiveram suas áreas determinadas pelo medidor de área foliar (*LI-3100*, Licor NE, USA). Em seguida, a amostra de folhas foi levada à estufa de circulação

forçada de ar, a 65 °C, até obter massa constante, e calculou-se a área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ de massa seca) da amostra de cada árvore. Multiplicando-se esse valor pela massa total, base seca, de folhas da árvore, calculou-se a área foliar de cada árvore. Para calcular o IAF em cada parcela estudada, multiplicou-se a média da área foliar das duas árvores abatidas em cada parcela pelo número de árvores remanescentes na área útil de cada parcela.

3.5.7 Análise dos dados

Os dados obtidos para todas as variáveis do experimento I foram inicialmente submetidos à análise exploratória, utilizando técnicas descritas por Alves et al. (1993), para verificar as pressuposições necessárias a cada análise, a necessidade de transformação dos dados ou de realização de análises não paramétricas.

As variáveis respostas referentes ao conteúdo de nutrientes nos componentes das árvores, assim como a biomassa, foram analisadas por meio da Análise de Variância. As comparações entre as médias foram realizadas por meio dos Intervalos de Confiança construídos com 95% de certeza.

Para estimativa da biomassa das árvores foram utilizadas equações alométricas de um modelo exponencial, derivadas de funções de variação selecionadas e ajustadas por Guedes (2005), por meio da cubagem rigorosa das árvores, aos cinco anos de idade, utilizando modelos globais para todas as árvores abatidas ($n=40$). Foram utilizados valores de biomassa seca em quilos por árvore, DAP (diâmetro à altura do peito) em centímetros, HT (altura total) em metros e volume em metros cúbicos.

A resposta final em biomassa por hectare, originou-se da conversão a partir da biomassa da área útil da parcela, resultado da soma dos valores obtidos com a aplicação das equações ajustadas sobre as 36 árvores da área útil de cada parcela.

Também foram realizados testes de correlação, assim como foram calculados índices utilizando a proporção entre as variáveis. O Coeficiente de Utilização Aparente (eq.(1)), calculado conforme Labrecque et al. (1995), indica as proporções dos nutrientes contidos nos fertilizantes e biossólido que foram imobilizados nos eucaliptos.

Coeficiente de Utilização Aparente:

$$CUA = 100 (CEt - CEc) / CEDb \quad (1)$$

em que:

CEt é o conteúdo do elemento nas árvores em cada tratamento;

CEc é o conteúdo do elemento nas árvores do tratamento controle;

CEDb é o conteúdo do elemento na dose de biossólido aplicada em cada tratamento.

3.6 Experimento II - Povoamento Recém Implantado

Este experimento foi desenvolvido no talhão 37 e nele foram coletados dados necessários para avaliar a fotossíntese, a área foliar e teores de nutrientes nas folhas, e o desenvolvimento das plantas. Foram avaliadas cinco plantas em cada parcela, formando um “X” no centro da área útil das mesmas, três meses após o plantio das mudas.

3.6.1 Implantação, caracterização e aplicação do biossólido

A área deste talhão experimental era ocupada por um povoamento de *Eucalyptus grandis* com idade aproximada de sete anos. Para implantar este experimento, a madeira foi colhida e a área reformada com mudas originadas de sementes de *Eucalyptus grandis*, em abril de 2003, no sistema de cultivo mínimo.

O material utilizado neste experimento foi proveniente da estação de tratamento de Barueri, região metropolitana de São Paulo. Semelhante ao biossólido do experimento anterior, o resíduo utilizado nesta área experimental foi proveniente do tratamento biológico do esgoto (digestão aeróbia + digestão anaeróbia). No entanto, o condicionamento químico foi diferente do anterior, pois em setembro de 2000 a SABESP passou a utilizar um polieletrólito em vez de cal e cloreto férrico, deixando assim de produzir o biossólido alcalino para produzir o biossólido polimerizado. Após o desaguamento (fase final), o resíduo (biossólido) apresentava aproximadamente, 70% de umidade.

Em abril de 2003, o biossólido polimerizado foi aplicado em cobertura, em uma faixa de aproximadamente 40 cm ao longo da linha de plantio, buscando localizar o material mais próximo às mudas, para facilitar a absorção dos nutrientes, principalmente do fósforo, pelas raízes das plantas jovens. A aplicação foi realizada utilizando baldes calibrados. A composição química deste biossólido está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição do biossólido polimerizado. Valores totais expressos em base seca.

N	P	K	C. O	Ca	Mg	SO ₄ ⁻	C/N	pH
-----g Kg ⁻¹ -----								(em CaCl ₂)
32,7	14,3	2,2	292	25,2	4,9	6,6	9	7,3
Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb	
-----mgKg ⁻¹ -----								
39390	570	194	2381	8,3	ND*	399	186	

ND* abaixo do limite de detecção; C. O: Carbono Orgânico; analisado de acordo com Eaton (1995).

A amostragem para caracterização do biossólido foi realizada logo depois que o material foi depositado no campo. Foram coletadas oito amostras simples no monte estocado, nos quatro lados, em superfície e em profundidade, para compor uma amostra que foi levada ao laboratório.

Ao comparar a composição do biossólido polimerizado com os valores médios da tabela 3 apresentados por Andrade (2004), assim como com o biossólido utilizado no

experimento I, verifica-se que o pH é menor (≈ 2 unidades). Esse bioossólido está próximo da neutralidade, refletindo a substituição da cal pelo polímero, e a mudança no tratamento do bioossólido que tinha caráter alcalino. A relação C/N é bem próxima, o teor de P neste bioossólido é bem maior que no outro e do que a média apresentada por Andrade (2004), enquanto que a concentração de Ca é bem menor. Os teores de Fe e o Cu são menores e o de Mn é maior quando comparados com o bioossólido anterior.

A substituição da cal pelo polímero, do ponto de vista da utilização do bioossólido em florestas, tem aspectos positivos e negativos. A utilização do polímero melhora os teores de alguns nutrientes como o fósforo e nitrogênio e reduz custos de transporte, já que é utilizado em quantidade muito menor do que a cal. Por outro lado, o bioossólido perde o caráter alcalino e o poder de correção da acidez do solo, podendo ocasionar inclusive a diminuição do pH, além de perder também a garantia que a utilização da cal proporciona em relação à desinfecção do material.

3.6.2 Delineamento experimental e tratamentos

Este experimento foi implantado em três blocos casualizados, definidos em função da declividade da área. Foram aplicados 4 tratamentos, totalizando 12 parcelas. Cada parcela possui 384 m² (24m x 16m) e foi constituída por 8 linhas de 16 m de comprimento. Na linha as plantas foram espaçadas em 2m e nas entrelinhas em 3m, totalizando 64 plantas por parcela. A posição das parcelas dentro de cada bloco foi definida por sorteio. A área útil da parcela ficou igual à do experimento anterior, pois se deixou bordadura simples. Os tratamentos avaliados foram:

- 1) testemunha absoluta, sem adubação e sem aplicação de bioossólido (T);
- 2) 10 t ha⁻¹ de bioossólido polimerizado complementado com K (10+K);

3) 20 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K (20+K) e

4) 30 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K (30 + K).

O resíduo foi aplicado úmido, mas as doses foram calculadas em base seca, como foi mencionado no experimento anterior. A complementação com K mineral (KCl, 60% de K₂O) foi necessária devido ao mesmo motivo ressaltado no experimento anterior. Sendo que a aplicação do KCl seguiu o mesmo procedimento. Nesse experimento, também houve complementação com B mineral.

Devido ao fato do polímero aumentar os teores de alguns nutrientes no lodo, como por exemplo, o fósforo, além do fato de que o resíduo foi aplicado na linha de plantio, não houve nenhum tratamento com fertilização mineral de P.

A FOTO 6 mostra o biossólido polimerizado aplicado nas linhas do plantio de eucalipto na área do experimento II. Por se tratar também de um sistema “cultivo mínimo”, observa-se os resíduos vegetais proveniente do plantio anterior.

Foto 6 - Fase inicial do experimento II: o biossólido polimerizado aplicado nas linhas de plantio de *Eucalyptus grandis* com 3 meses de idade sob cultivo mínimo

3.6.3 Desenvolvimento das plantas

Com o auxílio de uma régua milimetrada e de um paquímetro, foi avaliado o desenvolvimento das plantas por meio de medições do diâmetro do coleto e altura das 5 plantas que compunham o “X” na área útil de cada parcela.

3.6.4 Taxa fotossintética e taxas de trocas gasosas

Foram realizadas medições da taxa fotossintética líquida, da condutância estomática, da concentração inter celular de CO_2 e da transpiração, em julho de 2003, por meio de um analisador por infra-vermelho (IRGA, modelo *LI - 6400*, *Licor, NE, USA*). Foram realizadas cinco medições a partir das 9:00 h, a cada duas horas, sendo que as folhas foram marcadas para que as medições fossem sempre realizadas nas mesmas folhas. Foi avaliada uma folha completamente formada, posicionada a pleno sol, do terço superior de cada copa das cinco plantas selecionadas em cada parcela. As leituras foram realizadas após o coeficiente de variação ficar menor do que um, utilizando o fluxo da bomba controlado em 900 mmolar/seg e pressão de 93 KPa.

O dia em que foram realizadas as medições apresentava céu claro com poucas nuvens. Durante todo o dia não ocorreu nenhum tipo de precipitação, nem houve necessidade de interromper as medições devido à nebulosidade.

3.6.5 Clorofila a e b

Nas 5 plantas da área útil de cada parcela, nas mesmas folhas marcadas para medição da taxa fotossintética, foram determinadas as concentrações de clorofila a e b diretamente no campo, por meio de um clorofilômetro portátil (SPAD). De acordo com Swiader e Moore

(2002), esse aparelho fornece dados baseados no teor de clorofila da folha. Os valores são calculados pela leitura diferencial da quantidade de luz transmitida pela folha em duas regiões de comprimento de onda (650 e 940 nm). A absorção de luz pela clorofila ocorre no primeiro comprimento de onda.

3.6.6 Área foliar

Logo após as medições de clorofila a e b, de cada planta avaliada, foram coletadas amostras de folhas do terço superior da copa, sempre do segundo ou terceiro par de folhas dos ramos, para avaliação da área foliar e de teores de nutrientes. A área foliar foi determinada por meio de leitura fotométrica no próprio local, utilizando um *Licor modelo* LI-3100.

As amostras de folhas foram secas em estufa de ventilação forçada, a 65 °C, para determinação da massa seca e determinação da área foliar específica. Após pesagem, as amostras foram processadas em moinho tipo Wiley, para realização das análises de nutrientes, conforme metodologias descritas em Malavolta (1997).

3.6.7 Análise dos dados

Os dados obtidos para todas as variáveis do experimento II foram inicialmente submetidos à análise exploratória, utilizando técnicas descritas por Alves et al. (1993), para verificar as pressuposições necessárias a cada análise, a necessidade de transformação dos dados ou de realização de análises não paramétricas.

Os dados foram analisados por meio de regressão e de correlação múltipla, utilizando os modelos linear e quadrático (polinomial de primeira ordem). Esses modelos foram escolhidos pois, sob o ponto de vista biológico, a lógica de suas representações poderia se ajustar bem à variação esperada das respostas testadas em função das doses crescentes de

biossólido. As diferenças entre as doses de biossólido foram comparadas por meio dos intervalos de confiança que capturam as médias de cada dose. As diferenças entre médias só são significativas quando os intervalos que capturam as respectivas médias são mutuamente excludentes.

3.7 Monitoramento dos Dados Meteorológicos

Durante todo o período experimental foram registrados, diariamente, dados pluviométricos e as temperaturas máximas e mínimas do ar por meio de instrumentos de uma estação meteorológica, situada na própria Estação Experimental. As áreas experimentais ficam situadas a menos de 1 km da Estação.

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, as médias mensais das temperaturas medidas diariamente às 9:00h e valores totais da precipitação de cada mês do ano de 2003 e as médias mensais das temperaturas máximas (T_{max}) e mínimas (T_{min}) medidas diariamente na Estação Experimental de Itatinga.

Figura 2 - Médias mensais das temperaturas medidas diariamente às 9:00h e valores totais da precipitação de cada mês do ano de 2003.

Figura 3 - Médias mensais das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin) medidas diariamente na Estação Experimental de Itatinga.

Analisando os meses em que foram realizadas coletas e medições nas áreas experimentais, verifica-se que o mês de março de 2003 marcou o fim do período mais chuvoso e quente do ano, a partir do qual começou uma queda abrupta na precipitação e temperatura. O mês de julho, quando, inclusive, foram realizadas as medições de fotossíntese, iniciou o período de três meses mais secos do ano e foi o mês em que foram registradas as menores temperaturas, sendo também o mês com a menor média de temperatura máxima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estoques de C e N nos Compartimentos do Ecossistema

4.1.1 Estoque na biomassa aérea

A biomassa epígea dos eucaliptos aos cinco anos de idade e o carbono e nitrogênio nela estocados são resultados do desenvolvimento das árvores durante esse período, função, principalmente, da capacidade metabólica de suas folhas realizarem fotossíntese e sintetizarem os compostos orgânicos que constituem os tecidos e a massa de seus componentes. O carbono e o nitrogênio são os dois principais nutrientes que constituem a biomassa das árvores. O carbono é absorvido diretamente da atmosfera durante o processo fotossintético e o nitrogênio é absorvido principalmente do solo por meio do sistema radicular. A biomassa aérea total dos eucaliptos é dividida nos seguintes componentes: lenho, casca, galhos e folhas. A estimativa adequada dessa biomassa é fundamental para calcular corretamente os estoques de nutrientes nos eucaliptos, principalmente do componente lenho, que apresenta elevada biomassa e baixos teores de nutrientes.

A análise estatística da variável resposta biomassa epígea do eucalipto mostrou que essa variável foi significativamente ($F=5,0665$; $p=0,0126$) afetada pelos tratamentos. O efeito dos tratamentos sobre a biomassa aérea total das árvores de eucalipto pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Efeito dos tratamentos sobre a biomassa epígea de *Eucalyptus grandis* aos cinco anos de idade. A variação em torno da média ($n=4$) é o intervalo de confiança construído com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K mineral)

Verifica-se por meio da análise dos intervalos de confiança que houve diferenças significativas entre os eucaliptos que receberam adubação mineral (AD) e 10 t ha⁻¹ de biofóssido (10+KP), em relação aos tratamentos testemunha e “20+K”. A aplicação de 10 t ha⁻¹ de biofóssido complementado apenas com P e K mineral foi suficiente para que os eucaliptos produzissem a mesma quantidade de matéria seca epígea do que os eucaliptos que receberam adubação mineral completa. Analisando esses dados pode-se inferir que todos os outros nutrientes (N, Ca, Mg, B e Zn) que foram colocados com a adubação mineral e que, no tratamento “10+KP”, foram provenientes apenas do biofóssido, tiveram suas demandas atendidas com a aplicação do resíduo. Isso mostra que o biofóssido é capaz de suprir as

exigências desses nutrientes para o desenvolvimento dos eucaliptos. Esse mesmo comportamento da biomassa total foi verificado também para a biomassa de tronco (lenho+casca), que representa a produção comercial de madeira, já que não houve alterações na partição da biomassa entre os componentes em função dos tratamentos (Figura 6).

Considerando a biomassa total acima do solo, as árvores de eucalipto do tratamento “10+KP” e “AD” produziram, em média, 107,5 t ha⁻¹. Esse valor é 63% superior do que o valor médio encontrado nas árvores testemunhas. Os valores observados nesse trabalho, para biomassa epígea de eucalipto, estão coerentes com valores encontrados na literatura (POGGIANI, 1985; LACLAU et al., 2000; GUO et al., 2002), mostrando que o desenvolvimento dos eucaliptos no experimento aconteceu dentro do esperado e que foi obtida uma boa produtividade de madeira.

O comportamento dos eucaliptos em cada tratamento em relação ao acúmulo de biomassa é coerente com a avaliação do desenvolvimento das árvores medido por meio de sua volumetria. Desde o início da rotação as medições dos eucaliptos para realização de inventários mostraram maior desenvolvimento das árvores do tratamento “10+KP” (GUEDES, 2005). O inventário realizado aos cinco anos de idade, quando foram colhidas as árvores para quantificar a biomassa produzida, confirmou o padrão de variação observado na biomassa também para a produção de volume de madeira (Figura 5).

Figura 5 - Efeito dos tratamentos sobre a produção de volume comercial de madeira de *Eucalyptus grandis* ao longo da rotação (GUEDES, 2005). tt (testemunha), ad (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Observa-se que desde o início da rotação até os 34 meses de idade, o tratamento em que houve a aplicação de 10 t ha⁻¹ e fósforo no plantio (10+KP) foi o que apresentou o melhor desenvolvimento e maior produção de madeira comercial. Dos 34 aos 60 meses, a taxa de incremento em volume foi maior no tratamento adubação mineral (AD), fato este que fez com que esse tratamento se igualasse ao “10=KP” na última avaliação realizada.

Na Austrália, duas procedências de *E. grandis* foram irrigadas com efluente de uma estação de tratamento de esgoto, sendo que até os 34 meses de idade foi verificado incremento médio de 62,5 m³ ha⁻¹ (POLGLASE e MYERS, 1995). Esses valores estão próximos aos encontrados nesta pesquisa para o tratamento mais produtivo (10+KP) aos 34 meses (Figura 5).

A partição da biomassa total dos eucaliptos entre os componentes não foi alterada pela aplicação de biossólido e/ou fertilizantes. Pode-se observar na Figura 6 que as porcentagens que cada componente representa do total são equivalentes para todos os tratamentos, sendo

que em todos os tratamentos foi mantida a seqüência, lenho >>>> casca > galhos > folhas, para a biomassa acumulada aos cinco anos. Soares et al. (2002) desenvolveram trabalho com objetivo de ajustar equações para estimar com precisão a quantidade de carbono presente na parte aérea de *Eucalyptus grandis* com 6,5 anos de idade e encontraram a mesma seqüência desse trabalho para o acúmulo de biomassa nos compartimentos. Eles constataram que o fuste é o componente da parte aérea com maior quantidade de biomassa e conteúdo de C estocado, seguido dos galhos, da casca e das folhas, sendo que 83% do C estocado na parte aérea foi imobilizado no tronco.

Figura 6 - Partição da biomassa epígea total de eucalipto com cinco anos de idade entre seus componentes, para cada tratamento testado. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 Mg ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 Mg ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 Mg ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

O compartimento lenho representou aproximadamente 75% da biomassa aérea dos eucaliptos em todos os tratamentos.

Os eucaliptos do tratamento “10+KP” acumularam, em média, mais biomassa em todos os componentes, tanto nos troncos quanto nas copas. Considerando os componentes das árvores, esse tratamento propiciou aumentos da biomassa em relação ao controle da seguinte

ordem: 46% para as folhas, 56% para casca, 59% para lenho e 62% para galhos. Para as árvores desse tratamento, que apresentaram maior produtividade, a biomassa total de tronco (lenho + casca) acumulada em cinco anos foi de 94,9 t ha⁻¹, o que resultou em um incremento médio anual (IMA) de 19 t ha⁻¹ ano⁻¹ de madeira com casca. Santana et al. (1999), ao avaliarem três procedências diferentes de *E. grandis* com 6,5 anos em cinco sítios no interior do Estado de São Paulo, encontraram valores variando de 95 a 206 t ha⁻¹ de matéria seca de tronco.

A Tabela 5 mostra os teores de nitrogênio e carbono analisados na matéria seca dos diferentes componentes das árvores, para cada tratamento testado.

Tabela 5 - Valores médios (n=4) dos teores de C e N em componentes de árvores de *Eucalyptus grandis* abatidas nas parcelas de cada tratamento, cinco anos após o plantio.

Componente	tratamento	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)
Lenho	T	43,3	3,9
	AD	42,3	5,0
	10+KP	40,6	5,2
	20+K	42,6	5,9
	40+K	42,7	5,3
Casca	T	-	5,4
	AD	-	5,2
	10+KP	-	6,7
	20+K	-	6,5
	40+K	-	5,9
Galho	T	44,0	7,8
	AD	43,2	6,7
	10+KP	43,0	6,3
	20+K	42,7	9,3
	40+K	42,8	8,2
Folha	T	46,3	22,6
	AD	46,6	22,1
	10+KP	46,4	22,9
	20+K	47,6	25,9
	40+K	47,2	24,8

- não foi possível realizar as análises dos teores de C na casca, devido a amostra desse componente não apresentar quantidade suficiente;

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofóssido complementadas com K mineral).

Verifica-se que os maiores teores, tanto de C quanto de N, foram observados nas folhas, em relação aos outros componentes. Como a maioria dos processos metabólicos, assim como o processo fotossintético dos cloroplastos que resulta na liberação de oxigênio molecular (O_2) e na captura de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, ocorre nas folhas, já era esperado esse resultado. Nesse componente ocorre a síntese dos carboidratos que vão constituir as moléculas orgânicas e a incorporação do C e do N nessas moléculas.

Rezende (2005), ao estudar a influência do bio sólido no sistema “solo - sub-bosque – serapilheira” em parcelas de *Eucalyptus grandis*, também encontrou maiores valores de N em folhas. A autora ressalta que as folhas são metabolicamente mais ativas do que as partes estruturais lignificadas do vegetal, sendo, portanto, esperado que as concentrações de nutrientes, como o N, sejam mais elevadas nas folhas.

Os teores foliares de nutrientes são utilizados para avaliar o estado nutricional das plantas, sendo que sua análise e interpretação é uma importante ferramenta para avaliar o desenvolvimento das culturas e subsidiar o manejo dos ecossistemas.

Devido à participação do N no processo fotossintético e na constituição dos tecidos vegetais, esse é um dos nutrientes mais importantes para o desenvolvimento das plantas. Considerando o gênero *Eucalyptus*, vários estudos pesquisaram a relação de variáveis respostas que representam o desenvolvimento das árvores (H, DAP, volume, biomassa) com os teores de N nos componentes dos eucaliptos. Sgarby (2002), na revisão de literatura de sua dissertação sobre efeito dos nutrientes na produtividade de *Eucalyptus*, cita vários trabalhos que relatam correlações positivas entre os teores foliares de N e o desenvolvimento de diferentes espécies de *Eucalyptus* de diferentes idades.

Ao avaliar os efeitos do bio sólido sobre as taxas de mineralização e de lixiviação de N, as modificações na fertilidade do solo, a nutrição e o crescimento de povoamentos de *E. grandis* em solo não-degradado e degradado, Soares (2003) constatou que o bio sólido

favoreceu o aumento das taxas de crescimento do vegetal nos dois solos em estudo e concluiu que esse aumento foi principalmente pela maior absorção de N pelas árvores.

A análise estatística dos estoques de carbono e nitrogênio na biomassa total de eucalipto acima do solo mostrou efeitos significativos para ambos os elementos ($F=4,1306$; $p=0,0248$ para o C e $F=3,1544$; $p=0,0547$ para o N).

No caso do carbono total estocado nas árvores, a variação em função dos tratamentos seguiu o que foi observado para a biomassa total. Os eucaliptos dos tratamentos “AD”, “10+KP” apresentaram diferenças significativas em relação aos tratamentos “T” e “20+K” (Figura 7).

Figura 7 - Efeito dos tratamentos sobre o estoque de CARBONO na biomassa epígea de *Eucalyptus grandis* aos cinco anos de idade. A variação em torno da média ($n=4$) é o intervalo de confiança construído com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

O maior estoque de C nos eucaliptos ocorreu nos tratamentos “AD” e “10+KP”, que também apresentaram maior produção de biomassa. Esses tratamentos foram os únicos que receberam P mineral, mostrando que essa adição foi importante para o acúmulo de biomassa e nutrientes no eucalipto. Turner e Lambert (2000) chamam a atenção para o fato de que o fósforo é o maior determinador do tipo de vegetação nativa e da produtividade de plantações na Austrália. Esses autores ajustaram equações relacionando o carbono orgânico no solo com o teor total de fósforo na terra, obtendo coeficientes de determinação acima de 0,95.

Ao estudar as mudanças no estoque de C em plantações de *E. globulus* mantidas sob diferentes disponibilidades de água e nutrientes, Madeira (2002) também verificou que o aumento de C na plantação de eucalipto foi largamente associado à produção de biomassa. Apesar de existirem trabalhos que não encontram correlação entre o C e a biomassa é válido ressaltar que esse elemento está tão relacionado à mesma, que alguns trabalhos, como o de Schroeder (1992), com o intuito de verificar o potencial de árvores em estocar esse elemento, avaliaram o carbono por meio de estimativas de volume e biomassa das árvores.

Na Figura 8 pode ser visualizado o efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de N na biomassa epígea total dos eucaliptos.

Figura 8 - Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de NITROGÊNIO na biomassa epígea de *Eucalyptus grandis* aos cinco anos de idade. A variação em torno da média (n=4) é o intervalo de confiança construído com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Verifica-se que, em média, todos os tratamentos apresentaram maiores quantidades de N estocado na bioamassa epígea dos eucaliptos quando comparados com o tratamento testemunha (383 kg ha⁻¹). No entanto, as diferenças só foram significativas em relação aos tratamentos “10+KP” e “AD”. Não houve diferenças significativas entre os tratamentos que receberam biossólido e a adubação mineral, cujo valor médio foi igual a 648 kg ha⁻¹. Isso significa que o biossólido foi capaz de fornecer N tanto quanto a adubação mineral, confirmando que o resíduo pode ser empregado para o suprimento desse nutriente em plantações florestais.

Na Tabela 6 pode-se visualizar o conteúdo de C e N nos componentes das árvores de eucalipto com cinco anos de idade em função dos tratamentos. Os tratamentos não influenciaram de maneira significativa a proporção de imobilização de biomassa e dos conteúdos de carbono e nitrogênio entre os componentes do tronco (lenho + casca) e os componentes da copa (galhos + folhas). A análise estatística dos índices gerados pela relação tronco/copa mostrou ausência de significância tanto para a biomassa seca ($F=0,5800$; $p=0,6827$), quanto para os conteúdos de nitrogênio ($F=1,8973$; $p=0,1757$) e de carbono ($F=0,4320$; $p=0,7829$).

Tabela 6 - Valores médios (n=4) do conteúdo de C e N nos componentes de *Eucalyptus grandis*, cinco anos após o plantio, em função dos tratamentos.

Tratamento	Componente	C (kg ha ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹)
T	Lenho	22.213	203
	Casca	-	37
	Galho	2.200	39
	Folha	1.991	104
AD	Lenho	34.517	403
	Casca	-	54
	Galho	3.370	52
	Folha	2.843	145
10+KP	Lenho	34.145	444
	Casca	-	73
	Galho	3.483	51
	Folha	2.923	152
20+K	Lenho	27.179	375
	Casca	-	52
	Galho	2.519	56
	Folha	2.285	113
40+K	Lenho	30.872	380
	Casca	-	56
	Galho	2.953	55
	Folha	2.596	129

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K mineral)

Apesar de não significativa para níveis muito baixos de probabilidades, houve uma tendência de aumento nas médias dos tratamentos em relação à testemunha, para a razão tronco/copa do conteúdo de N. O tratamento testemunha apresentou valor de 1,7, enquanto que o tratamento adubação mineral foi igual a 2,3 e a média dos tratamentos que receberam biossólido foi 2,5. Isso indica que, proporcionalmente, pode ter havido maior imobilização, até os cinco anos de idade, desse nutriente para a formação de madeira e tronco em relação às copas, nos eucaliptos que receberam fertilizante mineral e biossólido. Segundo Guedes (2005), como os eucaliptos testemunhas apresentaram um atraso no desenvolvimento em relação aos demais, o maior conteúdo de N nas folhas de suas copas aos cinco anos de idade reflete a defasagem que ocorre para a formação do aparato fotossintético quando não há entrada de fertilizantes no ecossistema ou fertilidade natural do solo. Há maior demora no processo, mas os eucaliptos que não são adubados conseguem se estabelecer e extrair os nutrientes necessários para investir na realização da fotossíntese. Isso acontece em detrimento do acúmulo de nutrientes no lenho, o que faz com que os eucaliptos testemunhas apresentem, proporcionalmente, menores conteúdos imobilizados no lenho para a maioria dos nutrientes.

4.1.2 Estoque na serapilheira

Na Tabela 7 são apresentados os valores da biomassa de serapilheira que constituía a manta florestal sobre o solo e o estoque de C e N armazenados nessa serapilheira, cinco anos após o plantio dos eucaliptos. A análise da significância das diferenças entre os tratamentos resultou em valores de $F=2,7650$ e $p=0,0770$ para a biomassa da serapilheira, $F=2,1650$ e $p=0,1349$ para o conteúdo de C estocado na serapilheira e $F=6,7550$ e $p=0,0044$ para o conteúdo de N, cuja variável teve de ser transformada pelo inverso ($CN=1/CN$) para atingir homogeneidade de variância. Observa-se que a variação menos significativa entre os

tratamentos, foi para o conteúdo de C, variável essa com diferenças significativas a um nível de 13% de probabilidade do erro tipo um. Considerando a elevada variação natural dessas medições quando do trabalho de campo, esse é um nível de erro aceitável para se realizar a análise e a discussão estatística. Na Tabela 7 pode-se observar a biomassa e os conteúdos de C e N na manta florestal acumulada sobre o solo.

Tabela 7 - Valores médios (n=12) de biomassa seca, do conteúdo de C e N em serapilheira acumulada sobre o solo em cada tratamento, cinco anos após o plantio dos eucaliptos.

Tratamento	Serapilheira Mg ha⁻¹	C kg ha⁻¹	N kg ha⁻¹
T	12,58	6.351	121
AD	16,75	8.157	164
10+KP	16,50	8.070	163
20+K	14,64	6.940	152
40+K	15,93	7.951	186

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Observa-se que nas parcelas dos tratamentos “AD” e “10+KP” foi acumulada maior quantidade de serapilheira. Esses tratamentos foram os que apresentaram também os maiores valores de biomassa (Figura 4). Já as parcelas que não foram tratadas com biossólido (T) ou adubadas (AD) apresentaram menor quantidade de serapilheira acumulada, refletindo assim a ausência dos nutrientes que entraram no sistema via adubação mineral e biossólido.

O conteúdo de C acompanhou a variação na biomassa de serapilheira. Isso já era esperado, uma vez que esse elemento faz parte da estrutura dos componentes da serapilheira e que não há grandes variações em seus teores. Sendo assim, quanto maior a biomassa de serapilheira, maior será a quantidade de C.

No caso do N, pode-se verificar na Figura 9 que houve diferenças significativas apenas entre o tratamento que recebeu adubação mineral “AD” e o tratamento testemunha “T”.

Figura 9 - Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de nitrogênio na serapilheira acumulada sobre o solo, cinco anos após a aplicação de biofertilizante em povoamento de *Eucalyptus grandis*. São apresentados os valores médios (n=4) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral)

Observa-se que serapilheira das parcelas testemunhas apresentou menores conteúdos de N em sua composição. Isso indica que essa serapilheira das áreas onde não houve entrada de N e outros nutrientes com a aplicação de fertilizante ou do resíduo é mais lignificada e de difícil decomposição pelos organismos do solo, já que tecidos com maiores teores de N normalmente são mais tenros e facilitam o processo de desagregação e mineralização do material orgânico. Pode-se inferir a partir disso que a aplicação de biofertilizante, assim como de

fertilizantes minerais, facilita a decomposição da manta florestal acumulada sobre o solo, conforme foi constatado na mesma área experimental, na fase inicial do experimento, por Guedes (2000).

4.1.3 Estoque no biossólido remanescente

A Tabela 8 mostra a porcentagem do biossólido que foi decomposta e incorporada ao solo cinco anos após a aplicação, em função da razão entre a massa de biossólido remanescente sobre o solo e a quantidade aplicada em cada tratamento.

Tabela 8 - Porcentagem média (n=12) de perda de massa de biossólido, cinco anos após a aplicação do resíduo, em função da massa remanescente (MR) sobre o solo após esse período.

Tratamento	MR	% de perda
	-----kg ha ⁻¹ -----	
10+KP	5.244	48
20+K	7.931	60
40+K	23.751	41

10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Apenas o biossólido do tratamento 20+K, onde foram aplicadas 20 t ha⁻¹, diminuiu sua massa seca em mais de 50% ao final de cinco anos, chegando à taxa média maior do que 10% ao ano e igual a 2,42 t ha⁻¹ ano⁻¹. Robinson et al. (2002), que avaliaram, anualmente, durante cinco anos, a perda de massa de três tipos de biossólido aplicados superficialmente em uma plantação de *Pinus radiata* na Austrália, encontraram resultados semelhantes. Seus resultados mostraram taxas de degradação, após cinco anos, variando entre 52% e 67% da massa total dos biossólidos. Walton et al. (2001), ao encontrarem 32% do biossólido utilizado

remanescente no solo como fragmentos maiores do que 2 mm, 20 anos após a aplicação, também concluíram que o bio sólido apresenta natureza recalcitrante.

Mesmo após o contato do bio sólido com o solo, com a serapilheira e com as raízes das plantas durante o período de tempo de cinco anos em que o material esteve esparramado no campo; submetido a todas as condições climáticas locais e um intensivo esforço de coletas de variados materiais para vários tipos de estudos, o resíduo apresentou taxa de perda de massa relativamente baixa. Isso mostra que o bio sólido alcalino utilizado no experimento é um material de lenta decomposição. Riekerk (1981) também relatou que o bio sólido apresenta lenta decomposição e baixas taxas de mineralização, especialmente, quando sob cobertura florestal.

Andrade (2004), analisando os trabalhos realizados em condições controladas, cita vários autores que também encontraram resultados semelhantes aos seus, que mostram que parte do material orgânico contido no bio sólido é recalcitrante e de difícil decomposição. Segundo Guedes (2005), a lenta decomposição do bio sólido e conseqüente mineralização dos nutrientes pode ser interessante sob a perspectiva da reciclagem dos nutrientes, pois permite uma sincronia entre liberação e absorção dos elementos pelas árvores, diminuindo as saídas do ecossistema devido à lixiviação. Sob o ponto de vista do manejador, isso pode trazer problemas quando se necessita de uma rápida liberação de nutrientes, como é o caso do P para alimentar o arranque das mudas de eucalipto. Por outro lado, se torna interessante pela perspectiva de liberação de nutrientes durante todo o ciclo da cultura do eucalipto, inclusive durante uma segunda rotação.

As características dos bio sólidos influenciam diretamente suas taxas de decomposição. Atributos químicos dos bio sólidos, como valores excessivamente elevados de pH, teores de metais pesados e sais solúveis conduzem a menores taxas de degradação dos resíduos (ANDRADE, 2004).

Segundo Guedes (2005), além das próprias características bioquímicas do biossólido, o efeito do tamanho das partículas e da área específica em contato com o solo, pode ser importante na taxa de saída de elementos inorgânicos do próprio biossólido e na determinação da taxa de decomposição do componente orgânico.

A porcentagem de liberação de C e N, cinco anos após a aplicação do biossólido, assim como os estoques remanescentes desses dois elementos no resíduo podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Conteúdos de carbono orgânico e nitrogênio no biossólido original e médias (n=12) dos conteúdos remanescentes nas parcelas de cada tratamento, cinco anos após a aplicação do resíduo. São apresentadas também, em negrito, as respectivas porcentagens de liberação.

Tratamento		Ckg ha ⁻¹	N
10+KP	quantidade na dose aplicada	1720	190
	quantidade remanescente	1046	76
	taxa de liberação	39%	60%
20+K	quantidade na dose aplicada	3440	380
	quantidade remanescente	1360	75
	taxa de liberação	60%	80%
40+K	quantidade na dose aplicada	6880	760
	quantidade remanescente	2502	182
	taxa de liberação	64%	76%

10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Observa-se que, proporcionalmente, o N foi mais liberado do biossólido do que o C. Os compostos nitrogenados do material orgânico, normalmente, são menos recalcitrantes e são degradados primeiro. Apesar do tratamento “20+K” apresentar a maior porcentagem de liberação de N, nas parcelas do tratamento “40+K” houve maior liberação desse elemento em

termos quantitativos absolutos. Apesar das elevadas taxas de liberação, como o bio sólido tinha um alto teor inicial de nitrogênio, ainda encontra-se com conteúdo capaz de atender as necessidades dos eucaliptos em uma segunda rotação, principalmente, no tratamento “40+K” onde foi aplicada a maior dose do resíduo.

O tratamento “40+K” apresentou, proporcionalmente aos outros tratamentos, maior taxa de decomposição do carbono orgânico. Esse tratamento foi o que propiciou maior retorno de material orgânico e de nutrientes como N, com a queda de serapilheira durante o processo de reciclagem biogeoquímica (GUEDES, 2005). Como essa serapilheira foi depositada sobre a camada de bio sólido, no tratamento “40+K”, que propiciou maior taxa de retorno de folhas senescentes caídas dos eucaliptos, deve ter havido maior manutenção da umidade no resíduo pela maior cobertura da manta florestal, o que pode ter facilitado a decomposição do bio sólido. Além disso, outro fator que pode ter influenciado esse resultado é a proporção de saída de elementos minerais do bio sólido, conforme discutido mais a frente.

Considerando o conteúdo de C, observou-se uma taxa de decomposição de 39% em cinco anos nas parcelas onde foram aplicadas 10 t ha⁻¹ de bio sólido. Quando se aplicaram 20 t ha⁻¹ a taxa foi de 60% e na dose de 40 t ha⁻¹ foi de 64%. Com a decomposição e incorporação do bio sólido ao solo ao longo do tempo, o material que vai ficando remanescente passa a ter maior recalcitrância, pois vão sobrando os compostos de mais difícil decomposição. Gilmour et al. (1996), encontraram que a fração ativa mais lábil do bio sólido residual, após sete anos de aplicações de bio sólido a cada duas ou quatro semanas, representou de 6 a 10% do C residual total.

O modelo de perda de material orgânico foi similar ao de massa total apenas para a dose de 20 t ha⁻¹. Na dose de 10 t ha⁻¹ a taxa de perda de massa foi 9% superior à taxa de decomposição, indicando que, proporcionalmente, perderam-se mais elementos minerais do que C orgânico. Na dose de 40 t ha⁻¹ a taxa de perda de massa foi 23% menor

do que a taxa de decomposição. Quando se aplicou a maior dose, formou-se uma camada mais espessa e com blocos maiores de bio sólido, fato esse que pode ter dificultado a saída de elementos, principalmente o Ca, que já se encontravam no próprio bio sólido em sua forma mineral e com teor muito elevado (9%). Normalmente a saída direta de elementos inorgânicos do bio sólido responde por grande proporção da perda de matéria (ROBINSON et al., 2002).

4.1.4 Estoque no solo

O estoque de elementos no solo é calculado a partir de dados da densidade do solo e dos teores desses elementos em seu perfil. Normalmente, a camada do perfil do solo que se quer estudar é dividida em várias profundidades de coleta, sendo que no meio de cada profundidade são coletadas amostras indeformadas para determinação da densidade. Multiplicando-se a densidade pelo teor do elemento no solo, encontra-se o conteúdo do elemento estocado. Quando se analisa o teor total, por meio de métodos que quantificam todas as formas do elemento no solo, determina-se o estoque total do elemento considerado.

Na Tabela 10 podem ser verificados os teores de N e C em diferentes profundidades do perfil do solo das parcelas experimentais de eucalipto.

Tabela 10 - Teores médios (n=4) de C total, C orgânico pelo método de Walkley e Black (C wb), N total, N mineral ($N_{min} = NO_3^- + NH_4^+$) e relação C/N em diferentes profundidades do solo sob *Eucalyptus grandis*, cinco anos após o plantio, em função dos tratamentos.

tratamento	profundidade cm	N total %	N min mg kg ⁻¹	C total %	C wb g dm ⁻³	C / N
T	0 a 10	0,058	7,254	1,494	15,55	26,3
T	10 a 20	0,038	5,478	0,923	9,01	25,2
T	20 a 30	0,031	3,496	0,778	8,14	24,7
T	30 a 60	0,025	2,988	0,619	5,38	24,6
AD	0 a 10	0,060	8,449	1,657	15,26	28,2
AD	10 a 20	0,045	5,904	0,900	7,70	20,4
AD	20 a 30	0,034	6,004	0,749	7,70	21,8
AD	30 a 60	0,034	1,152	0,628	6,69	19,2
10+KP	0 a 10	0,056	8,786	1,413	17,30	25,1
10+KP	10 a 20	0,046	7,960	1,126	11,19	24,5
10+KP	20 a 30	0,032	6,740	0,823	7,99	26,1
10+KP	30 a 60	0,030	1,606	0,660	6,10	22,0
20+K	0 a 10	0,059	12,730	1,480	15,41	25,3
20+K	10 a 20	0,038	3,949	0,932	10,17	24,7
20+K	20 a 30	0,038	2,372	0,833	7,70	23,1
20+K	30 a 60	0,033	2,168	0,645	6,40	20,4
40+K	0 a 10	0,070	8,421	1,712	6,54	24,6
40+K	10 a 20	0,041	2,193	0,774	10,32	19,2
40+K	20 a 30	0,034	3,819	0,761	7,56	23,4
40+K	30 a 60	0,031	1,532	0,627	5,81	24,3

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Verifica-se que os maiores teores de N e C estão na camada superficial do solo (até 10 cm de profundidade) e que, de uma maneira geral, há uma diminuição nos teores com o aumento da profundidade. Isso era esperado e mostra coerência dos dados, já que a maior parte da biota do solo se concentra na superfície do mesmo, onde fica incorporada a maior parte do material orgânico da superfície. Os organismos presentes no solo são os responsáveis pelo processo de mineralização do material orgânico (como o biossólido), disponibilizando os

nutrientes presentes no mesmo. Ainda na Tabela 10, considerando a camada mais superficial, verifica-se que o solo do tratamento “20+K” foi o que apresentou maior teor médio de N mineral.

A análise de variância mostrou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos para os conteúdos totais até 60 cm de profundidade, tanto para o C total ($F=1,3450$; $p=0,3096$) quanto para o N total ($F=1,2183$; $p=0,3536$) e N mineral ($F=0,5192$; $p=0,7218$). Porém, houve diferenças significativas para o C ($F=3,8220$; $p=0,0315$) determinado pelo método de Walkley e Black. Andrade (2004), trabalhando na mesma área experimental, também não detectou diferenças significativas entre tratamentos nos conteúdos totais de C e N no solo. Esse mesmo autor ressalta que se deve ponderar que a simples prática de incorporação ou não do biossólido, afeta os resultados de C no solo. Quando não há incorporação do resíduo, a amostra de solo para análise é praticamente livre de partículas de biossólido, enquanto que o contrário ocorre quando o material é incorporado, isto é, partículas do resíduo encontram-se presentes no material amostrado. A determinação do teor de C na amostra, mesmo que por procedimentos menos drásticos de oxidação, como o método clássico de Walkley e Black, é capaz de recuperar parte expressiva do C-orgânico de biossólidos, entre 55 e 70 % e, com isso, o C do resíduo é computado no teor da amostra.

O conteúdo médio, considerando todos os tratamentos ($n=20$), de C total até 60 cm de profundidade no perfil do solo foi de $70,7 \text{ t ha}^{-1}$. Foi observado maior valor no solo do tratamento “10+KP” ($75,1 \text{ t ha}^{-1}$) e menor valor no tratamento testemunha ($66,5 \text{ t ha}^{-1}$), apesar de não ser significativa a diferença entre os tratamentos.

O conteúdo médio, considerando todos os tratamentos, de nitrogênio total foi de 3.103 kg ha^{-1} , com maior valor médio no solo que recebeu adubação mineral (3.453 kg ha^{-1}) e menor valor no controle (2.660 kg ha^{-1}).

Outros trabalhos na mesma área experimental também não detectaram diferenças significativas entre os tratamentos para os teores totais e minerais de N no solo (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000; VELASCO-MOLINA e MATTIAZZO, 2003; ANDRADE, 2004). Apesar das análises de solo não terem mostrado mudanças nos teores de N no solo, a avaliação das concentrações foliares tem mostrado aumento da disponibilidade do nutriente e maior absorção de N pelos eucaliptos que receberam o resíduo (ANDRADE e MATTIAZZO, 2000; ROCHA, 2002; GUEDES e POGGIANI, 2003). Segundo Andrade (2004), houve uma tendência de enriquecimento do solo em N ao longo do experimento, que poderia ser explicado, entre outros fatores, pela maior absorção e imobilização do N pelos eucaliptos na fase inicial e pela efetivação da ciclagem bioquímica e biogeoquímica após o fechamento das copas, propiciando maior retorno do N com a deposição de serapilheira na fase final. Bhati e Singh (2003) também encontraram aumentos nos teores de N mineral no solo após a realização do experimento, em relação aos teores iniciais, tanto no solo tratado com esgoto municipal quanto no controle. No entanto, não observaram diferenças significativas entre os tratamentos.

A ausência de efeito significativo para os teores de N no solo, pode ser reflexo da elevada absorção do N mineralizado pelas raízes dos eucaliptos que foram tratados com fertilizantes e biossólido em relação ao controle. Como houve maior desenvolvimento e acúmulo de N nas árvores que receberam tratamentos (Figura 8) em relação à testemunha, deve ter havido maior absorção do N por essas árvores, diminuindo a quantidade de N mineral nos solos das parcelas desses tratamentos.

Na Figura 10 pode-se observar o efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de C determinado pelo método Walkley e Black.

Figura 10 - Efeito dos tratamentos sobre o conteúdo de C Walkley e Black no solo, avaliado até 60 cm de profundidade, cinco anos após a aplicação de biofertilizante. São apresentados os valores médios ($n=4$) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral)

Verifica-se que as doses maiores de biofertilizante apresentaram valores de C (41,9 t ha⁻¹ no tratamento “40+K” e 39,9 t ha⁻¹ no tratamento “20+K”), estatisticamente inferiores aos tratamentos “10+KP” (54,8 t ha⁻¹) e “AD” (50,7 t ha⁻¹). Esses tratamentos que apresentaram maior conteúdo de C Walkley e Black, foram os que apresentaram maior desenvolvimento (GUEDES, 2005), acúmulo de biomassa (Figura 4) e maior acúmulo de serapilheira sobre o solo (Tabela 7), demonstrando a maior importância do efeito indireto para as entradas de C do que a própria aplicação do biofertilizante, conforme constatado pelo autor citado anteriormente. A entrada indireta ocorre devido ao efeito da aplicação de biofertilizante e fertilizantes minerais,

principalmente P, sobre o incremento na biomassa aérea dos eucaliptos, biomassa essa que chega ao solo com a deposição de serapilheira por meio da ciclagem biogeoquímica.

As maiores doses, apesar de maior entrada de C de maneira direta com a aplicação do resíduo, apresentaram valores inferiores de C no solo quando determinado pelo método de Walkley e Black. Ressalta-se que isso não foi observado para o C total determinado pelo auto-analisador. Como o método Walkley e Black consiste numa digestão química que não recupera todo o C orgânico do solo, a parte que é extraída e determinada na análise é a fração mais lábil do material. A maior parte da matéria orgânica do bio sólido alcalino é recalcitrante e de difícil decomposição, conforme constatado nas baixas taxas de degradação determinadas por Andrade (2004). Assim, as doses maiores devem ter contribuído com maior proporção de matéria orgânica recalcitrante para o solo, C esse que deve ter aparecido apenas na determinação do C total pelo auto-analisador.

O monitoramento da fertilidade do solo realizado por Vaz e Gonçalves (2002), no experimento em questão, mostrou que a maioria das doses aplicadas do bio sólido não foi efetiva em promover o incremento da matéria orgânica do solo. Durante o primeiro ano após a aplicação do bio sólido, aos seis meses, houve redução de 30% dos teores de matéria orgânica na camada de 0-5 cm de profundidade, nos tratamentos que receberam doses de bio sólido de 20 e 40 t ha⁻¹, em comparação com os tratamentos controle e fertilização mineral. A aplicação de 10 t ha⁻¹ de bio sólido proporcionou, nessa mesma época e camada do solo, o maior teor de C, superando os demais tratamentos. O mesmo padrão de variação observado aos seis meses foi observado também aos treze meses após a aplicação do bio sólido (VAZ e GONÇALVES, 2002). Aos trinta e dois meses da aplicação das doses do resíduo, nenhuma diferença significativa foi observada entre os tratamentos (ROCHA, 2002). Nas três épocas citadas, considerando as camadas 5-10 e 10-20 cm, também não foram observadas alterações do C do solo em função dos tratamentos testados. A redução inicial dos teores de C do solo foi

atribuída à ocorrência do chamado efeito *priming* (VAZ e GONÇALVES, 2002). O efeito *priming* teria sido provocado pelo aumento da atividade microbiana, função da presença de compostos orgânicos do bio sólido, que após aumento da população microbiana, em relativo curto período, induziu a degradação da MO original do solo, como forma de manutenção da elevada atividade microbiana.

É conveniente ressaltar que a diminuição do conteúdo de matéria orgânica no solo não implica necessariamente em efeitos negativos. Por um lado, se o funcionamento do bio sólido como condicionador do solo pode depender do aumento da matéria orgânica na terra, por outro lado, essa decomposição se faz necessária para fornecer a energia e nutrientes necessários à sobrevivência dos organismos do solo. Por meio dela ocorre o processo de mineralização de nutrientes, melhorando a fertilidade e a qualidade biológica do solo.

Soares (2003), estudando uma área com eucalipto e tratada com bio sólido digerido anaeróbico, também encontrou redução dos teores de MO (ou C) no solo, aos sete e dose meses após aplicação do resíduo em doses até 40 t ha^{-1} , também atribuindo tal comportamento a ocorrência do efeito *priming*. Terry (1979) também observou a diminuição do carbono do solo com a aplicação de bio sólido, assim como Hsieh et al. (1981), que relataram a ocorrência do efeito *priming* em estudo sobre a decomposição de lodos de esgoto em condições de laboratório, por meio de medidas do CO_2 evoluído.

Guedes et al. (2006) verificaram diminuição do carbono orgânico em solo tratado com doses de até 40 t ha^{-1} de bio sólido, em relação ao solo que recebeu as doses de 80 e 160 t ha^{-1} , bem como tendência de diminuição em relação ao carbono orgânico original do solo. Esses autores também explicaram a diminuição por meio do efeito *priming*, afirmando que, normalmente, a maior taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, após adição de material orgânico fresco, é atribuída ao incremento da atividade dos microorganismos, em função da disponibilidade de substrato energético. No entanto, o autor chama a atenção para o

fato que alguns trabalhos mostram que o mecanismo do efeito *priming* é muito mais complexo do que comumente se acredita.

Um pouco da complexidade que envolve o processo da decomposição de matéria orgânica pode ser observada em Foutaine et al. (2003), que descreve um modelo conceitual baseado na competição por nutrientes e energia entre microorganismos especializados (estrategistas r) em decompor matéria orgânica fresca (MOF) e microorganismos generalistas (estrategistas K), que se alimentam principalmente da matéria orgânica polimerizada do solo (MOS). Esse artigo mostra resultados de vários trabalhos em que a adição de nutrientes e carbono facilmente assimilável, como açúcares solúveis, aminoácidos, extratos das raízes ou da rizosfera, não altera as taxas de decomposição da MOS. Como a dinâmica da população de estrategistas K é lenta, eles não teriam tempo para aumentar a colônia; já que os estrategistas r, que crescem muito rapidamente sobre substratos simples e solúveis, respondem prontamente a uma nova fonte de matéria orgânica lábil e a consomem rapidamente. Por outro lado, o suprimento de carbono em forma de componentes mais complexos e insolúveis, pode induzir o efeito *priming* e o aumento da taxa de decomposição da MOS. Nesse caso, os estrategistas K podem se beneficiar desse substrato polimerizado que permanece no solo por um tempo mais longo, aumentando sua população e, conseqüentemente, a taxa de decomposição da MOS. Um outro mecanismo proposto pelos autores é que quando a MOF encontra-se em formas insolúveis, a sua utilização exige uma etapa de despolimerização para produzir componentes assimiláveis. Assim, as próprias enzimas extracelulares produzidas pelos estrategistas r, durante a despolimerização, e liberadas no solo, podem ser eficientes para degradar a MOS. A intensidade desse mecanismo vai depender da diversidade da MOF e de sua similaridade com a MOS.

No trabalho de Guedes et al. (2006) houve uma tendência de diminuição do carbono do solo com o aumento da dose até 40 t ha⁻¹, que apresentou o menor valor médio do teor de

C, sendo cerca da metade do valor do tratamento testemunha. Na dose de 40 t ha⁻¹ aplicada superficialmente não ocorreu o efeito *priming*. Com a aplicação superficial, provavelmente, o carbono do bio sólido que chegou ao solo foi um carbono solúvel de fácil assimilação; que, segundo Fontaine et al. (2003) não seria capaz de provocar o efeito *priming*. Quando se incorpora uma dose muito elevada, por exemplo 180 t ha⁻¹ de bio sólido ao solo, o potencial de C que é introduzido no ecossistema seria capaz de, mesmo ocorrendo uma diminuição da matéria orgânica original do solo, aumentar o teor de C detectado na análise e manter esse aumento por um período maior.

A maioria dos trabalhos que relatam aumentos nos teores e conteúdos de C e N no solo com a aplicação de bio sólido (NYAMANGARA e MZEZEWA, 2001 e BHATI e SINGA, 2003), utilizaram metodologia de incorporação do resíduo ao solo ou experimentos de incubação onde não é considerado o efeito da vegetação. Quando se incorpora o bio sólido ao solo é possível que as alterações ocorram somente devido ao "efeito mistura", caracterizado pela junção de dois materiais com características diferentes, cujo valor médio após a mistura vai depender da proporção entre os componentes e da diferença inicial desses materiais. Segundo Guedes et al. (2006), a capacidade do bio sólido em promover aumentos no teor de matéria orgânica no solo vai depender, basicamente, das características do próprio resíduo; da dose, da frequência e da forma de aplicação (incorporação ou distribuição superficial).

4.2 Balanço Bio sólido/Solo/Planta

Na Tabela 11 podem ser observados os valores do coeficiente de utilização aparente (CUA) do N para os diversos tratamentos. O CUA representa a proporção entre o aumento no conteúdo de nitrogênio nos eucaliptos, propiciado pela aplicação de cada tratamento, em relação ao total de N adicionado com o respectivo tratamento. Nesse caso, não faz sentido

calcular o CUA para o carbono, já que o carbono fixado nos eucaliptos é proveniente da atmosfera e não do solo que recebeu a quantidade total de carbono introduzida no ecossistema com a aplicação de cada tratamento.

Tabela 11 - Influência dos tratamentos no coeficiente de utilização aparente (CUA) de nitrogênio, calculado de acordo com Labrecque (1995).

	Tratamento	N
CUA	AD	2,76
	10 + KP	1,78
	20 + K	0,56
	40 + K	0,31
T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha ⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha ⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha ⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)		

Verifica-se na Tabela 11 que para os tratamentos "AD" e "10+KP", os CUAs foram maiores do que a unidade, indicando que os eucaliptos absorveram e imobilizaram mais N do que as quantidades aplicadas com esses tratamentos. Quando se aplicou a dose de 20 t ha⁻¹ (20+K), 56% do N foram imobilizados nos eucaliptos com cinco anos, e na dose de 40 t ha⁻¹ (40+K), 31% foi imobilizado. Além do elevado conteúdo de N imobilizado nos eucaliptos, ainda há quantidade considerável no biossólido remanescente e pode haver elevadas perdas por volatilização de amônia devido à aplicação superficial (ZHANG et al., 2001). Com isso, pode-se supor que o potencial de lixiviação de nitrato e contaminação do lençol freático é mínimo. Andrade e Mattiazo (2000) e Velasco-Molina (2004), trabalhando na mesma área experimental, constataram que não houve lixiviação de nitrato com aplicação de biossólido.

A seguir pode ser visualizado o balanço de C nos diversos tratamentos (Tabela 12).

Tabela 12 - Balanço de C total cinco anos após a implantação do experimento, mostrando as entradas e os conteúdos nos compartimentos e o efeito de cada tratamento sobre o saldo de C no ecossistema. O saldo representa a soma das diferenças do C de cada tratamento em relação à testemunha.

	Conteúdo de C nos compartimentos (kg ha ⁻¹)				entrada (kg ha ⁻¹)
	eucalipto	biossólido	serapilheira	solo	
T	26.404	-	6.351	66.538	0
AD	40.730	-	8.158	74.493	0
10+KP	40.551	1.046	8.070	75.109	1.720
20+K	31.983	1.360	6.941	70.548	3.440
40+K	36.421	2.502	7.951	67.155	6.880
	Diferenças entre tratamentos e testemunha (kg ha ⁻¹)				saldo (kg ha ⁻¹)
	eucalipto	biossólido	serapilheira	solo	
AD	14.326	-	1.807	7.955	24.088
10+KP	14.147	1.046	1.720	8.571	25.484
20+K	5.579	1.360	590	4.010	11.539
40+K	10.017	2.502	1.600	617	14.736

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Todos os tratamentos testados apresentaram saldo médio total de C fixado no ecossistema positivo, em relação ao tratamento testemunha. Esse saldo representa o efeito de cada tratamento sobre o seqüestro de carbono, mostrando que, tanto a adubação mineral, quanto a aplicação de biossólido são capazes de promover a assimilação de consideráveis quantidades de carbono, contribuindo para a diminuição do CO₂ na atmosfera. Os dois tratamentos que apresentaram maior desenvolvimento e acúmulo de biomassa aérea de eucalipto (AD e 10+KP) apresentaram, respectivamente, saldo total de 25 e 24 t ha⁻¹ após cinco anos de desenvolvimento dos eucaliptos e aplicação do biossólido, atingindo uma taxa anual média de 5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de seqüestro de C do “pool” atmosférico. O componente eucalipto foi o maior responsável, em todos os tratamentos, pela imobilização de C dentro do ecossistema.

Tabela 13 - Balanço de N em cada tratamento, representando as diferenças entre as respectivas entradas de N com cada tratamento aplicado e os conteúdos de N estocados nos compartimentos, cinco anos após a implantação do experimento.

	Conteúdo de N (kg ha ⁻¹)				entrada (kg ha ⁻¹)
	eucalipto	biossólido	serapilheira	solo	
testemunha	383	—	121	2660	0
AD	653	—	164	3453	98
10+KP	721	76	163	3175	190
20+K	596	75	153	3151	380
40+K	621	182	186	3074	760
	Diferenças entre tratamentos e testemunha (kg ha ⁻¹)				balanço (kg ha ⁻¹)
	eucalipto	biossólido	serapilheira	solo	
AD	270	—	43	793	-1.008
10+KP	338	76	42	515	-781
20+K	213	75	31	491	-430
40+K	238	182	65	414	-139

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

Verifica-se na Tabela 13 que o balanço para o conteúdo de nitrogênio no ecossistema foi negativo para todos os tratamentos testados. Esse balanço representa a diferença entre a quantidade total de N que entrou no ecossistema com a aplicação de cada tratamento e a soma dos aumentos dos conteúdos de N nos compartimentos (eucalipto acima do solo, biossólido remanescente, serapilheira acumulada sobre o solo e solo até 60 cm) propiciados pelo respectivo tratamento em relação ao tratamento testemunha.

O saldo negativo mostra que, em todos os tratamentos, o N acumulado nos compartimentos foi maior do que as respectivas entradas com a aplicação dos tratamentos e que, portanto, aconteceram outras entradas em maior proporção nas áreas tratadas. Essas entradas seriam potencializadas pela utilização de fertilizantes e biossólido, propiciando, de maneira sinérgica com os tratamentos, maior acúmulo de N, principalmente no solo e nos eucaliptos, do que a simples aplicação dos tratamentos poderia fornecer. Por exemplo, pode

ter havido maior fixação de N_2 atmosférico com a aplicação dos tratamentos, bem como melhor aproveitamento do N proveniente das descargas elétricas e precipitação pluviométrica pelos organismos edáficos que dispunham de substrato para manutenção de sua população. Fernandes et al. (2005), utilizando bio sólido proveniente da mesma ETE que forneceu o material para este trabalho, mostraram que a aplicação do lodo aumentou a atividade metabólica do solo e o N na biomassa microbiana. Isso indica que a aplicação do resíduo ativa a comunidade de microorganismos do solo, ajudando a manter o N dentro do ecossistema. A imobilização do N nos microorganismos retém o nutriente, aumentando o tempo de permanência no solo e pode facilitar a absorção pelas raízes quando ocorrer a liberação da comunidade microbiana. Autores como Davidson et al. (1992) têm sugerido que a imobilização de N na comunidade microbiana é um importante mecanismo para retenção de nitrato em ecossistemas florestais. Compostos de lodo de esgoto têm causado imobilização de N quando aplicados em solos (KING, 1984).

Outra hipótese que pode ser aventada para explicar as maiores entradas de N nas áreas tratadas, além das que ocorreram com a aplicação dos próprios tratamentos, é que a aplicação do bio sólido e da adubação mineral pode ter favorecido o desenvolvimento de espécies leguminosas hospedeiras e de organismos fixadores de N no sub-bosque do eucalipto. Além disso, sempre houve maior retorno de N por meio da ciclagem biogeoquímica nas áreas tratadas (GUEDES, 2005).

O maior acúmulo de N indica também que as saídas podem ter sido menores nos tratamentos do que na testemunha e que não deve ter havido lixiviação de nitrato para o lençol freático. A ausência de lixiviação de nitrato foi constatada por outros trabalhos realizados na mesma área experimental (ANDRADE, 2001 e VELASCO-MOLINA, 2004).

Os compartimentos que mais responderam aos tratamentos com o aumento dos estoques de N foram o solo e a biomassa aérea do eucalipto. No compartimento solo, o

tratamento adubação mineral propiciou o maior aumento, em relação à testemunha, no estoque de N. Considerando apenas o compartimento eucalipto, observa-se que, nos tratamentos adubação e 10+KP, o incremento no conteúdo de N na biomassa aérea já foi superior às entradas dos respectivos tratamentos, conforme pode ser observado também na Tabela 11, onde se observa que os CUAs são maiores do que a unidade para esses tratamentos.

4.3 Efeitos Sobre a Área Foliar

Na tabela 14 são mostrados os valores médios da área foliar total de uma árvore de eucalipto, da área de cada folha, da área foliar específica e do índice de área foliar cinco anos após o plantio dos eucaliptos e aplicação de biofertilizante.

Tabela 14 - Valores médios (n=8) da área foliar total de uma árvore de eucalipto (AFT), da área média de cada folha (AFMF*), da área foliar específica (AFE) e do índice de área foliar (IAF), em função dos tratamentos, cinco anos após o plantio dos eucaliptos.

Tratamento	AFT (m ²)	AFMF(cm ²)	AFE (g.cm ⁻²)	IAF
T	16,77	28	0,016	2,7
AD	22,91	30	0,017	3,8
10 + KP	23,98	26	0,017	3,8
20 + K	17,24	26	0,016	2,8
40 + K	26,13	24	0,017	4,1

*valores médios calculados para n=480 (8 árvores x 60 folhas por árvore).

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 Mg ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K e P mineral), 20+K (20 Mg ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral), 40+K (40 Mg ha⁻¹ de biofertilizante complementadas com K mineral)

Considerando a área foliar dos eucaliptos com cinco anos de idade, a análise de variância mostrou que apenas o IAF (F=2,0494; p=0,1109) foi significativamente alterado

pelos tratamentos. Smethurst et al. (2003) ao trabalharem com *E. nitens* na Austrália, também verificaram um aumento no índice de área foliar nos sítios fertilizados. As diferenças para a AFE ($F=0,9740$; $p=0,4354$) e para AFT ($F=1,4752$; $p=0,2329$) não são significativas.

A seguir podem ser visualizadas as relações do IAF com cada componente da biomassa e com a biomassa total para cada tratamento testado (Tabela 15).

Tabela 15 - Efeito dos tratamentos sobre os coeficientes de correlação entre o IAF e a biomassa seca nos componentes das árvores de *Eucalyptus grandis* com cinco anos de idade.

Tratamentos	lenho	casca	folha	galho	Total
T	0,85*	0,74*	0,94*	0,63	0,86*
AD	-0,08	-0,00	0,76*	0,37	0,02
10+KP	0,98*	0,93*	0,99*	0,84*	0,98*
20+K	0,91*	0,87*	0,99*	0,89*	0,92*
40+K	0,78*	0,79*	0,99*	0,89*	0,83*

*valores em negrito são significativos em nível de significância de 5%.

T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biossólido complementadas com K mineral)

O IAF apresenta estreita correlação com a biomassa de todos os componentes, principalmente das folhas, na maioria dos tratamentos. Apenas os eucaliptos do tratamento controle (T) não apresentaram correlação significativa entre o IAF e a biomassa de galhos e os eucaliptos que receberam adubação mineral completa não apresentaram correlação significativa entre o IAF e a biomassa de lenho, casca, galho e total. Isso mostra que os tratamentos alteraram a relação da área foliar com a produção de biomassa.

Na Figura 11 pode ser observado o efeito dos tratamentos sobre os valores médios ($n=8$) do IAF e sobre a variação em torno da média para cada tratamento testado.

Figura 11 - Efeito dos tratamentos sobre o índice de área foliar das árvores de *Eucalyptus grandis*, aos cinco anos de idade. São apresentados valores médios (n=8) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), AD (adubação mineral), 10+KP (10 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K e P mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K mineral), 40+K (40 t ha⁻¹ de biofósforo complementadas com K mineral).

Os tratamentos “AD”, “10+KP” e “40+K” não apresentaram diferenças significativas entre si e mostraram maiores valores de IAF do que os eucaliptos do tratamento testemunha e “20+K”.

Os eucaliptos que apresentaram maior IAF foram aqueles dos tratamentos mais produtivos, que receberam fertilização mineral e a maior dose de biofósforo. Outros autores também encontraram maior IAF em plantações de eucalipto que foram fertilizadas (SMETRUST et al., 2003; SAMPSON et al. 2006).

Xavier et al. (2002) encontraram que o IAF em plantações de *E. grandis* pode diminuir com a idade das árvores ao longo do ciclo de crescimento, encontrando valor médio

de 2,86, máximo de 4,31 e mínimo de 1,72. Percebe-se que os valores, mínimo de 2,8 e máximo de 4,4, encontrados neste trabalho de tese coincidem com os valores apresentados pelos autores citados anteriormente.

4.4 Efeitos Sobre a Fotossíntese

A Figura 12 mostra a taxa fotossintética de plantas de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido polimerizado, medidas durante um dia em intervalos de duas horas, três meses após a realização do plantio.

Figura 12 - Taxa fotossintética de plantas de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido polimerizado, medidas durante um dia em intervalos de duas horas, três meses após a realização do plantio. T (testemunha), 10+K (10 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral)

Observa-se que em todos os tratamentos analisados a taxa fotossintética foi maior às 11:00 h e menor no horário das 17:00 h. Nesse horário ao final da tarde a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa que chegava até as folhas já era bastante escassa ($95 \text{ mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). No entanto, a maior taxa não coincidiu com o horário de maior intensidade de radiação. A maior quantidade de radiação foi registrada às 13:00 h ($1.600 \text{ mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), enquanto que no horário de maior taxa fotossintética foi registrado metade desse valor ($800 \text{ mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Isso mostra que outros fatores controlaram a fotossíntese, impedindo as plantas de utilizarem a maior quantidade de luz que chegava às folhas no período de 13:00 h. Provavelmente, houve fechamento dos estômatos devido ao maior déficit de pressão de vapor devido ao aumento da temperatura.

Apesar dos tratamentos que receberam biossólido apresentarem valores médios para a taxa fotossintética maiores do que a testemunha, principalmente nos períodos de maior intensidade luminosa, essas diferenças não foram significativas para o modelo linear, conforme pode ser observado na correlação entre essas variáveis na Tabela 17, nem tampouco para o modelo quadrático ($F=2,4189$; $p=0,1189$), considerando níveis de significância abaixo de 10%. No entanto, quando se considera as medições realizadas apenas no período da manhã, às 09:00 h e 11:00 h, o efeito da dose de biossólido sobre a fotossíntese passa a ser significativo ($F=4,6980$ e $p=0,0237$) para o modelo quadrático, conforme pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Efeito de doses (base seca) crescentes de bio-sólido sobre a fotossíntese líquida, medida às 09:00 h e 11:00 h, de *Eucalyptus grandis*, aos três meses de idade. São apresentados valores médios ($n=10$) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), 10+K (10 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral)

Kallarackal e Somen (1997), trabalhando com *Eucalyptus grandis* na Índia, demonstraram que a taxa fotossintética é maior pela manhã, decrescendo durante a tarde. Esses autores encontraram que a fotossíntese em *E. grandis* não é muito afetada pelo fechamento parcial dos estômatos, demonstrando que essa espécie é eficiente no uso da água, especialmente durante período seco. Os valores máximos de fotossíntese líquida no trabalho citado anteriormente foram da ordem de 20 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo que a maioria dos valores observados coincide com a faixa de variação dos valores desta tese.

As plantas de eucalipto que receberam o resíduo apresentaram maiores valores de taxa fotossintética do que as plantas testemunhas da dose zero, sendo que não houve diferenças significativas entre as doses 10, 20 e 30 t ha⁻¹.

Mata-González et al. (2002) também encontraram maiores valores na taxa fotossintética quando se aplicou biofósforo, sendo que também não observaram relações positivas com o aumento das doses e verificaram maiores valores de fotossíntese líquida nas plantas tratadas com as menores doses do resíduo. Yan et al. (2000), ao avaliarem como o biofósforo influencia as relações da fotossíntese e da água em um arbusto do deserto, verificaram que a aplicação de baixas taxas de biofósforo (até 18 t ha⁻¹) pode aumentar as taxas fotossintéticas. Esses mesmos autores encontraram que as maiores taxas (34 e 90 t ha⁻¹) causaram uma diminuição na taxa fotossintética e redução da eficiência do processo de fotossíntese, atribuindo isso ao aumento do déficit hídrico no solo devido à interceptação da água da chuva pelo biofósforo durante baixas precipitações.

Durante as avaliações da fotossíntese, também foram realizadas medições da condutância estomática, do CO₂ subestomático, da taxa de transpiração e da temperatura superficial de folhas de plantas de *Eucalyptus grandis* com 3 meses de idade. Essas variáveis não foram afetadas de maneira significativa pela aplicação de biofósforo e apresentaram valores médios de 0,214 mol.m⁻².s⁻¹ para condutância estomática; 234 µmol.mol⁻¹ para CO₂ subestomático; 3,40 mmol.m⁻².s⁻¹ para transpiração e 25,75 °C para temperatura das folhas.

A influência do estado nutricional da planta sobre a fotossíntese ocorre de várias maneiras. Em solos sem deficiência mineral, o suprimento de nutrientes para a fotossíntese é menos decisivo do que as condições climáticas. No entanto, quase sempre, maiores taxas fotossintéticas são alcançadas por meio da adubação (LARCHER, 2000).

No gráfico a seguir (Figura 14) pode-se observar o efeito das doses de biofósforo polimerizado sobre a eficiência de uso da água por plantas jovens de eucalipto. A EUA é a

razão entre a taxa de fotossíntese (assimilação de CO_2) e a taxa de transpiração, (perda de água) (LARCHER, 2000).

Figura 14 - Valores médios ($n=5$) da eficiência do uso de água por plantas de eucalipto, aos três meses de idade, em função da aplicação de doses (base seca) crescentes de biofósforo. A variação apresentada em torno das médias representa o intervalo de confiança construído com 95% de certeza. T (testemunha), 10+K (10 t ha^{-1} de biofósforo polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha^{-1} de biofósforo polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha^{-1} de biofósforo polimerizado complementado com K mineral)

A análise de regressão mostrou que o modelo polinomial de primeira ordem (quadrático) foi significativo ($F=7,9316$; $p=0,0037$) para explicar a variação da eficiência do uso de água em função das doses crescentes de biofósforo. Ambos os parâmetros do modelo, tanto para dose ($\beta=0,0607$; $t=3,3297$; $p=0,0040$) quanto para dose ao quadrado ($\beta= -0,0015$; $t=-2,5664$; $p=0,0200$), foram significativos. Pela análise dos intervalos de confiança na Figura 14, verifica-se todas as doses de biofósforo propiciaram aumentos significativos, em relação ao tratamento

testemunha onde não foi aplicado o resíduo, na eficiência de uso da água, e que não houve diferenças significativas entre as doses de biossólido. As árvores das parcelas que receberam o biossólido apresentaram, significativamente, maior capacidade fotossintética quando se considera apenas os dois horários de medições do período de manhã. No entanto, as diferenças entre os índices de EUA foram significativas mesmo considerando todos os horários de medições, mostrando que o controle da transpiração por meio do fechamento dos estômatos é um mecanismo eficaz para aumentar a eficiência do uso da água e diminuir sua perda para o ambiente, principalmente nos períodos em que não houve aumentos na taxa fotossintética.

4.5 Relações entre Área Foliar, Fotossíntese e Nutrientes

A Tabela 16 mostra os coeficientes de correlação entre as variáveis dose de aplicação de biossólido, taxa fotossintética líquida, condutância estomática, carbono interno fixado, eficiência de utilização de água, área foliar média por folha, área foliar específica, teor de clorofila, altura e diâmetro do coleto de *Eucalyptus grandis* com 3 meses de idade, que receberam doses crescentes de biossólido polimerizado.

Independente da aplicação de biossólido, cujos tratamentos não mostraram-se significativos em alterar a taxa fotossintética quando se considera todos os períodos de medições, essa taxa apresentou correlação linear significativa com vários parâmetros avaliados, inclusive com as medições de diâmetro e altura que representam o desenvolvimento das plantas. Houve correlação positiva da taxa fotossintética com a transpiração e correlação negativa com o carbono interno. Esse comportamento já era esperado, uma vez que quanto maior a fotossíntese e a transpiração, menor é o carbono interno. Torres (2003) elucida que quando a planta transpira e realiza fotossíntese, as mesmas restabelecem o CO₂ subestomático, diminuindo as concentrações intracelulares de CO₂ e

mantendo um equilíbrio relativo quanto a difusão dos gases por meio dos estômatos. No entanto, o mesmo autor adverte que, o potencial hídrico da folha também determina o fechamento dos estômatos à medida que a disponibilidade de água diminui e o vento pode incrementar a transpiração por perda de água da camada adjacente à folha.

Tabela 16 - Coeficientes de correlação entre as variáveis dose de biossólido (D), taxa fotossintética líquida (TF), condutância estomática (CON), carbono interno fixado (Ci), eficiência de utilização de água (EUA), área foliar média por folha (AFMF), área foliar específica (AFE), altura (H) e diâmetro do coleto (D) dos eucaliptos e teor de clorofila (CLO). Variáveis avaliadas durante cinco períodos em uma dia (n=25), em povoamento de *Eucalyptus grandis* aos três meses após o plantio, após aplicação de doses de 0 a 30 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado.

	D	TF	CON	Ci	EUA	AFMF	AFE	H	D	CLO
D	1,00	0,30	-0,07	-0,39	0,53*	0,42	0,31	0,44	0,38	0,54*
TF		1,00	0,66*	-0,55*	0,74*	0,51*	0,41	0,46*	0,57*	0,30
COM			1,00	0,14	0,19	0,14	0,08	0,03	0,04	-0,19
Ci				1,00	-0,72*	-0,57*	-0,58*	-0,49*	-0,66*	-0,46*
EUA					1,00	0,55*	0,49*	0,51*	0,64*	0,62*
AFMF						1,00	0,95*	0,81*	0,81*	0,24
AFE							1,00	0,73*	0,73*	0,12
H								1,00	0,89*	0,32
D									1,00	0,44
CLO										1,00

*Os valores em negrito foram significativos em nível de significância de 5% para n=25

Apesar da área foliar específica não apresentar correlação com a taxa fotossintética, a relação com a área foliar média por folha foi significativa para ambos os modelos testados (F=6,3299; p=0,02158, para o modelo linear; F=8,3751, p=0,0029 para o quadrático). A área foliar específica é a área em relação ao peso da folha, variável essa mais difícil de ser influenciada, pois normalmente está associada a aumentos consideráveis nos teores de elementos minerais ou de compostos orgânicos mais recalcitrantes nas folhas.

Considerando o modelo de correlação linear, apenas as relações das doses de biossólido com a eficiência de uso da água (EUA) e com o teor de clorofila foram significativas.

Avaliando o efeito das doses de biossólido nas variáveis respostas por meio do modelo quadrático (polinomial de primeira ordem), verifica-se que outras variáveis passam a ser significativas, demonstrando que a variação dessas respostas não é linear com a dose, mas sim que há maior efeito das doses menores, principalmente a dose de 10 t ha^{-1} . A área foliar média por folha (AFMF) foi significativamente afetada pelas doses, quando analisada pelo modelo quadrático ($F=7,8604$; $p=0,0038$); tanto para o coeficiente ajustado para dose ($t=3,7050$; $p=0,0017$), quanto para o coeficiente ajustado para dose ao quadrado ($t= -3,1471$; $p=0,0059$). Na Figura 15 pode-se verificar o efeito das doses sobre a AFMF.

Figura 15 - Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido polymerizado sobre a área foliar média por folha das plantas de *Eucalyptus grandis*, aos três meses de idade. São apresentados valores médios ($n=5$) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), 10+K (10 t ha^{-1} de biossólido polymerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha^{-1} de biossólido polymerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha^{-1} de biossólido polymerizado complementado com K mineral)

A área foliar média por folha mostrou-se estreita e significativamente relacionada (Tabela 16) às variáveis dendrométricas, altura e diâmetro do coleto, medidas para avaliar o desenvolvimento das mudas de eucalipto. Na Figura 16 pode ser observada a relação entre a área foliar média por folha e esses parâmetros de desenvolvimento do eucalipto.

Figura 16 - Relação da área foliar média por folha com a altura (cm) e diâmetro (mm) do coleto de *Eucalyptus grandis* com 3 meses de idade fertilizado com biossólido polimerizado.

Apesar de não ter havido uma relação linear significativa entre as doses de biossólido e os parâmetros de crescimento, o modelo quadrático foi significativo tanto para altura quanto para diâmetro. Em ambos os casos, todos os parâmetros do modelo foram significativos. Para altura dose ($\beta=3,2460$; $t=3,6445$; $p=0,0020$) e dose ao quadrado ($\beta= -0,0870$; $t= -3,0579$; $p=0,0071$). Para diâmetro dose ($\beta=6,2500$; $t=5,2132$; $p<0,0001$) e dose ao quadrado

($\beta = -0,1790$; $t = -4,6740$; $p = 0,0002$). Nas Figuras 17 e 18 podem ser observados, respectivamente, o efeito das doses de biossólido sobre a altura e o diâmetro do coleto dos eucaliptos aos três meses de idade.

Figura 17 - Efeito de doses (base seca) crescentes de biossólido polimerizado sobre a altura de plantas de *Eucalyptus grandis*, aos 3 meses de idade. São apresentados valores médios ($n=5$) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), 10+K (10 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral)

Os valores de altura foram significativamente maiores para os eucaliptos que receberam as doses de 10 e 20 t ha⁻¹ (73,5 cm, em média), em relação ao tratamento controle (46,0 cm) que não recebeu aplicação. A significância do modelo quadrático que representa a resposta de crescimento das plantas em função das doses de biossólido mostra que foi maior o efeito das menores doses.

Figura 18 - Efeito de doses (base seca) crescentes de bio-sólido polimerizado sobre o diâmetro do coleto de plantas de *Eucalyptus grandis*, aos 3 meses de idade. São apresentados valores médios ($n=5$) e os intervalos de confiança construídos com 95% de certeza. T (testemunha), 10+K (10 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha⁻¹ de bio-sólido polimerizado complementado com K mineral)

Os valores de diâmetro do coleto, medido rente ao solo, significativamente maiores para os eucaliptos que receberam bio-sólido, inclusive a dose de 30 t ha⁻¹ (136 mm, em média), em relação ao tratamento controle (90 mm). O valor médio do diâmetro dos eucaliptos que receberam a dose de 10 t ha⁻¹, foi 62% superior ao valor do tratamento testemunha.

Os teores de clorofila apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos aplicados ($p < 0,05$). Os eucaliptos do tratamento testemunha apresentaram teor médio de 36 pad em suas folhas, valor esse significativamente menor do que os valores observados nos tratamentos onde foi aplicado bio-sólido. Não houve diferenças significativas entre as doses

de biossólido (10, 20 e 30 t ha⁻¹), cujo valor médio do teor de clorofila foi igual a 45 pad. Esses resultados mostram que o biossólido foi capaz de promover um aumento em aproximadamente 27% nos teores de clorofila a+b nas plantas tratadas.

De acordo com a Tabela 17 verifica-se que houve efeito significativo para a correlação linear da dose de biossólido com os teores foliares de N, P, S, Mn e Zn; além da relação do teor de clorofila com esses nutrientes, exceto Zn. Como o resíduo é rico em N, houve maior N foliar nas árvores das parcelas que receberam o biossólido e consequentemente maior quantidade de clorofila. Essa correlação entre o N e o teor de clorofila é muito bem estabelecida, pois o N é o componente essencial das clorofilas. Há uma estreita correlação entre o conteúdo de N na folha e a quantidade de clorofila (em média 50 mol de nitrogênio nos tilacóides para cada 1 mol de clorofila) (EVANS, 1989).

Tabela 17 - Coeficientes de correlação entre as variáveis citadas na tabela 16 e os teores de nutrientes nas folhas dos eucaliptos.

	N	P	Ca	Mg	S	Mn	Zn
DOSE	0,97*	0,89*	-0,46	-0,47	0,87*	-0,64*	0,79*
TF	0,46	0,44	-0,52	-0,81*	0,49	-0,54	0,26
COND	-0,01	-0,05	-0,35	-0,67*	0,09	-0,20	0,06
Ci	-0,39	-0,34	0,30	0,58	-0,30	0,48	-0,18
EUA	0,60	0,67*	-0,49	-0,57	0,56	-0,68*	0,27
AFMF	0,24	0,34	-0,57	-0,59	0,31	-0,44	-0,09
AFE	0,06	0,20	-0,39	-0,34	0,08	-0,32	-0,23
H	0,34	0,48	-0,49	-0,60	0,42	-0,56	0,03
D	0,25	0,34	-0,47	-0,69	0,41	-0,42	-0,12
CLO	0,87*	0,86*	-0,42	-0,54	0,85	-0,69*	0,61

*Os valores em negrito foram significativos em nível de significância de 5%

Os macronutrientes citados anteriormente e o Zn apresentaram correlação positiva com a dose de biossólido e o mesmo padrão de variação, conforme pode ser observado na Tabela 17. Foi verificado que os maiores teores desses nutrientes foram encontrados nas folhas dos eucaliptos que receberam a maior dose de biossólido (30 t ha^{-1}). Isso mostra que o biossólido tem potencial para funcionar como fertilizante da cultura do eucalipto, fornecendo esses nutrientes às plantas, como também foi constatado por outros autores (GUEDES, 2003; GUEDES, 2005; GUEDES, 2006; VAZ e GONÇALVES, 2002). Na Tabela 18 podem ser observados os teores médios dos nutrientes nas folhas dos eucaliptos.

Tabela 18 - Teores foliares de nutrientes em povoamento recém-implantado de eucalipto (3 meses de idade), em função da aplicação de doses de biossólido polimerizado.

Dose biossólido t ha⁻¹	N	P	Ca	Mg	S	Mn	Zn
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
T	25,1	0,9	3,7	1,7	1,0	1042	22
10 + K	28,7	1,1	3,4	1,4	1,6	835	22
20+ K	32,3	1,3	3,0	1,5	1,5	495	27
30+ K	34,0	1,3	3,5	1,5	2,0	627	36

T (testemunha), 10+K (10 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 20+K (20 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral), 30+K (30 t ha⁻¹ de biossólido polimerizado complementado com K mineral)

No entanto os teores foliares de Mn diminuíram com a dose de biossólido aplicada (Tabela 18). Esse mesmo padrão também foi observado por Guedes (2005). Esse autor relata que o teor de Mn disponível no solo aumentou, aproximadamente, de duas a três vezes seu valor no solo que recebeu biossólido em relação aos tratamentos "T" e "AD". Esse fato mostra que a diminuição dos teores de Mn nas folhas do eucalipto quando se aplica biossólido alcalino, não é por causa do aumento do pH do solo. Essa hipótese levantada por vários autores (TSADILAS et al., 1995; SLOAN e BASTA, 1995; ANJOS e MATTIAZZO, 2000;

CHRISTIE et al., 2001; GUEDES e POGGIANI, 2003) se fundamenta no fato de que o aumento do pH precipitaria o Mn diminuindo sua forma disponível no solo. No entanto, correlações negativas entre o pH do solo e o Mn nas plantas não implicam em relação de causa e efeito, sendo que a variação em ambos os atributos podem ser derivadas de um terceiro fator, que seria o excesso de Ca proveniente do biossólido. Assim, como não se observou diminuição do Mn disponível no solo com a aplicação de biossólido, a principal hipótese para explicar a diminuição na absorção de Mn pelos eucaliptos é a competição entre o Ca e o Mn durante o processo de extração dos nutrientes pelas raízes. Como ambos são cátions bivalentes com raios iônicos de tamanhos aproximados, há uma competição direta entre eles pelos sítios de absorção e o excesso de Ca pode ter inibido a entrada de Mn nas raízes.

5 CONCLUSÕES

Como conclusão geral pode-se afirmar que o biossólido é capaz de incrementar o desenvolvimento de árvores de *Eucalyptus grandis*, tanto no início do ciclo como em árvores adultas. A aplicação de biossólido propicia o aumento dos estoques de carbono no ecossistema e pode aumentar a eficiência fotossintética de plantas jovens de eucalipto.

Analisando as hipóteses e objetivos propostos no início do trabalho pode-se concluir que:

- a) a aplicação de biossólido alcalino, em superfície, não contribui para aumentar a fixação de N e C total no solo, sendo que o desenvolvimento das árvores é mais importante para propiciar entradas de material orgânico no ecossistema do que a própria aplicação do biossólido. A aplicação do resíduo incrementa o desenvolvimento de árvores de *Eucalyptus grandis* e propicia aumentos no acúmulo de biomassa epígea, assim como nos estoques de C e N nessa biomassa aérea das árvores, sendo que os troncos respondem pela maior parte do aumento do estoque na vegetação.
- b) Os eucaliptos que receberam nutrientes, seja pela adubação mineral, seja pela aplicação de biossólido, desenvolvem maior área foliar. A aplicação de doses de biossólido alcalino não altera a significância da correlação entre o índice de área foliar (IAF) e a biomassa acumulada nos componentes das árvores. No tratamento controle essa correlação deixa de ser significativa para os galhos e nos eucaliptos que receberam adubação mineral completa deixa de ser significativa para todos os componentes, exceto para as folhas.

- c) O biossólido polimerizado pode aumentar a fotossíntese líquida, no período da manhã, sendo também capaz de promover aumentos na eficiência do uso da água e no desenvolvimento de eucaliptos jovens. O biossólido possui elevado potencial de fornecer N e outros nutrientes às plantas de eucalipto, sendo capaz de aumentar o teor de clorofila nas folhas dessas árvores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, os resíduos gerados pela população humana constituem problema emergencial. Dentre esses resíduos, os esgotos merecem atenção especial, não somente pelo grande volume produzido diariamente, mas também pelo elevado potencial poluidor dos recursos hídricos. Considerando que há uma tendência em melhorar a questão do saneamento básico no Brasil, e que o tratamento de esgoto é de fundamental importância para melhorar a saúde pública no país, faz-se necessário considerar algumas alternativas para destino final adequado do lodo gerado após o tratamento do esgoto.

Existem várias alternativas para disposição final do lodo proveniente do tratamento do esgoto, mas acredita-se que aquelas que buscam o "uso benéfico" desse resíduo devem ser priorizadas, especialmente o uso como biossólido, que cria uma forma de saída para um dos resíduos mais problemáticos gerados nas áreas urbanas. Com o retorno do lodo aos campos onde ele, em última análise, foi gerado, ocorre o fechamento de um grande ciclo, evitando sua acumulação nos grandes centros. Sem essa reciclagem, fatalmente, em algum momento, não haveria mais condições para dispor o lodo nas cidades.

O uso do lodo de esgoto como biossólido, em plantações agrícolas e florestais, já é considerada uma das melhores alternativas para o destino final, haja vista, ser um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes e promove a reciclagem da matéria de forma contínua. No entanto é necessário um bom manejo, não esquecendo a questão residual para uma próxima aplicação e a necessidade de monitoramento das áreas onde o resíduo foi aplicado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. I. F.; MACHADO, A. A.; ZONTA, E. P. (1993). Tópicos especiais de estatística experimental utilizando o SANEST (sistema de análise estatística para microcomputadores). In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 5.; REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 38. 1993, Porto Alegre. *Resumos...* Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 110.

ANDRADE, C. A.; MATTIAZZO, M. E. (2000). Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.58, p.59 – 72, dez.

ANDRADE, C.A. (1999). *Nitratos e metais pesados em solos e plantas de Eucalyptus grandis após aplicação de biossólidos da ETE Barueri*. 65p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

ANDRADE, C. A. (2004). *Fração orgânica de biossólido e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um latossolo cultivado com eucalipto*. 121p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. (2000). Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolo repetidamente tratados com biossólido. *Scientia Agrícola*, v.57, n.4, p.1 – 6.

BAHRI, A.; BERNSDTSSON, R. (1996). Nitrogen source impact on the spatial variability of organic carbon and nitrogen in soil. *Soil Science*, v.161, n.5, p. 288-297.

BATJES, N. H. (1996). The total C and N in soil of the world. *European Journal Soil Science*, v.47, p. 151 – 163.

BHATI, M.; SING. G. (2003). Growth and mineral accumulation in *Eucalyptus camaldulensis* seedlings irrigated with mixed industrial effluents. *Bioresource Technology*, v.88, p. 221-228.

BONAN, G. B. (1993). Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 43, n. 3, p.303 – 14.

BOYLE, M.; PAUL, E. A. (1989) Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge. *Soil Science Society American Journal*, v.53, p.99 – 103.

BRADY, N. C. (1989). *Natureza e propriedades dos solos*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos.

BRASIL (1998). Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Legislativo, Brasília, DF, 12 fev. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9605.htm>. Acesso em: 26 jul. 2006.

CARVALHO, P.C.T.; BARRAL, M.F. (1981). Aplicação de Le como fertilizante. *Fertilizantes*, v. 63, n. 2, p.1 – 4.

CERRI, et al. (1992). *O ciclo do carbono no solo*. In: CARDOSO, E. J. B.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. *Microbiologia do solo*. Piracicaba: São Paulo. Cap. 6, p.73 – 90.

CHRISTIE, P.; EASSON, D. L.; PICTON, J. R.; LOVE, S. C. P. (2001). Agronomic value of alkaline-stabilized sewage biosolids for spring barley. *Agronomy Journal*, v.93, n.1, p.144 – 51.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (1999). Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação. São Paulo, CETESB, 32 p.

CONAMA (2006). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 30 ago. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506. Acesso em 04 nov. 2006.

DAVIDSON, E.A.; HART, S.C. e FIRESTONE, M.K. (1992). Internal cycling of nitrate in soils of nitrate in soils of a mature coniferous forest. *Ecology*, v.73, p.1148-1159.

DÍAZ-BURGOS, M.A.; POLO, A. (1991). Variaciones de la fracción orgánica durante el compostaje de lodos de depuradoras. *Suelo y Planta*, v.1, p.453 – 66.

EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19 ed., Washington D.C., American Public Health Association, 953p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES (1984). 40 CFR Part 503. *Environmental Regulations and Technology: Land Application of Municipal Sludge*. v.58, n.32, EPA 625/1-83-016: Cincinnati. 178p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES. (1999). *Biosolids generation, use, and disposal in the United States*. Solid Waste and Emergency Response (5306W), Office of Solid Waste, Washington. 74p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES (2001). *Database of Sources of Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the United States*. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. March, 2001. EPA/600/C-01/012.

EVANS, J. R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C3 plants. *Oecologia*, v.78, p. 9 – 19.

FELDMANN, F. (2001). Mudanças Climáticas: da Ação Local ao Impacto Global. In: FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Disponível em: <<http://www.forumclima.org.br/feldmann.htm>>. Acesso em 5 mar. 2001.

FERNANDES, S.A.P.; BETTIOL, W. & CERRY, C.C. (2005). Effect of sewage sludge on microbial, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. *Applied Soil Ecology*, v.30, p.65-77.

FISKELL, J. G. A.; NEARY, D.G.; COMERFORD, N. B. (1990). Slash pine and understorey interception of micronutrients mineralized from sewage sludge applied to a sandy acidic forest soil. *Forest Ecology and Management*, v.37, n.1/3, p.27 – 36.

FONTAINE, F.; MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. (2003). *The priming effect of organic matter: a question of microbial competition?* Soil Biol. and Biochem., v.35, p.837-843.

GHOLZ, H. L.; LIMA, W. P. (1997). The ecophysiological basis for productivity in the tropics. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. Cap. 7, p.213 – 46.

GILMOUR, J.T.; ROMAN, F.; CLARK, M.D. (1996). Decomposition of biosolids in a disposal site soil. *Journal of Environmental Quality*, v.25, p.1083 – 86.

GRAÇA, P. M. L. A. (1997). *Conteúdo de carbono na biomassa florestal da Amazônia e alterações após a queima*. 105p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1997.

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

GUEDES, M. C (2005). *Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com Eucalyptus grandis*. 154p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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

GUEDES, M. C. et al. (2006). Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.267 – 80.

GUO, L. B.; SIMS, R. E. H.; HORNE, D. J. (2002). Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand. I: biomass and nutrient accumulation. *Bioresource Technology*, v.85, p.273 – 83.

HARRINGTON, R. A.; BROWN, B. J.; REICH, P. B. (1989). Ecophysiology of exotic and native shrubs in southern Wisconsin. I: Relationship of leaf characteristics, resource availability and phenology to seasonal patterns of carbon gain. *Oecologia*, v. 80, p. 356 – 67.

HARRISON, R.B.; HENRY, C.L.; XUE, D.S. (1994) Magnesium deficiency in Douglas-fir and Grand-fir growing on a sandy outwash soil amended with sewage sludge. *Water, Air and Soil Pollution: An International Journal of Environmental Pollution*, v.75, n.1/2, p.37 – 50.

HART, J. B.; NGUYEN, P. V.; URIE, D. H.; BROCKWAY, D. G. (1988). Silvicultural use of wastewater sludge. *Journal of Forestry*, v.17, p.17 – 24.

HENRY, C.L. et al. (1994). Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Packe Forest Sludge Research Program. *Forest Ecology and Management*, v.66, n.1/3, p.137 – 49.

HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HINCKLEY, T.M.; HARRISON, R.B. (1993). The use of municipal and pulp paper sludges to increase production in forestry. *Journal of Sustainable Forestry*, v.1, n.3, p.41 – 45.

HSIEH, Y.P.; LOWELL, A.D. & MOTTO, H.M. (1981). Modeling sewage sludge decomposition in soil: I. organic carbon transformation. *Journal of Environmental Quality*, v.10, p.54-64.

KALLARACKAL, J. & SOMEN, C.K. (1997). An ecophysiological evaluation of the suitability of *Eucalyptus grandis* for planting in the tropics. *Forest Ecology and Management*, v.95, p.53-61.

KING, L.D. (1984). Availability of nitrogen in municipal, industrial and animal wastes. *Journal of Environment Quality*, v.13, p.609-617.

KLINTOWITZ, J. (2006). Apocalipse já. *Veja*, São Paulo, n. 24, p.68 – 83, junho.

LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T.I.; DAICLE, S. (1995). Effect wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation on two *Salix* species. *Plant and Soil*, v.17, n.1/2, p.303 – 16.

LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. (2000). Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*, v.128, p.181 – 196.

LACLAU, J. P. et al. (2003). Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. *Annals of Botany*, v.9, p.1 – 14.

LAL, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, v. 116, p. 353 – 62.

LARCHER, W. (2000). *Ecofisiologia vegetal*. Tradução de Carlos Henrique B. A. Prado. São Carlos: Rima

LINHARES, C. A.; PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. (2000). Relação entre volume de madeira e índice de área foliar em um povoamento de *Pinnus* spp.: estudo de caso. *Revista Árvore*, Viçosa, v.24, n.1, p.47 – 54.

MADEIRA, M. V. et al. (2002). Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. Plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management*, v.171, p.75 – 85.

MARTINS, L. F. S. (2002). *Configuração do sistema radicular das árvores de Eucalyptus grandis em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido*. 73p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

MARRICHI, A. H. C.; MIKE, G. R.; STAPE, J. L. Taxas de fotossíntese em clones de *Eucalyptus* de alta produtividade primária líquida. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 12., 2005, São Paulo. *Anais eletrônicos...* Piracicaba: ESALQ/USP. Disponível em: <http://www.usp.br/siicusp/13osiicusp/aprovados/subarea_tit-_AG_2.htm>. Acesso em: 16 mai. 2006.

MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B. (1996). O monitoramento do carbono em áreas florestadas. *Série Técnica IPEF*, Piracicaba, v.10, n.9, p.6 – 10.

MARTINEZ, C. A. Aspectos Básicos da Fotossíntese. Disponível em: <<http://www.ufv.br/dbv/pgfv/foto12.htm>>. Acesso em 8 dez. 2002.

MATA-GONZÁLEZ, R.; SOSEBEE, R. E.; WAN, C. (2002). Physiological impacts of biosolids application in desert grasses. *Environmental and Experimental Botany*, v.48, n. 2, p.139 – 48.

McNAB, W. H.; BERRY, C. R. (1985). Distribution of aboveground in three pine species planted on a devastated site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. *Forest Science*, v.31, n.2, p.373 – 382.

MELO, W.J. et al. (1994). Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações de matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, p.449 – 455.

MELO, W.J. et al. (2001). O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M. T. et al. *Biossólido na agricultura*. Pinheiros: São Paulo. Cap. 11, p. 289 – 363.

MILES, R.; BROWN, J.R.; ARNOLD, K. (1994). *Biosolids glossary of terms*. Disponível em: <<http://mmextension.missouri.edu/xplor/waterq/wq0449.htm>> Acesso em 8 abr. de 1995.

MULVANEY, R.L. (1996). Nitrogen – inorganic forms. In: BIGHAM, J.M. *Methods of soil analysis: chemical methods*. Madison: Soil Science Society of America; American Society of Agronomy. Cap.38, p.1123 – 84.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. (2002). O balanço de carbono da Amazônia Brasileira. *Estudos avançados*, v.16, n.45, p. 81 – 90.

NYAMANGARA, J.; MZEZEWA, J. (2001). Effect of long-term application of sewage sludge to a grazed grass pasture on organic carbon and nutrients of a clay soil in Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.59, p. 13-18.

O'BRIEN, M. J.; O'BRIEN, C. M. (1995). Ecologia e modelamento de florestas tropicais. Belém: FCAP.

PENG, S.; KRIEG, D. R. (1992). Gas exchange traits and their relationship to water use efficiency of grain sorghum. *Crop Science*, v.32, p. 386 – 381.

PEREIRA, A. R. (1988). Aspectos Fisiológicos da produtividade vegetal. (Informações Técnicas). *O agrônomo*, v. 40, n.3.

PHILLIPS, R. P.; FISHER, J.T.; MEXAL, J.G. (1986). Fuelwood production utilizing *Pinus eldarica* and sewage sludge fertilizer. *Forest Ecology and Management*, v.16, n.1/4, p.95 – 102.

PIMENTEL, C. 1998 *Metabolismo de carbono na agricultura tropical*. Rio de Janeiro: Editora Universidade Rural.

POGGIANI, F. (1985). *Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de Eucalyptus e Pinus. Implicações silviculturais*. 211p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

POLGLASE, P.J.; MYERS, B. J. (1995). Tree plantation for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G. *Environmental management: the role of eucalypts and other fast growing species*. Proceedings of the Joint Australian/Japanese Workshop held in Australia, p. 100-109.

PROTOCOLO DE QUIOTO (1997). Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. Disponível em: <www.forumclimabr.org>. Acesso em 05 dez. 2002.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H. e QUAGGIO, J.A. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais* (Ed). Campinas: Instituto Agrônomo, 285p.

REZENDE, C. I. O. (2005). *Influência da aplicação do lodo de esgoto (biossólido) sobre a concentração e estoque de nutrientes na biomassa do sub-bosque, na serapilheira e no solo de um talhão de E. grandis*. 81p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

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

RIEKERK, H. (1981). Effects of sludge disposal on drainage solutions of two forest soils. *Forest Science*, v.27, n.4, p.792 – 800.

ROBINSON, M. B.; POGLASE, P. J.; WESTON, C. J. (2002). Loss of mass and nitrogen from biosolids applied to pine plantation. *Australian Journal of Soil Science*, v.40, n.40, p.1027 – 39.

SABESP. (2006). Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br>>. Acesso em: 04 de nov.

SABEY, B. R. (1974). The use of sewage sludge as a fertilizer. *Enviromental Engineering Series*, v. 72, p.108 – 12.

SAMPSON, D.A. et al. (2006). Fertilizationnext term effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production: A new hybrid process model for stand management. *Forest Ecology and Management*, v.221, n.1-3, p. 91-109

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. (1999). Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. *Scientia Forestalis*, v.56, n.155 – 69.

SANTOS, J. et al. (2001). Modelos estatísticos para estimar a biomassa acima do nível do solo da floresta tropical úmida da Amazônia Central. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 445 – 54.

SCHROEDER, P. (1992). Carbon storage potencial of short rotation tropical tree plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 50, p. 31 – 41.

SEEMANN, J. R. et al. (1987). Environmental effects on photosynthesis, nitrogen use efficiency, and metabolic pools in leaves of sun and shade plants. *Plant Physiology*, v.84, p.796 – 802.

SGARBY, F. 2002. *Produtividade de Eucalyptus sp. Em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo*. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, W. et al. (2001). Taxa fotossintética líquida de *Eucalyptus citriodora* Hook e *E. grandis* W. Hill em resposta a diferentes níveis de água no solo e associação com *Brachiaria brizantha* Stapf. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n.5, p.1205 – 09.

SLOAN, J. J.; BASTA, N. T. (1995). Remediation of acid soils by using alkaline biosolids. *Journal of Environmental Quality*, v.24, n.6, p.1097 – 1103.

SMETHURST, P. et al. (2003). Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management*, v.86, p. 145 – 53.

SOARES, M.T.S. (2003). *Taxas de mineralização e de lixiviação do nitrogênio, e alterações da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo degradado e outro não-degradado fertilizados com biossólido e florestados com Eucalyptus grandis*. 142p. Tese (doutorado). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2003.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. (2002). Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, v.26, n.5, p.533 – 39.

SOBRINHO, P. A. (2001). Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTYA, M. T., et al. *Biossólido na agricultura*. Pinheiros: São Paulo. Cap. 2, p. 7 – 40.

SWIADER, J. M.; MOORE, A. (2002). SPAD – Chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins. *Journal of Plant Nutrition*, v.25, p.1089 – 100.

TERRY, R.E.; NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. (1979). Carbon cycling during sewage sludge decomposition in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.43, p. 494-499.

TORRES, J. A. P. (2003). *Aspectos da fotossíntese e da assimilação do nitrogênio em quatro espécies de leguminosas arbóreas*. 103p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

TSADILAS, C. D.; et al. (1995). Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Communication Soil Science and Plant Analysis*, v.26, n.15/16, p.2603 – 19.

TSUTYA, M. T. (2000). Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O. A. *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: São Paulo. EMBRAPA Meio Ambiente. Cap.4, p.69 – 105.

TURNER, J.; LAMBERT, M. (2000). Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, v. 133, p.231 – 47.

VAZ, L. S. V. (2000). *Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de Eucalyptus grandis fertilizado com biossólido*. 41p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

VELASCO-MOLINA, M. (2004). Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólido. 66p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

VIEIRA, R. F.; CARDOSO, A. A. (2003). Variações nos teores de nitrogênio mineral em solos suplementados com lodo de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.7, p. 867 – 74, jul.

VLAWEIS, J.; WILLIAMS, E. (1971). Utilization of municipal organic wastes as agricultural fertilizers. *California Agricultural*, v.25, n.7, p.7 – 9.

WALTON, M. et al. (2001). Persistence of municipal biosolids in a Chihuahuan desert rangeland 18 years after application. *Arid and Land research Management*, v.15, n.3, p. 223-232.

WEETMAN, G. F. (1993). Responses of Western hemlock, Pacific silver fir and Western red cedars plantations on northern Vancouver Island to applications of sewage sludge and inorganic fertilizer. *Canadian Journal of Forestry Research*, v.23, n.9, p.1815 – 20.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. (2002). Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. *Revista Árvore*, v.26, n.4, p.1 – 9.

YAN, S. et al. (2000). Responses of photosynthesis and water relations to rainfall in the desert shrub creosote bush (*Larrea tridentata*) as influenced by municipal biosolids. *Journal of Arid Environments*. v. 46, p. 397 – 412.

ZHANG, H.; BASTA, N.; STIEGLER, J. (2001). Using biosolids as a plant nutrient source. n.1/4. Disponível em: <<http://pearl.agcomm.okstate.edu/plantsoil/soils/cr-220.pdf>> Acesso em: 03 jan. 2004.

GLOSSÁRIO

Biomassa epígea – quantidade de massa viva de eucalipto acima do solo, sem considerar o sistema radicular, existente em um determinado espaço e em dado instante.

Biossólido alcalino – resíduo do processo de tratamento do esgoto por meio da adição química de cal virgem e cloreto férrico, com potencial para promover o desenvolvimento de plantas sem causar danos ao ambiente e ao homem.

Biossólido polimerizado – resíduo do processo de tratamento do esgoto por meio da adição de polímero orgânico, com potencial para promover o desenvolvimento de plantas sem causar danos ao ambiente e ao homem.

Ciclagem bioquímica – ciclagem interna de nutrientes móveis nas plantas, por meio da retranslocação destes elementos de tecidos em fase de senescência para tecidos novos em formação.

Ciclagem biogeoquímica – ciclagem de nutrientes envolvendo os compartimentos vegetação e solo, por meio do retorno dos elementos ao solo com a queda de material orgânico das árvores e morte de raízes. Com a decomposição da matéria orgânica esses elementos são mineralizados tornando-se novamente disponíveis às plantas.

Condutância estomática – inverso da resistência estomática. É diretamente proporcional à abertura dos estômatos.

CUA – Coeficiente de utilização aparente. É a relação entre a quantidade de nutrientes imobilizados nas árvores tratadas, menos a quantidade nas árvores testemunhas, e o conteúdo de nutrientes que entrou no sistema com a aplicação de cada tratamento.

DAP – Diâmetro a altura do peito. Diâmetro da árvore medido na altura de 130 cm a partir do solo.

Despolimerização – Quebra de compostos orgânicos em moléculas mais simples durante o processo de decomposição.

Efeito “priming” – decomposição e diminuição da matéria orgânica original do solo causada em função do aumento da população microbiana, devido à entrada de determinado tipo e quantidade de material orgânico no sistema.

Equações alométricas – equações ajustadas a partir da aplicação de modelos estatísticos sobre variáveis coletadas com a cubagem rigorosa das árvores, para estimar o desenvolvimento de plantas sem necessidade de métodos destrutivos.

Estoque de N – Conteúdo ou quantidade de N armazenado em determinado compartimento do ecossistema.

Estoque de C – Conteúdo ou quantidade de C armazenado em determinado compartimento do ecossistema.

EUA – Eficiência no uso da água. É a razão entre a taxa de fotossíntese e a taxa de transpiração.

Fórmula de Smalian – Equação largamente utilizada no setor florestal para realizar a cubagem rigorosa das árvores e ajustar equações alométricas.

IAF – Índice adimensional que representa a relação entre a quantidade de folhas em m^2 por área de solo em m^2 .

IMA – Incremento médio anual. Representa a taxa anual de desenvolvimento da floresta.

Imobilização – refere-se a qualquer mecanismo que contribua para o decréscimo de um determinado nutriente disponível no solo, a exemplo da imobilização na biomassa microbiana e nas árvores.

Mineralomassa – Conteúdo de nutrientes minerais imobilizados nos componentes da vegetação.

Plantas C_3 – Plantas cujo primeiro produto estável da cadeia bioquímica da fotossíntese é o ácido 3-fosfoglicério, uma molécula com três carbonos.

Pluviolixiviados – compostos orgânicos provenientes da respiração das plantas, que são lixiviados das folhas pela água da chuva.

“pool” – reservatório

Rubisco – Enzima responsável pela carboxilação no ciclo de plantas C_3 .

Serapilheira – manta constituída por material orgânico depositado pelas plantas, que fica cobrindo o solo e que vai sendo decomposta e incorporada ao solo.

Silvicultura – É o estudo das técnicas utilizadas para o cultivo de espécies florestais.