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

**Ciclagem de nutrientes e produtividade de madeira em povoamento de
Eucalyptus grandis sob diferentes manejos de resíduos florestais e
fertilização mineral**

Ayeska Hübner Braga Nunes Souza

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2015**

Ayeska Hübner Braga Nunes Souza
Engenheira Agrônoma

Ciclagem de nutrientes e produtividade de madeira em povoamento de *Eucalyptus grandis* sob diferentes manejos de resíduos florestais e fertilização mineral

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Souza, Ayeska Hübner Braga Nunes

Ciclagem de nutrientes e produtividade de madeira em povoamento de *Eucalyptus grandis* sob diferentes manejos de resíduos florestais e fertilização mineral / Ayeska Hübner Braga Nunes Souza.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
110 p. : il.

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

1. Cultivo mínimo 2. Eucalipto 3. Silvicultura 4. Ciclagem biogeoquímica
5. Sustentabilidade florestal I. Título

CDD 634.9734
S729c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

Ao meu marido Thiago, pelo amor que tornou tudo possível.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas maravilhas de sua criação e por sempre estar presente em minha vida guiando meus passos.

Ao meu marido Thiago, sem o qual esta conquista não teria valido a pena. Seu inabalável amor, incondicional apoio e constante paciência me ensinaram tanto sobre sacrifício, disciplina e comprometimento.

Aos meus pais Margarete e Irton, grandes exemplos a quem me espelho, por sempre apoiarem minhas decisões e por me ensinarem o valor do estudo, do trabalho e da perseverança. Ao meu irmão Patrick por ser o meu melhor amigo desde sempre.

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves pela orientação, ensinamentos e amizade. Agradeço pela confiança que depositou em mim desde o primeiro contato e por me encorajar, com serenidade e bom senso, a seguir em frente nos momentos mais adversos.

Ao Dr. Daniel Mendham pela disponibilidade em me orientar e por me proporcionar uma experiência singular na Tasmânia. Agradeço pela agradável convivência, amizade e compreensão nos momentos de dificuldades durante o estágio na Austrália.

Ao meu colega de pós-graduação e amigo José Henrique Tertulino Rocha pelas fundamentais contribuições para que esta tese fosse concluída, pelos ótimos momentos que compartilhamos e por ser um exemplo, para mim, de competência e dedicação à pesquisa.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais, por terem me proporcionado todo o suporte acadêmico e técnico necessários à minha formação. À todos os professores e funcionários que fizeram parte da minha vida acadêmica em especial, à Giovana Oliveira pela pronta disponibilidade em ajudar a resolver todos os problemas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão das bolsas de estudo (Processos: 2011/20600-7 e 2012/23757-7) e pelo suporte financeiro.

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) e ao Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF), especialmente ao Dr. José Carlos Arthur Júnior e toda a equipe de estagiários, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO Land and Water) na Tasmânia e em Western Australia por ter me fornecido toda a estrutura para que o meu estágio fosse realizado.

À equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, especialmente ao Rildo Moreira, Lorival Fermiano e Elaine por todo o suporte durante as coletas de campo e por tornarem as visitas à Itatinga tão agradáveis.

Às minhas inesquecíveis e grandes amigas Rafaela Lorenzato Carneiro e Ana Beatriz Almeida Prado por todos os momentos de companheirismo e descontração.

Ao meu amigo Clayton Arcade Alvares pelas contribuições, disponibilidade em me ajudar em todos os momentos e pelas palavras de conforto nas horas difíceis.

Aos meus amigos Tiago de Oliveira Godinho, Eduardo Marques, Ranieri Ribeiro Paula e Alexandre de Vicente Ferraz pelo apoio nas discussões do trabalho, pela amizade e por tornarem o dia a dia mais divertido.

Aos pesquisadores do CSIRO, Dr. Auro Almeida, Dr. Philip Smethurst e Dra. Jody Bruce por todas as contribuições científicas, pela agradável convivência e disponibilidade em me ajudar em todas as dificuldades na Austrália.

Aos meus amigos da Austrália Jenni Bourdon, Marta González, Mário Vega, David Blackburn, Kathy Allen e José Miguel Pereira pela amizade, apoio nos momentos de saudade e pela disposição em explorar a Tasmânia.

À todas as pessoas que passaram pela minha vida durante esta caminhada e deixarão saudade.

Muito obrigada!

“Nós somos todos visitantes deste tempo, deste lugar. Estamos somente de passagem. O nosso objetivo aqui é observar, aprender, crescer e amar... E então voltamos pra casa.”

PROVÉRBIO ABORÍGENE

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 O cultivo mínimo do solo sob eucalipto	17
2.2 Nutrientes na biomassa e nos resíduos florestais	18
2.3 Ciclagem de nutrientes em plantações florestais	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Caracterização da área experimental.....	21
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	24
3.3 Avaliações	25
3.3.1 Atributos químicos do solo	25
3.3.2 Ciclagem biogeoquímica de nutrientes	26
3.3.2.1 Serapilheira depositada.....	26
3.3.2.2 Serapilheira acumulada.....	27
3.3.3 Crescimento das árvores	27
3.3.4 Concentração e acúmulo de nutrientes	28
3.3.5 Balanço nutricional	29
3.3.6 Análises estatísticas	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Atributos químicos do solo	31
4.1.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais	31
4.1.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais.....	41
4.2 Ciclagem biogeoquímica de nutrientes	51
4.2.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais	51
4.2.1.1 Serapilheira depositada.....	51
4.2.1.2 Serapilheira acumulada.....	55
4.2.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais.....	58
4.2.2.1 Serapilheira depositada.....	58
4.2.2.2 Serapilheira acumulada.....	62
4.3 Crescimento das árvores.....	65
4.3.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais	65

4.3.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais.....	69
4.4 Concentração e acúmulo de nutrientes na parte aérea.....	73
4.4.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais	73
4.4.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais.....	83
4.5 Balanço nutricional do povoamento florestal	92
4.5.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais	92
4.5.2 Efeito do manejo da aplicação dos fertilizantes minerais.....	95
5 CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS.....	101

RESUMO

Ciclagem de nutrientes e produtividade de madeira em um povoamento de *Eucalyptus grandis* sob diferentes manejos de resíduos florestais e fertilização mineral

O sistema de cultivo mínimo é caracterizado por um conjunto de operações mínimas de preparo de solo em que a maior parte dos resíduos florestais é mantida sobre o solo, a fim de garantir as demandas de produção e a sustentabilidade produtiva do sistema. Diante disto, os objetivos deste estudo foram: i) Avaliar a influência da remoção total ou parcial dos resíduos florestais e da fertilização mineral na fertilidade do solo e na produtividade de madeira; ii) Quantificar a biomassa e o estoque de nutrientes na parte aérea, em uma rotação de cultivo, sob manejo de resíduos florestais e omissões de nutrientes na fertilização mineral; iii) Quantificar a influência do manejo de resíduos florestais e da fertilização mineral na deposição, acúmulo, decomposição e qualidade nutricional da serapilheira; iv) Quantificar a exportação de nutrientes via colheita de madeira e outros componentes florestais; v) Avaliar o potencial de produtividade de madeira, com base no balanço nutricional, sob diferentes cenários de manejo florestal. Foi instalado um experimento com diferentes manejos de resíduos florestais e fertilização. Os tratamentos foram divididos em dois grupos em que o primeiro consistiu em remoção total ou parcial dos resíduos florestais: copa (folhas e galhos), casca e serapilheira. O segundo grupo de tratamentos consistiu na omissão de nutrientes na fertilização mineral: N, P, K ou calagem. Durante a rotação de oito anos foram monitoradas a fertilidade do solo, ciclagem biogeoquímica de nutrientes, crescimento e estado nutricional das árvores. Os diferentes manejos dos resíduos florestais e fertilização mineral apresentaram pouca influência na fertilidade do solo, pois, os níveis de nutrientes no solo estavam adequados, devido à aplicação de fertilizantes minerais no momento da instalação do experimento. A remoção total ou parcial dos resíduos florestais não influenciou a produtividade de madeira. Contudo, no tratamento em que o K foi omitido na fertilização, houve redução de 50% na produtividade de madeira. A omissão de P na fertilização não afetou a produtividade de madeira na rotação de cultivo avaliada, porém este foi o nutriente mais limitante quanto ao número potencial de futuras rotações. A remoção total ou parcial dos resíduos florestais não influenciou na ciclagem biogeoquímica de nutrientes, porém omissão de K via fertilização reduziu em 60% a deposição anual deste nutriente o que afetou sua a ciclagem biogeoquímica. Os resultados deste estudo mostram que embora os resíduos florestais exerçam funções fundamentais na qualidade química do solo e na nutrição mineral das árvores, a inadequada fertilização do solo pode diminuir expressivamente o potencial produtivo do sítio florestal.

Palavras-chave: Ciclagem biogeoquímica, Cultivo mínimo, Eucalipto, Silvicultura, Sustentabilidade florestal

ABSTRACT

Nutrient cycling and growth in *Eucalyptus grandis* plantation under different forest residues management and fertilization

The minimal tillage system is characterized by practices of reduced soil management which retains most part of forest residues in the production site, aiming to supply the forest demand and the sustainability of the production system. The aims of this study are: i) Access the effect on soil fertility and site production of total and partial removal of harvest residues and mineral fertilization. ii) Quantify the biomass and nutrient rates in trees along one eucalypt rotation, under different residues management and mineral fertilization. iii) Quantify the effects of residues management and mineral fertilization on deposition, accumulation, decomposition and nutritional qualities of litter. iv) Quantify the nutrient exportation due to the harvest, considering steam and other parts. v) Access productivity potential according to the nutritional balance under different forest management cases. For this study an experimental site with different residues management and mineral fertilization was established. The treatments were separated in two groups. The first one included the treatments with total or partial removal of forest residues: canopy (leaves and stems), bark and litter. The second group of treatment included the omission of nutrients in mineral fertilizer: N, P, K or lime. During eight years rotation were monitored soil fertility, biogeochemical cycling of nutrients, growth and tree nutritional status. The different residues management and mineral fertilizations has showed minor effects on soil fertility once the nutrient rates on soil were suitable due to the mineral fertilization applied for site preparation. However, when the fertilization was carried out without K, reduction of 50% in growth was observed. The omission of P in fertilization did not affect the wood productivity during the forest rotation, but P was the most limiting nutrient for the potential number of future rotations. The biochemical nutrient cycling was not affected by total or partial removal of forestry residues. Annual deposition of K was 60% reduced when the nutrient was not applied by fertilization, which affected the nutrient cycling. The results of this study demonstrated that despite the benefits of forest residues retention on chemical proprieties of soils, the inadequate fertilization reduces expressively the productive potential of the site.

Keywords: Biogeochemical nutrient cycling, Minimal tillage, Eucalypt, Forestry, Forestry sustainability

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, desde a introdução do gênero *Eucalyptus* no início do século XX, as plantações comerciais sofreram profundas transformações quanto ao manejo florestal. Ao final dos anos 80, com a consolidação do cultivo mínimo, foi estabelecido um novo padrão de manejo florestal, atento às demandas de produção de madeira e à sustentabilidade do sistema (GONÇALVES et al., 1997). De fato, o desafio da gestão florestal, no sentido de manter ou elevar a produtividade com baixo impacto à sustentabilidade da produção, é aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais, seja por meio do melhoramento genético, da alocação sítio-específica dos genótipos e/ou do uso apropriado de práticas silviculturais (GONÇALVES et al., 2013).

A maioria das plantações comerciais brasileiras é manejada em rotações de cultivo que duram de seis a oito anos. Estas estão estabelecidas em regiões onde há deficiências hídricas e nutricionais em diferentes graus de severidade (GONÇALVES, 2002; STAPE et al., 2014). O adequado manejo dos resíduos florestais tem sido considerado como prática que garante a manutenção da produtividade de madeira em médio e longo prazo em plantações de eucalipto de ciclo curto (TIESSEN et al., 1994; SHAMMAS et al., 2003; NAMBIAR; KALLIO, 2008).

O gradual declínio da fertilidade do solo após várias rotações de cultivo vem sendo atribuído à operação de colheita florestal, que exporta grandes quantidades de nutrientes do sítio (O'CONNELL et al., 2000; MENDHAM et al., 2003; SANKARAN et al., 2005; VERSINI et al., 2014). A retenção de resíduos da colheita nas rotações subsequentes apresenta benefícios para a manutenção e liberação controlada de nutrientes durante o período de crescimento das árvores (TIESSEN et al., 1994; MENDHAM et al., 2002; O'CONNELL et al., 2004; CORBEELS et al., 2005), mantém ou eleva o estoque de carbono no solo (SMITH; HEATH, 2002; MENDHAM et al., 2003), melhora as características físicas do solo protegendo-o da erosão e da lixiviação de nutrientes (GONÇALVES et al., 2002; BIZON, 2005) e reduz a infestação de plantas invasoras (SILVA et al., 1997).

A fertilização mineral representa a forma artificial de incorporar nutrientes no solo e seu uso no cenário florestal assume a premissa que as aplicações devam suprir as necessidades das árvores em fase inicial de crescimento. Em geral, quando necessária, a fertilização é feita até o segundo ano de plantio a partir do qual se inicia a ciclagem de nutrientes (GONÇALVES et al., 1997; FISHER; BINKLEY, 2000). Contudo, a efetividade do uso de fertilizantes minerais para elevar a produção varia com uma série de fatores, como

sítio, espécie, tipo de preparo do solo, competição com plantas daninhas, uso anterior do solo e aspectos relacionados à própria técnica de adubação (BARROS; COMERFORD, 2002).

A abordagem de um estudo nutricional quanto ao efeito combinado de diferentes sistemas de manejo de resíduos e a aplicação de fertilizantes minerais na produtividade de madeira em plantações de eucalipto, apresenta grande relevância sob os aspectos de sustentabilidade. Diante disto, propõem-se as seguintes hipóteses: I) A manutenção dos resíduos florestais eleva a disponibilidade de nutrientes no solo; II) A remoção total ou parcial dos resíduos florestais reduzem a produtividade de madeira; III) O P e o K são os nutrientes mais limitantes da produtividade de madeira; IV) A remoção total ou parcial dos resíduos florestais e ou a omissão de nutrientes via fertilização mineral reduzem a taxa de ciclagem biogeoquímica de nutrientes.

Neste contexto, em um povoamento de *E. grandis*, os objetivos deste estudo foram: i) Avaliar a influência da remoção total ou parcial dos resíduos florestais e da fertilização mineral na fertilidade do solo e na produtividade de madeira; ii) Quantificar a biomassa e o estoque de nutrientes na parte aérea, em uma rotação de cultivo, sob manejo de resíduos florestais e omissões de nutrientes na fertilização mineral; iii) Quantificar a influência do manejo de resíduos florestais e da fertilização mineral na deposição, acúmulo, decomposição e qualidade nutricional da serapilheira; iv) Quantificar a exportação de nutrientes via colheita de madeira e outros componentes florestais; v) Avaliar o potencial de produtividade de madeira, com base no balanço nutricional, sob diferentes cenários de manejo florestal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O cultivo mínimo do solo sob eucalipto

Em regiões tropicais os recursos naturais como água e nutrientes são os mais limitantes para a sustentabilidade da produtividade das florestas plantadas (BARROS; COMERFORD, 2002; BARROS et al., 2005; SILVA, 2006; STAPE et al., 2010). O solo é um importante componente relacionado à produtividade das florestas, responsável pelo suprimento de água e de nutrientes. A sua conservação ou melhoria da qualidade do solo é determinante para a sustentabilidade do sistema florestal, sob risco do declínio da produtividade de madeira, com sérias consequências econômicas e ambientais (TÓTOLA; CHAER, 2002).

Nas décadas de 70 e 80, o preparo de solo nas áreas reflorestadas consistia na eliminação, em geral por queima, dos resíduos da vegetação anterior e no revolvimento intenso do solo, assemelhando-se aos cultivos agrícolas convencionais. Esta prática proporcionava rápido crescimento inicial da muda, o que justificava seu uso, porém, boa parte dos nutrientes disponibilizados pela queima e pelo revolvimento do solo era perdida pelos processos de erosão e lixiviação (GONÇALVES et al., 2002). Desta forma, este método se tornou inadequado, pois as áreas de produção florestal demandavam o aumento da produtividade de madeira e possuíam relevo acidentado, solos de baixa fertilidade natural e degradados. Os frequentes questionamentos quanto à sustentabilidade florestal contribuíram para o desenvolvimento do sistema de cultivo mínimo (GONÇALVES, 1995).

O sistema de cultivo mínimo é caracterizado por um conjunto de operações mínimas de preparo de solo em que a maior parte dos resíduos florestais é mantida sobre a superfície do solo (GONÇALVES et al., 2002). Este sistema resulta na redução dos impactos ambientais e em técnicas mais adequadas ao desenvolvimento das árvores, de modo a garantir maior sustentabilidade da produção de madeira nos plantios florestais (REIS; REIS, 1995). Segundo Tótola e Chaer (2002), o cultivo mínimo é considerado um método conservacionista desde que se mantenha pelo menos 1 t ha^{-1} ou 30 % da superfície do solo coberta com resíduos florestais. De acordo com estes autores, como não há incorporação ou queima dos resíduos, as perdas de nutrientes por lixiviação, volatilização e erosões eólica e hídrica são reduzidas.

Zen et al. (1995) observaram, para um povoamento de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, que a adoção do sistema de cultivo mínimo permitiu que deixassem de ser eliminadas, por conta das perdas associadas às queimas, de 34 a 44 t ha^{-1} de resíduos florestais, sendo 20 a 30 t ha^{-1} compostas pela serapilheira e 14 t ha^{-1} por galhos e folhas.

Para Gonçalves (2002), as perdas devido à queima totalizaram 40 t ha⁻¹, sendo 20 t ha⁻¹ de serapilheira, 12 t ha⁻¹ de casca e 8 t ha⁻¹ de galhos e folhas. Em toda esta biomassa dos resíduos estão contidos cerca de 51 a 82% dos nutrientes da biomassa vegetal.

2.2 Nutrientes na biomassa e nos resíduos florestais

O gênero *Eucalyptus* tem sido amplamente utilizado para compor plantações florestais ao redor do mundo, principalmente em países de clima tropical e subtropical, por apresentar características como rápido crescimento e altas produtividades sob diferentes condições edafoclimáticas (GONÇALVES et al., 1997; LACALU et al., 2010). No entanto, têm sido observadas reduções na produtividade a partir da segunda rotação de cultivo e este fato é atribuído às práticas de manejo como a remoção e ou queima dos resíduos florestais (CORBEELS et al., 2005; KUMARASWAMY et al., 2014), que resulta em alta exportação de nutrientes presentes na biomassa colhida em cada rotação de cultivo (MADEIRA; PEREIRA, 1990; MATHERS et al., 2003; SHAMMAS et al., 2003; CORBEELS et al., 2005; SANKARAN et al., 2005).

De fato, a avaliação do acúmulo de biomassa é importante para predizer a capacidade produtiva de um determinado sítio. A quantificação da biomassa florestal (folhas, galhos, casca, madeira e raízes) infere sobre a produtividade do sistema florestal, fluxos de energia, ciclagem de nutrientes e balanços nutricionais (SOARES et al., 2005). O estudo da retenção da biomassa no solo ao longo das rotações de cultivo, por meio do manejo de resíduos florestais, tem sido considerado como o fator chave para que a sustentabilidade produtiva seja alcançada em médio e longo prazo (SHAMMAS et al., 2003; SANKARAN et al. 2005) .

As quantidades de nutrientes contidos na copa (folhas e galhos), na casca e na serapilheira, principais componentes dos resíduos florestais, representam uma percentagem muito significativa do estoque de nutrientes de uma plantação florestal (GONÇALVES, 1995). Gonçalves (1995) observou que em povoamentos florestais do estado de São Paulo, 51 a 82 % dos nutrientes da biomassa da parte aérea, estavam contidos nos resíduos florestais. A remoção da casca pode significar perdas de 11, 29, 23, e 30% de N, P, K e Ca, respectivamente, contidos na biomassa arbórea.

Gonçalves et al. (1997) avaliaram o estoque de biomassa e de nutrientes nos diferentes compartimentos de um povoamento de *E. grandis*, aos sete anos e observaram que os resíduos florestais, representados por folhas, galhos, casca e serapilheira, somaram 39 t ha⁻¹ ou 28% da biomassa da parte aérea. Nestes compartimentos, estão contidos cerca de 57% do N, 61% do

P, 51% do K, 76 % do Ca e 76% do Mg da biomassa aérea. Na madeira, estão contidos cerca de 43% do N, 39% do P, 49% do K e 24% do Ca. Desta forma, a quantificação dos nutrientes nos compartimentos da biomassa de um povoamento permite avaliar a magnitude dos efeitos causados pelo manejo de resíduos florestais adotado (DRUMOND et al., 1997).

2.3 Ciclagem de nutrientes em plantações florestais

O processo de ciclagem de nutrientes está intimamente relacionado com a produtividade de biomassa das florestas de rápido crescimento, bem como a manutenção do estoque de nutrientes no solo. Pritchett (1979) define para as florestas dois tipos de ciclos de nutrientes: um externo e outro interno.

O ciclo externo, também chamado de geoquímico, inclui duas formas de transferências de nutrientes. Na primeira, os nutrientes são transferidos para dentro do ecossistema florestal por meio de precipitações pluviométricas, intemperismos de minerais primários do solo, fixações biológicas (nitrogênio) e fertilizações minerais. Na segunda, os nutrientes são transferidos para fora do ecossistema por meio da erosão, queimadas, lixiviação e colheita das árvores (VITAL et al., 1999).

O ciclo interno abrange a ciclagem dos nutrientes no ecossistema florestal e pode ainda ser subdividido em duas formas: o ciclo bioquímico envolve a movimentação dos nutrientes dentro da própria árvore (dos tecidos velhos para os tecidos novos) e o ciclo biogeoquímico se refere à ciclagem dos nutrientes entre o solo e a biomassa arbórea (PRITCHETT, 1979; POGGIANI; SCHUMACHER, 2005).

A ciclagem bioquímica de nutrientes é uma importante estratégia das árvores para aumentar a eficiência na utilização de nutrientes, pois os nutrientes são retranslocados dentro da própria árvore (POGGIANI; SCHUMACHER, 2005). A quantidade de nutrientes retranslocados é maior nas folhas quando comparada às cascas. Do mesmo modo, a ciclagem bioquímica é maior para elementos como N, P, K e Mg e menor para Ca, S e micronutrientes. Miller (1981) relata que as quantidades de nutrientes retranslocados são mais importantes à medida que ocorre o fechamento das copas do povoamento, podendo praticamente qualquer tipo de tecido contribuir para esta ciclagem.

Apesar do mecanismo interno de transferência de nutrientes apresentar grande contribuição para as florestas, a ciclagem biogeoquímica detém a maior importância nos ecossistemas florestais. Koehler (1989) considera a deposição de serapilheira como o mais significativo modo de transferência de nutrientes dentro do ecossistema florestal. Para este

mesmo autor, uma das principais formas de retorno ou transferência de elementos minerais da floresta para o solo se dá por meio da serapilheira e dos resíduos resultantes da colheita. As plantações de eucalipto adequadamente fertilizadas nos estádios iniciais de crescimento, as quais produzem até aos dois anos de idade uma boa estrutura de dossel, são altamente eficientes na utilização de nutrientes por meio dos ciclos biogeoquímicos. Estes povoamentos florestais são pouco responsivos à fertilização mineral adicional após esta idade (STAPE, 2002; LACLAU et al., 2010). As folhas e galhos finos são os principais componentes da serapilheira ou dos resíduos florestais que são mantidos sobre o solo após a colheita das árvores, sendo, portanto, os que mais influenciam na fertilidade do solo.

Embora a ciclagem bioquímica e a biogeoquímica sejam importantes mecanismos de manutenção nutricional das florestas, estas não são capazes de manter a produtividade, devido à contínua perda de nutrientes do sistema pela exportação de madeira e outros componentes das árvores, como galhos, folhas e cascas, (GONÇALVES et al., 2002; BIZON, 2005; WITSCHORECK, 2008). Em povoamentos florestais, Barichello (2003) salienta que se não forem aplicadas práticas silviculturais adequadas nestes maciços, seu cultivo pode causar, dentre outros, a redução no estoque de nutrientes, o que compromete a produtividade de madeira. Nestas condições, a suplementação de nutrientes por meio de fertilizantes minerais pode ser necessária (BARROS FILHO, 2003; GONÇALVES, 2008).

Em plantações comerciais, a aplicação de fertilizantes minerais é generalizada e requer a adoção de critérios para definição da tecnologia de fertilização mineral, isto é, quais nutrientes aplicar, em que doses, em quais épocas, de que modo e em que local aplicar em relação à planta. Os maiores aumentos de produtividade em plantios de *Eucalyptus* no Brasil, em geral, são relativos à aplicação de P, seguidos de K. Há, contudo, situações em que a resposta a outros nutrientes, como Ca, S e B, é também considerável (GONÇALVES et al., 2002).

Para o adequado manejo nutricional de plantios florestais há a necessidade de se quantificar os vários fluxos de nutrientes no ecossistema e, para isso, é importante realizar um balanço nutricional para que se conheça a real necessidade de fertilização mineral. Este balanço pode ser realizado pela quantificação dos nutrientes existentes no solo e na biomassa arbórea durante a rotação de cultivo das florestas (MELO et al., 1995), principalmente nos primeiros dois anos quando se têm as maiores respostas à fertilização mineral.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em uma área localizada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI) pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Itatinga, São Paulo (23°06' S, 48°36' W) a 857 m de altitude (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área experimental

O clima da região segundo a classificação de Köppen é o Cfa, apresentando temperatura média de 20,4° C no verão e 15,6° C no inverno. A precipitação média anual é de 1319 mm sendo 75% concentrada de outubro a março (ALVARES et al., 2013). As informações sobre o clima durante o período de estudo estão detalhadas na Figura 2 e na Tabela 1.

Figura 2 - Precipitação pluviométrica média histórica e durante a rotação de cultivo e temperatura média histórica e durante a rotação de cultivo do município de Itatinga/SP. Dados meteorológicos obtidos da estação meteorológica da estação experimental de EECFI. Médias históricas de precipitação e temperatura obtidas de Alvares et al. (2013)

Tabela 1 - Valores anuais do balanço hídrico climatológico para o local do experimento, durante o período de estudo, pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955)

ANO	Temperatura Média			PP ⁽¹⁾	ETP ⁽²⁾	ETR ⁽³⁾	EXC ⁽⁴⁾	DEF ⁽⁵⁾	Meses com DEF ⁽⁶⁾
	Máxima	Média	Mínima						
	°C								
						mm			
2004	27,3	20,5	13,6	1275	995	961	264	26	1
2005	28,3	21,7	15,0	1452	1114	1072	452	32	4
2006	28,0	21,2	14,3	1289	1069	1013	181	44	3
2007	28,4	21,5	14,6	1298	1097	978	293	92	5
2008	26,6	20,4	14,2	1269	988	974	347	11	0
2009	26,3	20,7	15,0	1903	1017	1007	839	7	1
2010	27,0	20,8	14,5	1448	1021	975	475	34	3
2011	26,6	20,5	14,4	1413	1000	956	445	34	1
2012	27,0	21,1	15,1	1898	1055	1034	846	16	1
Média ⁽⁷⁾	27,3	20,9	14,5	1472	1040	997	460	33	2,1
Sd ⁽⁸⁾	0,8	0,5	0,5	254	46	38	237	25	1,7

⁽¹⁾ Precipitação anual; ⁽²⁾ Evapotranspiração potencial calculada segundo Thornthwaite (1955);

⁽³⁾ Evapotranspiração real; ⁽⁴⁾ Soma do excedente hídrico no ano; ⁽⁵⁾ Soma do déficit hídrico do ano; ⁽⁶⁾ Número de meses que apresentaram déficit hídrico no ano; ⁽⁷⁾ Médias das variáveis durante o período de estudo e ⁽⁸⁾ Desvio padrão das variáveis durante o período de estudo

A área possui relevo suave ondulado e o solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (EMBRAPA, 2013) (Tabela 2). A vegetação natural da área foi composta por cerrado *stricto sensu* e desde o início dos anos 40 vem sendo cultivada com eucalipto.

Tabela 2 – Atributos físicos e químicos do solo da área experimental

Prof.	Areia	Silte	Argila ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	CTC ₇	C ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾	Cátions Trocáveis ⁽⁴⁾			
								K	Ca	Mg	Al
cm	g kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹			
0 - 10	802	22	175	3,8	63,98	9,61	4	0,25	4,28	2,81	7,50
10 - 20	811	12	176	3,9	51,42	10,05	3	0,27	2,80	2,17	8,43
20 - 30	790	34	176	3,9	39,98	6,77	1	0,20	1,32	1,00	6,09
30 - 40	777	23	200	3,9	40,18	5,33	1	0,15	0,88	0,81	7,03
40 - 60	747	14	239	3,9	38,46	5,42	1	0,15	0,99	0,72	7,50
60 - 100	712	12	276	3,9	32,72	5,04	1	0,15	0,66	0,54	6,56
100 - 150	712	11	277	4,0	30,09	3,44	1	0,08	0,71	0,54	2,34
150 - 200	704	20	276	4,2	22,05	0,87	1	0,05	0,55	0,54	2,81

⁽¹⁾ Método da pipeta; ⁽²⁾ Determinado em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ na razão solo/solução de 1:5; ⁽³⁾ Oxidação por via úmida; ⁽⁴⁾ Extraído com resina de troca iônica (Van RAIJ et al., 2001).

Em um breve histórico de uso do solo pode-se relatar que a área na qual o experimento está inserido foi adquirida em 1940 pela Ferrovia Paulista S.A – FEPASA. Em 1942, a empresa efetuou em toda área um plantio de *E. saligna*, com espaçamento de 3 m x 3 m, sobre preparo de solo com arado de aiveca. A floresta foi então manejada por talhadia com rotações de cultivo entre sete e dez anos. Neste período a plantação recebeu seis cortes rasos e posterior condução das rebrotas. Não houve manejo do número de brotação por cepa. Existia grande número de falhas na área, consequentemente, baixa produtividade de madeira.

Em 1988, a área foi doada ao departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, que em 1992 a reformou. Para a reforma florestal procedeu-se o corte raso da floresta existente. Posteriormente, o plantio foi feito com *E. grandis* no espaçamento de 3 m x 2 m. O preparo de solo para implantação da nova espécie foi localizado na linha de plantio com uso de subsolador florestal (sistema de cultivo mínimo).

Em 2004, a plantação sofreu corte raso para a instalação do presente experimento. Um mês após o corte raso do povoamento, os tratamentos (item 3.2.) foram aplicados e efetuou-se o preparo de solo com um subsolador florestal a 40 cm de profundidade. Foram abertas covas nas linhas do plantio anterior, entre os tocos e plantou-se mudas de uma monoprogênie de *E. grandis* Hill Ex Maiden (procedência de Coff's Harbour) no espaçamento de 3 m x 2 m. O experimento foi avaliado por uma rotação de oito anos (2004 a 2012). Não existem informações precisas antes de 1940, apenas que a área era formada por pastagem.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento intitulado CIFOR II, possui o delineamento experimental em blocos aleatorizados, com nove tratamentos e três blocos, totalizando 27 parcelas (Figura 3). Cada parcela experimental foi composta por 81 árvores distribuídas, em nove linhas com nove árvores. O espaçamento foi de 3,0 m entre linhas e 2,0 m entre árvores, o que correspondeu a 486 m² por parcela e 1,31 ha de área total. Para as mensurações foi considerada uma bordadura dupla, sendo a área útil de cinco linhas por cinco árvores, totalizando 25 árvores úteis.

Figura 3 – (a) Área de estudo e (b) croqui do delineamento experimental

Os tratamentos consistiram em remoção total ou parcial dos resíduos florestais: copa (folhas e galhos), casca e serapilheira e omissão de nutrientes na fertilização mineral: N, P, K ou calagem (Tabela 3). Os tratamentos foram divididos em dois grupos. O primeiro agrupou os tratamentos para avaliar o efeito do manejo dos resíduos florestais, sendo, CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos

florestais e sem fertilização; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa. O segundo grupo consistiu em tratamentos para avaliar o efeito da omissão de nutrientes na fertilização mineral, sendo, SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: em parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. O tratamento SPACF foi incluído em ambos os grupos.

Tabela 3 - Doses dos fertilizantes minerais e manejo do resíduo florestal dos tratamentos

Tratamento	Fertilização										Resíduo Florestal			
	Calagem	Base				1ª cobertura			2ª cobertura			Copa	Casca	Serap.
	Calcário	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Micro	N	K ₂ O	B	N	K ₂ O	B			
kg ha ⁻¹														
CR _e CF*	2000	10	100	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	M	M	M
SC _e CF*	2000	10	100	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	R	M	M
SR _e CF*	2000	10	100	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	R	R	R
CR _e SF*	-	10	-	10	30	-	-	1,7	-	-	1,7	M	M	M
SPACF***	2000	10	100	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	R	R	M
SPASN**	2000	10	100	10	30	-	70	1,7	-	70	1,7	R	R	M
SPASP**	2000	10	-	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	R	R	M
SPASK**	2000	10	100	10	30	60	-	1,7	60	-	1,7	R	R	M
SPASCa**	-	10	100	10	30	60	70	1,7	60	70	1,7	R	R	M

Fontes: N: sulfato de amônio; P₂O₅: superfosfato simples; K₂O: cloreto de potássio; B: bórax; Calagem: calcário dolomítico; Micronutrientes: FTE Br 12; M: resíduos mantidos sobre o solo; R: resíduos removidos da área. *Tratamentos para avaliar o efeito dos resíduos florestais: **Tratamentos para avaliar efeito da fertilização mineral, ***Tratamento comum aos efeitos do manejo dos resíduos e de fertilização mineral

Adicionalmente foram aplicados 3,4 kg ha⁻¹ de Boro e 30 kg ha⁻¹ de FTE (9% Zn; 1,8% B; 0,8% Cu; 2% Mn; 3,5% Fe; 0,1% Mo) em cada tratamento. O tratamento SPASF recebeu uma pequena quantidade de N e K para garantir a sobrevivência das mudas. O controle de plantas daninhas ocorreu durante os dois primeiros anos após o plantio por meio de capina e aplicação de glifosato.

3.3 Avaliações

3.3.1 Atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo foram avaliados em todos os tratamentos nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 cm. As amostras de solo foram retiradas com o auxílio de um trado tipo sonda de 40 cm de altura. Foram coletadas dez amostras simples de solo por parcela, em um transecto diagonal na área útil, compreendendo linha e entre linha de plantio. A amostragem foi feita nos anos de 2006, 2008, 2010 e 2012, quando a floresta possuía dois, quatro, seis e oito anos de idade, respectivamente. Estas amostras foram homogeneizadas

dando origem a uma amostra composta por parcela, que foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas com malha de 2 mm. As determinações de pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , carbono orgânico por oxidação via úmida, fósforo, cálcio, magnésio, potássio e alumínio extraídos por resina trocadora de íons foram realizadas segundo a metodologia proposta por Van Raij et al. (2001).

3.3.2 Ciclagem biogeoquímica de nutrientes

3.3.2.1 Serapilheira depositada

A produção de serapilheira foi determinada, em cada parcela, por meio da quantificação das folhas e galhos senescentes que caíram das árvores, utilizando-se cinco coletores distribuídos diagonalmente dentro da parcela útil, sendo três coletores na linha de plantio e dois coletores na entrelinha de plantio. Os coletores foram confeccionados com armação de madeira e tela nylon tipo sombrite (50%), com superfície de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m) suspensos à altura de 0,5 m do solo.

A coleta do material foi feita mensalmente pelo período de junho de 2011 a maio de 2012 quando o povoamento tinha entre sete e oito anos de idade. As amostras de cada coletor foram separadas em folhas e galhos, pesadas individualmente e levadas para estufa com circulação forçada de ar a 65°C de temperatura até massa constante. Este material foi moído posteriormente, e analisaram-se as concentrações de macro e micronutrientes. O N total foi determinado após digestão sulfúrica, pelo método micro Kjeldahl. A determinação de P foi feita por colorimetria após a digestão nítrico perclórica, a do K por fotometria de chamas e a do Ca e do Mg por espectrofotometria de absorção atômica. Os micronutrientes Fe, Mn, Cu e Zn foram extraídos em solução contendo DTPA em pH 7,3 e a determinação destes elementos foi feita em espectrofotômetro de absorção atômica (AAS). O B foi submetido à digestão por via seca (incineração) e a determinação foi feita por calorimetria (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).

Para determinar a concentração dos nutrientes nas folhas e galhos depositados, as amostras compostas foram agrupadas em período de maior precipitação pluviométrica (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) e período de menor precipitação pluviométrica (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro).

3.3.2.2 Serapilheira acumulada

A serapilheira que se depositou sobre o solo foi amostrada anualmente, em todos os tratamentos, dos dois aos oito anos após o plantio, utilizando-se um coletor circular metálico com 2 mm de espessura, 5 cm de altura e 30 cm de diâmetro. Em cada parcela experimental foram coletadas cinco amostras simples de serapilheira acumulada na diagonal da área útil (alternando linha e entrelinha do plantio). Extraíu-se manualmente todo o solo aderido na serapilheira e as amostras foram secas em estufa para determinação de suas massas e posterior análise da concentração de nutrientes. A massa da amostra foi extrapolada para massa de serapilheira acumulada sobre o solo por hectare.

3.3.3 Crescimento das árvores

O crescimento e o incremento volumétrico das árvores foram avaliados por meio de inventários florestais anuais de 2005 até 2012 (ano de corte). Foram realizadas medições de altura (H) e diâmetro à altura do peito (DAP) na parcela útil (25 plantas centrais) em todos os blocos de todos os tratamentos. Os dados foram processados e os indivíduos foram distribuídos em classes diamétricas de frequência. Anualmente, duas árvores por tratamento que se encontravam na classe de diâmetro médio foram cortadas para a determinação da biomassa dos compartimentos acima do solo, ou seja, folhas, galhos, cascas e madeira das árvores amostradas.

A mensuração da biomassa foi realizada por compartimento da árvore: madeira, casca, galhos e folhas, sendo cada um separado e pesado para a determinação da massa verde e posterior massa seca. Foram retirados discos do tronco a cada metro para a determinação da massa verde total de madeira e casca e estas amostras, assim como as de galhos e folhas, foram secas em estufa a 65° C até massa constante. O produto da massa verde, pela razão da massa seca em relação à massa verde da amostra resultou na massa seca total. A determinação da biomassa total foi realizada pela somatória da biomassa seca de todos os compartimentos (madeira, casca, galhos e folhas).

O volume da madeira foi obtido pela cubagem rigorosa das árvores medindo-se os diâmetros a cada metro e o volume sólido foi calculado aplicando-se a fórmula de Smalian (SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

Para a estimativa da biomassa de madeira, casca, folha, galho e volume do povoamento a partir das árvores amostradas, foram utilizadas as variáveis DAP e H como

variáveis independentes para o ajuste de modelos a serem testados (SCHUMACHER; HALL, 1933).

Os dados das árvores colhidas foram agrupados anualmente (Tabela 4) segundo análises de variância e testes de agrupamentos propostos por Scolforo (1993) e Zimmermann (2004). Os parâmetros foram estimados utilizando o PROC REG do SAS 9,1 for Windows, e o modelo de Schumacher e Hall (1933) foi linearizado conforme a equação 3.1.

$$Vol = \beta_0 \cdot DAP^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} \cdot \varepsilon \rightarrow LnVol = Ln \cdot \beta_0 + \beta_1 \cdot LnDAP + \beta_2 \cdot LnH + \varepsilon \quad (3.1)$$

Tabela 4 - Equações usadas para as estimativas do volume e da biomassa dos compartimentos da parte aérea e seus respectivos coeficientes de determinação ajustados

Equações ⁽¹⁾	R ² _{aj.}
Volume de madeira com casca (Volcc) $Volcc = 5,259 \cdot 10^{-5} \cdot DAP^{1,828} \cdot H^{1,042}$	0,987** ⁽²⁾
Biomassa do lenho (L) $L = 7,229 \cdot 10^{-3} \cdot DAP^{1,923} \cdot H^{1,269}$	0,987**
Biomassa de casca (C) $C = 1,33 \cdot 10^{-2} \cdot DAP^{2,1666} \cdot H^{0,220}$	0,950**
Biomassa de folha (F) $F = 0,706 \cdot DAP^{3,517} \cdot H^{2,616}$	0,704**
Biomassa de galho (G) $G = 0,0521 \cdot DAP^{4,575} \cdot H^{3,345}$	0,782**

⁽¹⁾ Diâmetro a altura do peito (DAP) em centímetros, altura (H) em metros, volume em m³ por árvore e biomassa em kg por árvore; ⁽²⁾ Significância do modelo, sendo ** p < 0,01

3.3.4 Concentração e acúmulo de nutrientes

No segundo, quarto, sexto e oitavo anos após o plantio foram determinadas as concentrações de macro e micronutrientes em cada compartimento da parte aérea e serapilheira acumulada. O N total foi determinado após digestão sulfúrica, pelo método micro Kjeldahl. Após a digestão nítrico perclórica, foi feita a determinação do P e do S por colorimetria, do K por fotometria de chamas, e do Ca e do Mg por absorção atômica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989). O acúmulo de nutrientes foi resultado do produto da biomassa estimada por hectare de cada componente pela sua concentração de nutriente.

3.3.5 Balanço nutricional

O balanço nutricional de macro e micronutrientes foi estimado em cada tratamento. Como via de entrada de nutrientes foram consideradas a deposição atmosférica utilizando os dados observados por Laclau et al. (2010) durante a rotação de cultivo (oito anos) e a aplicação de fertilizantes minerais. Devido à baixa fixação de nitrogênio de vida livre (FISHER; BINKLEY, 2000) e baixa presença de leguminosas no sub-bosque, foi considerada nula a entrada de nitrogênio por estas vias. Da mesma forma, não foi computada a entrada via intemperismo da rocha, uma vez que o solo é um LVAd textura média, com elevado grau de intemperismo e pequena presença de minerais alteráveis.

Como saída de nutrientes foi considerada a exportação de nutrientes via colheita da madeira e resíduos florestais nos diferentes tratamentos. Foram também computados os estoques de nutrientes no solo até 0,4 m de profundidade e nos compartimentos florestais do povoamento.

Com base na metodologia foi estimado o impacto do manejo florestal sobre a sustentabilidade do sítio florestal pelo uso do conceito de números de ciclos florestais padrões necessários para zerar o estoque de cada nutriente disponível no sistema florestal por meio da equação 3.2.

$$NPR = \frac{ENS + ENF}{CNR - DAT - FERT} \quad (3.2)$$

Em que:

NPR = número potencial de rotações de cultivo;

ENS = quantidade de nutriente estocado no solo;

ENF = quantidade de nutriente estocado na biomassa florestal;

DAT = quantidade de nutriente depositado da atmosfera durante o ciclo de cultivo;

FERT = quantidade de nutriente aplicado via fertilização mineral;

CNR = quantidade de nutriente retirado pelo sistema de colheita.

3.3.6 Análise dos dados

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (Box-Cox). Posteriormente, foi feita a análise de variância por meio do teste F.

Quanto aos atributos químicos do solo, os dados foram separados por profundidade. A análise de componentes principais foi realizada para os diferentes grupos de variáveis (nutrientes disponíveis no solo, pH e matéria orgânica) baseada na matriz de correlação dessas variáveis, com o uso do programa SAS 9.1 for Windows.

Os dados biométricos e de concentração de nutrientes, também foram analisados utilizando como fonte de variação os tratamentos, as idades, a interação entre tratamento e idade e o bloco. O teste da diferença mínima significativa (LCD) foi aplicado, quando significativo, para estimativa da diferença mínima significativa e comparação das médias. O programa estatístico SAS 9.1 for Windows foi utilizado para realização das análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos químicos do solo

4.1.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais

A análise da concentração de P-resina e bases trocáveis (K, Ca e Mg) do solo, sua acidez ativa (pH) e sua acidez potencial (H+Al) de forma conjunta permitiu a melhor compreensão do efeito dos tratamentos e da época de avaliação na fertilidade do solo. Por meio da análise de componentes principais para estas variáveis na camada de 0-20 cm do solo, observou-se que o primeiro componente principal (CP 1) consiste basicamente do contraste entre as bases e o valor de pH do solo, com sua acidez potencial (H+Al) (Figura 4). Desta forma, altos valores do CP 1 indicam maior concentração de bases do solo, maior pH e menor acidez potencial, o que pode inferir em maior fertilidade do solo. O segundo componente principal (CP 2) é um contraste entre as bases e a concentração de matéria orgânica do solo, com seu pH. O CP 1 e o CP 2 juntos explicaram 68% da variância dos dados, sendo suficientes para representá-los segundo o critério de Kaiser (1958).

Nos primeiros 20 cm do solo, aos dois anos de idade, os tratamentos CReCF, SCoCF, SPACF e SReCF tiveram solos com fertilidades semelhantes, em relação às bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), enquanto que o tratamento CReSF teve solo com quantidade de bases trocáveis bem inferior aos demais (Figura 4). Nesta idade, foram encontrados maiores valores de pH e de concentrações de K^+ para os tratamentos CReCF, SCoCF e SReCF, relativamente aos demais tratamentos (Tabela 5).

Aos quatro anos de idade, houve redução na fertilidade do solo para os tratamentos CReCF, SReCF e CReSF. Os demais se mantiveram constantes, quando comparados à avaliação aos dois anos de idade. Aos quatro anos, o tratamento SCoCF teve maiores concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} em relação aos demais tratamentos.

Nas avaliações realizadas aos seis e aos oito anos de idade, foram observadas reduções sucessivas na quantidade de bases trocáveis para a maioria dos tratamentos. Em ambas as idades, seis e oito anos, o tratamento CReSF, destacou-se com maiores concentrações de H+Al, quando comparado aos demais tratamentos. Nesta idade, o tratamento SReCF teve a fertilidade do solo similar a dos tratamentos CReCF, SCoCF e SPACF. Mendham et al. (2003) em um estudo sobre o efeito dos resíduos florestais com *E. globulus* na Austrália, relataram menores concentrações de cátions trocáveis quando os resíduos florestais foram

retirados com a colheita das árvores e consideraram este sistema de colheita como um potencial futuro problema quanto à produtividade florestal.

Rocha (2014), em uma avaliação dos atributos químicos do solo sob diferentes intensidades de remoção de resíduos florestais em uma plantação de *E. grandis*, observou maiores diferenças nas concentrações de nutrientes nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade. De modo geral, as concentrações de P e K⁺ reduziram com a idade da floresta, devido à absorção pelas árvores. O pH do solo pouco alterou com o decorrer do tempo. O estudo deste autor demonstrou que a decomposição dos resíduos florestais pouco influenciou as concentrações de nutrientes no solo, pois logo após a mineralização do material orgânico os nutrientes foram rapidamente absorvidos pelas árvores. Os níveis de cátions trocáveis, especialmente o K, decrescem no solo durante os primeiros quatro anos devido à lixiviação, mas a absorção pelas árvores também contribui significativamente para a diminuição da concentração de bases no solo (MENDHAM et al. 2003).

Figura 4 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K, Ca, Mg e H+Al na camada de 0-20 cm do solo para os tratamentos CReCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CReSF (9) aos 2 (círculo preenchido), 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Considerando apenas a camada de 0-5 cm do solo, os CP 1 e CP 2 representaram 73% da variância dos dados (Figura 5). O CP 1 consiste do contraste entre as bases e o valor de pH do solo, com sua acidez potencial (H+Al). O CP2 é o contraste entre as bases e a acidez potencial do solo, com o pH do solo. Resultados semelhantes foram encontrados para a camada de 0-20 cm (Figura 4). Nesta camada, houve maior diferença entre os tratamentos, especialmente a menor fertilidade do tratamento CReSF em relação aos demais tratamentos.

Dos seis aos oito anos de idade não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto à fertilidade. Este fato está associado à intensificação da ciclagem biogeoquímica de nutrientes ao longo do crescimento da floresta (LACLAU et al., 2010), que tem influência direta sobre a fertilidade nos primeiros centímetros do solo. Poucas alterações na fertilidade do solo em longo prazo ocorrem devido à alta demanda das árvores por nutrientes, a liberação de nutrientes por meio da mineralização da serapilheira e a aplicação de fertilizantes minerais (GONÇALVES et al., 2002).

Figura 5 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e H+Al na camada de 0-5 cm do solo para os tratamentos CReCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CReSF (9) aos 2 (círculo preenchido), 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 10-20 cm, os CP 1 e CP 2 explicaram 76% da variância dos dados (Figura 6). Interpretando o CP 1 como contraste entre o pH e H+Al (acidez do solo), houve com o decorrer da idade da floresta a acidificação desta camada do solo. As concentrações de matéria orgânica nos tratamentos CReCF e CReSF foram maiores em comparação aos demais tratamentos, do segundo ao quarto ano de idade (Tabela 5).

A partir dos seis anos de idade, houveram poucas diferenças em relação a concentração de matéria orgânica entre os tratamentos. Em geral, na camada de 10 a 20 cm, houveram poucas diferenças entre os tratamentos, quanto aos atributos químicos do solo.

Figura 6 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e H+Al na camada de 10-20 cm do solo para os tratamentos CReCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CReSF (9) aos 2 (círculo preenchido), 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Considerando a concentração de micronutrientes no solo, o CP 1 consiste em um contraste da concentração de Fe no solo, com a concentração dos demais micronutrientes e o valor de pH. O CP 2 foi constituído basicamente de um contraste entre a concentração de Zn do solo e o valor de pH (Figura 7). Na camada de 0-20 cm do solo, aos quatro anos de idade, o tratamento SReCF teve maior concentração de Zn, Cu e B em relação aos demais

tratamentos (Tabela 5). Aos seis anos de idade, o tratamento SCoCF se destacou com concentrações mais elevadas de Cu, B, Mn e valor de pH, relativamente aos demais tratamentos. Nesta mesma idade, o tratamento CReSF, quando comparado aos demais tratamentos, teve a maior concentração de Fe, e a menor concentração de todos os demais micronutrientes.

Em todos os tratamentos, do sexto ao oitavo ano de idade, a concentração de Fe no solo aumentou, e houve redução da concentração dos demais micronutrientes. Com exceção do Fe, a disponibilidade dos micronutrientes metálicos, não aumentou com a redução do pH do solo. Este fato está associado ao baixo valor de pH do solo (entre 3,5 a 4,3) e sua pequena variação nesta camada de solo (Figura 7).

Figura 7 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-20 cm do solo para os tratamentos CReCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CReSF (9) aos 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 0-5 cm do solo (Figura 8) e na camada de 10-20 cm (Figura 9) o CP1 consistiu no contraste entre a concentração de Fe no solo, com a concentração dos demais micronutrientes e o valor de pH. O CP 2 foi constituído basicamente de um contraste entre a concentração de Zn do solo e o valor de pH.

Na camada de 0-5 cm o tratamento CReSF e SReCF apresentaram maiores concentrações de Zn, Cu e B aos quatro anos de idade, quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 5 e Figura 8). Com estes resultados fica evidente que a disponibilidade de Cu, Fe, Mn e Zn é afetada pelo pH, diminuindo com seu aumento (SOUZA et al., 2007).

Na camada de 10-20 cm, aos seis anos de idade, o tratamento SCoCF, teve a maior concentração de Mn, Cu e Zn (Tabela 5 e Figura 9). Contrariamente, devido a falta de fertilização, o tratamento CReSF teve as menores concentrações de bases quando comparado aos demais tratamentos.

Figura 8 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-5 cm do solo para os tratamentos CReCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CReSF (9) aos 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Figura 9 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 10-20 cm do solo para os tratamentos CRcCF (1), SCoCF (2), SPACF (3), SReCF (4) e CRcSF (9) aos 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Tabela 5 - Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com manejo de resíduos florestais
(continua)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos	
	P (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	7,7	±1,8 ⁽²⁾	9,6	±3,3	7,3	±0,8	8,2	±1,2	8,5	±6,0	9,5	±4,6	5,6	±2,0	5,9	±0,9	2,7	±0,7	10,0	±10,3	4,6	±1,8	4,7	±0,1
SCoCF	7,6	±0,7	7,2	±1,0	7,3	±1,4	7,0	±0,7	7,0	±1,6	4,5	±0,7	7,8	±1,4	5,5	±0,3	8,0	±5,2	2,9	±0,7	9,6	±1,8	4,9	±0,7
SPACF	6,7	±1,0	7,3	±1,3	6,1	±1,6	6,0	±0,9	4,6	±1,1	7,8	±0,7	5,7	±3,0	5,5	±1,1	2,7	±0,8	8,7	±7,2	4,7	±3,2	4,8	±0,5
SReCF	8,4	±3,2	5,1	±1,4	5,0	±0,4	6,2	±1,8	6,6	±4,7	3,7	±0,4	5,4	±1,5	5,9	±0,5	3,9	±1,3	2,6	±0,6	7,1	±4,8	4,5	±0,4
CRcSF	9,6	±2,3	13,6	±2,4	10,4	±5,8	7,6	±3,0	8,0	±2,6	10,7	±2,7	7,7	±1,8	4,8	±0,3	4,6	±4,1	8,6	±3,5	4,1	±2,1	3,2	±0,1
	MO (g dm ⁻³)																							
CRcCF	52	±11	50	±4	35	±4	57	±12	23	±5	28	±4	29	±5	32	±1	18	±1	24	±3	23	±2	27	±1
SCoCF	50	±16	53	±8	43	±3	59	±11	19	±1	31	±3	36	±8	31	±1	15	±2	20	±1	24	±2	28	±5
SPACF	57	±7	38	±7	35	±4	48	±12	21	±2	26	±4	32	±3	22	±7	17	±2	18	±4	20	±2	22	±6
SReCF	66	±16	53	±7	39	±4	47	±9	23	±4	27	±2	31	±1	28	±8	17	±1	22	±3	22	±3	23	±0
CRcSF	64	±18	52	±0	37	±	47	±15	30	±10	31	±9	33	±6	34	±7	19	±8	23	±6	23	±1	25	±6
	pH (CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹)																							
CRcCF	4,2	±0,5	3,7	±0,2	3,7	±0,1	3,5	±0,1	4,0	±0,1	3,9	±0,3	3,8	±0,1	3,6	±0,0	4,1	±0,1	3,8	±0,1	3,8	±0,0	3,6	±0,0
SCoCF	3,9	±0,4	3,7	±0,1	3,7	±0,1	3,4	±0,0	4,0	±0,1	3,7	±0,1	3,8	±0,0	3,6	±0,1	4,0	±0,1	3,8	±0,0	3,8	±0,0	3,7	±0,0
SPACF	3,8	±0,1	3,8	±0,1	3,9	±0,2	3,6	±0,1	4,0	±0,1	3,9	±0,1	3,9	±0,2	3,7	±0,0	4,0	±0,1	3,8	±0,0	3,9	±0,1	3,7	±0,0
SReCF	4,1	±0,3	3,7	±0,1	3,7	±0,0	3,5	±0,2	3,9	±0,2	3,7	±0,0	3,8	±0,1	3,6	±0,1	4,0	±0,1	3,8	±0,1	3,9	±0,1	3,7	±0,1
CRcSF	3,4	±0,4	3,5	±0,2	3,4	±0,1	3,2	±0,2	3,8	±0,1	3,7	±0,1	3,5	±0,1	3,4	±0,2	4,0	±0,0	3,8	±0,0	3,7	±0,1	3,6	±0,2
	K (mmol _c dm ⁻³)																							
CRcCF	1,7	±0,7	0,4	±0,2	0,4	±0,1	0,3	±0,1	1,2	±0,8	0,2	±0,1	0,3	±0,1	0,2	±0,1	1,6	±1,0	0,1	±0,0	0,2	±0,1	0,2	±0,1
SCoCF	1,5	±1,1	0,3	±0,1	0,4	±0,2	0,4	±0,1	0,8	±0,4	0,2	±0,1	0,3	±0,2	0,3	±0,2	0,7	±0,4	0,1	±0,0	0,3	±0,1	0,3	±0,0
SPACF	1,5	±1,5	0,3	±0,2	0,3	±0,1	0,5	±0,1	1,2	±0,9	0,1	±0,0	0,3	±0,1	0,3	±0,0	1,0	±0,7	0,1	±0,0	0,3	±0,1	0,2	±0,2
SReCF	1,0	±0,5	0,2	±0,1	0,4	±0,2	0,7	±0,2	0,8	±0,5	0,1	±0,1	0,3	±0,1	0,3	±0,1	0,6	±0,3	0,1	±0,0	0,1	±0,0	0,2	±0,1
CRcSF	1,8	±1,6	0,2	±0,1	0,3	±0,2	0,3	±0,1	2,0	±2,1	0,2	±0,1	0,2	±0,1	0,2	±0,1	1,4	±1,2	0,1	±0,0	0,1	±0,0	0,1	±0,1
	Ca (mmol _c dm ⁻³)																							
CRcCF	17,0	±16,8	11,8	±5,2	3,7	±1,1	4,9	±0,1	3,1	±1,7	9,2	±5,8	3,6	±2,3	2,5	±0,0	1,9	±0,3	2,7	±1,0	2,1	±0,2	2,2	±0,5
SCoCF	11,9	±2,5	16,0	±5,1	3,6	±0,7	7,1	±3,4	2,2	±0,6	9,3	±4,4	10,5	±11,3	4,0	±2,9	2,0	±0,5	6,7	±2,9	1,9	±0,8	3,0	±2,4
SPACF	7,9	±4,0	12,2	±3,4	4,1	±1,3	5,7	±2,5	2,4	±0,4	4,7	±1,3	4,2	±1,9	2,4	±0,9	2,2	±0,6	2,8	±0,6	2,5	±0,9	2,1	±1,2
SReCF	18,8	±13,5	10,2	±4,8	2,7	±0,3	4,4	±4,2	2,0	±1,1	3,5	±1,2	3,1	±1,1	1,6	±0,8	2,3	±0,6	2,8	±2,7	1,5	±0,5	0,8	±0,3
CRcSF	2,7	±0,3	3,2	±1,6	1,9	±0,6	1,1	±0,0	1,7	±0,3	1,4	±0,4	3,7	±1,5	0,6	±0,0	1,6	±0,2	1,0	±0,3	1,4	±0,5	0,6	±0,5
	Mg (mmol _c dm ⁻³)																							
CRcCF	16,3	±14,5	8,8	±1,6	3,2	±1,7	4,7	±0,0	2,2	±2,1	5,7	±1,8	3,0	±2,2	2,3	±0,1	1,3	±1,3	2,4	±0,7	1,3	±0,5	2,3	±0,4
SCoCF	8,9	±4,2	11,5	±0,6	4,0	±1,8	6,7	±2,3	1,7	±0,5	5,1	±1,6	9,8	±11,5	3,0	±1,5	0,9	±0,1	5,7	±2,6	1,3	±0,6	2,5	±1,6
SPACF	6,3	±2,0	9,2	±1,1	4,3	±2,0	6,0	±2,8	1,0	±0,4	4,9	±1,9	4,2	±2,3	3,1	±1,5	0,8	±0,1	2,3	±0,3	1,2	±0,3	2,5	±1,5
SReCF	19,5	±13,8	12,1	±4,0	2,3	±0,6	5,4	±3,4	1,6	±0,4	3,7	±0,7	2,8	±0,9	2,1	±0,3	1,1	±0,6	2,9	±2,5	0,9	±0,4	1,3	±0,1
CRcSF	1,1	±0,3	1,4	±0,4	1,1	±0,2	0,9	±0,0	0,7	±0,2	0,8	±0,2	1,5	±0,3	0,6	±0,0	0,6	±0,2	0,4	±0,1	0,8	±0,1	0,6	±0,3

Tabela 5 - Atributos químicos do solo até 40 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com manejo de resíduos florestais
(continuação)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos	
	H+Al (mmol _c dm ⁻³)																							
CR _{Re} CF	95	±53 ⁽²⁾	96	±17	97	±22	141	±41	61	±8	70	±13	77	±17	87	±1	51	±10	65	±4	65	±9	73	±19
SCoCF	104	±56	107	±0	79	±8	128	±31	63	±9	78	±6	74	±10	76	±14	54	±6	57	±0	66	±6	70	±0
SPACF	106	±23	77	±22	71	±27	108	±24	63	±8	63	±3	70	±16	78	±0	55	±10	53	±8	56	±13	66	±5
SReCF	116	±31	108	±17	87	±3	122	±34	70	±13	72	±5	80	±6	82	±6	56	±4	59	±6	61	±6	61	±13
CR _{Re} SF	176	±55	105	±76	112	±27	169	±43	75	±13	81	±24	100	±23	120	±42	54	±14	67	±11	69	±8	83	±33
	CTC ₇ (mmol _c dm ⁻³)																							
CR _{Re} CF	130,3	±42,0	116,8	±12,7	104,4	±24,8	151,2	±41,4	67,4	±4,4	84,6	±7,6	83,4	±21,3	92,0	±1,3	55,3	±9,3	70,2	±2,6	68,2	±8,4	77,5	±17,8
SCoCF	125,8	±62,1	134,3	±4,6	87,4	±10,6	142,5	±25,2	67,3	±10,1	92,3	±12,1	94,6	±28,4	83,3	±9,6	57,4	±6,7	69,0	±5,5	69,3	±6,3	75,7	±4,0
SPACF	121,3	±26,5	98,5	±21,7	79,3	±26,2	119,7	±29,4	67,8	±9,2	72,8	±3,9	78,5	±15,3	83,3	±2,4	58,9	±10,4	58,4	±8,5	59,6	±12,5	71,0	±8,2
SReCF	154,8	±49,4	130,5	±12,5	92,2	±2,7	132,5	±26,1	74,2	±11,0	78,8	±5,7	86,0	±6,4	85,8	±4,8	59,5	±2,6	65,0	±4,7	63,9	±5,9	63,3	±13,1
CR _{Re} SF	181,2	±53,4	109,4	±77,3	115,0	±27,1	171,5	±43,4	78,8	±14,7	83,6	±24,0	105,6	±23,2	121,7	±42,1	57,6	±15,5	68,2	±10,1	71,0	±8,2	84,3	±34,0
	V (%)																							
CR _{Re} CF	28,0	±25,5	18,3	±6,6	6,7	±1,4	6,8	±1,8	10,0	±6,4	18,2	±10,0	7,7	±3,3	5,4	±0,2	9,0	±4,1	7,4	±2,6	5,4	±1,4	6,4	±2,7
SCoCF	19,2	±5,5	20,6	±2,7	9,0	±1,7	10,5	±5,8	6,9	±0,8	15,5	±4,6	18,7	±16,4	9,1	±6,5	6,2	±1,6	17,9	±6,5	4,9	±1,6	7,4	±4,9
SPACF	12,8	±4,9	22,6	±5,3	11,9	±6,3	9,9	±2,0	6,7	±2,0	13,2	±4,2	11,4	±6,7	6,9	±2,6	6,9	±1,5	8,9	±1,2	6,9	±2,8	6,5	±3,3
SReCF	24,3	±10,8	17,5	±7,6	5,8	±1,0	8,6	±7,6	6,2	±3,2	9,2	±1,8	7,1	±1,5	4,7	±1,7	6,7	±2,6	8,9	±7,6	4,1	±0,5	3,7	±0,2
CR _{Re} SF	3,5	±2,3	5,5	±3,3	3,0	±0,9	1,4	±0,4	5,4	±2,2	3,0	±0,7	5,3	±1,9	1,2	±0,4	6,2	±1,1	2,3	±0,9	3,3	±0,7	1,5	±0,3
	Sat. Al ³⁺ (%)																							
CR _{Re} CF	32,6	±25,3	43,5	±12,4	71,4	±9,3	-	-	63,5	±18,3	50,0	±16,0	70,9	±13,0	-	-	64,9	±13,7	70,6	±9,0	79,3	±3,0	-	-
SCoCF	34,9	±8,3	37,0	±5,9	67,7	±6,9	-	-	70,3	±3,8	50,4	±12,6	53,2	±25,6	-	-	72,7	±6,1	50,9	±13,4	80,9	±5,9	-	-
SPACF	50,8	±11,1	38,5	±3,6	64,4	±15,4	-	-	71,3	±6,7	55,7	±11,2	63,7	±17,3	-	-	69,6	±7,3	67,5	±2,2	75,0	±8,3	-	-
SReCF	28,7	±7,2	44,5	±11,1	79,3	±2,5	-	-	73,0	±13,1	66,8	±4,8	74,4	±3,9	-	-	71,7	±10,2	70,8	±19,1	85,4	±2,2	-	-
CR _{Re} SF	77,7	±5,0	79,7	±6,3	84,8	±3,7	-	-	78,4	±6,3	87,7	±1,4	75,4	±5,0	-	-	76,6	±3,4	91,1	±2,7	86,0	±3,5	-	-
	S - SO ₄ (mg dm ⁻³)																							
CR _{Re} CF	-	-	3,2	±0,2	3,3	±0,1	-	-	-	-	3,4	±0,4	3,1	±0,3	-	-	-	-	4,3	±1,3	4,6	±1,5	-	-
SCoCF	-	-	3,4	±0,4	3,2	±0,6	-	-	-	-	4,7	±0,0	3,3	±0,5	-	-	-	-	5,9	±0,5	3,5	±1,6	-	-
SPACF	-	-	3,9	±0,5	3,0	±1,0	-	-	-	-	4,9	±1,1	4,0	±1,3	-	-	-	-	9,7	±6,8	4,8	±2,4	-	-
SReCF	-	-	4,4	±1,0	3,1	±0,6	-	-	-	-	5,2	±1,0	3,1	±0,1	-	-	-	-	7,9	±5,0	3,4	±0,6	-	-
CR _{Re} SF	-	-	5,8	±0,3	9,0	±0,6	-	-	-	-	6,2	±0,1	9,2	±1,0	-	-	-	-	6,3	±0,9	9,8	±0,4	-	-

Tabela 5 - Atributos químicos do solo até 40 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com manejo de resíduos florestais
(conclusão)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos
	B (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	-	-	0,40 ±0,05 ⁽²⁾	0,25 ±0,05	0,31 ±0,13	-	-	0,28 ±0,05	0,19 ±0,03	0,19 ±0,02	-	-	0,20 ±0,03	0,17 ±0,04	0,14 ±0,05	-	-	0,20 ±0,03	0,17 ±0,04	0,14 ±0,05	-	-	0,20 ±0,03	0,17 ±0,04
SCoCF	-	-	0,52 ±0,14	0,26 ±0,01	0,22 ±0,01	-	-	0,30 ±0,09	0,26 ±0,09	0,18 ±0,00	-	-	0,29 ±0,04	0,28 ±0,08	0,23 ±0,05	-	-	0,29 ±0,04	0,28 ±0,08	0,23 ±0,05	-	-	0,29 ±0,04	0,28 ±0,08
SPACF	-	-	0,33 ±0,03	0,31 ±0,13	0,23 ±0,03	-	-	0,27 ±0,04	0,27 ±0,04	0,11 ±0,09	-	-	0,26 ±0,02	0,27 ±0,08	0,15 ±0,02	-	-	0,26 ±0,02	0,27 ±0,08	0,15 ±0,02	-	-	0,26 ±0,02	0,27 ±0,08
SReCF	-	-	0,49 ±0,10	0,29 ±0,03	0,27 ±0,00	-	-	0,32 ±0,09	0,25 ±0,03	0,14 ±0,12	-	-	0,29 ±0,09	0,28 ±0,06	0,16 ±0,09	-	-	0,29 ±0,09	0,28 ±0,06	0,16 ±0,09	-	-	0,29 ±0,09	0,28 ±0,06
CRcSF	-	-	0,65 ±0,27	0,30 ±0,04	0,24 ±0,04	-	-	0,42 ±0,11	0,28 ±0,03	0,22 ±0,00	-	-	0,34 ±0,11	0,25 ±0,03	0,17 ±0,00	-	-	0,34 ±0,11	0,25 ±0,03	0,17 ±0,00	-	-	0,34 ±0,11	0,25 ±0,03
	Cu (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	-	-	0,36 ±0,05	0,47 ±0,06	0,37 ±0,01	-	-	0,46 ±0,05	0,52 ±0,04	0,40 ±0,00	-	-	0,50 ±0,07	0,58 ±0,04	0,47 ±0,06	-	-	0,50 ±0,07	0,58 ±0,04	0,47 ±0,06	-	-	0,50 ±0,07	0,58 ±0,04
SCoCF	-	-	0,31 ±0,05	0,49 ±0,15	0,30 ±0,02	-	-	0,53 ±0,03	0,52 ±0,03	0,39 ±0,01	-	-	0,56 ±0,01	0,67 ±0,16	0,47 ±0,04	-	-	0,56 ±0,01	0,67 ±0,16	0,47 ±0,04	-	-	0,56 ±0,01	0,67 ±0,16
SPACF	-	-	0,34 ±0,03	0,38 ±0,07	0,31 ±0,01	-	-	0,45 ±0,05	0,43 ±0,15	0,38 ±0,05	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06	0,46 ±0,00	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06	0,46 ±0,00	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06
SReCF	-	-	0,45 ±0,25	0,40 ±0,00	0,28 ±0,05	-	-	0,54 ±0,10	0,44 ±0,06	0,39 ±0,02	-	-	0,62 ±0,07	0,58 ±0,03	0,46 ±0,04	-	-	0,62 ±0,07	0,58 ±0,03	0,46 ±0,04	-	-	0,62 ±0,07	0,58 ±0,03
CRcSF	-	-	0,45 ±0,14	0,39 ±0,02	0,32 ±0,07	-	-	0,50 ±0,10	0,43 ±0,03	0,43 ±0,02	-	-	0,53 ±0,01	0,49 ±0,03	0,47 ±0,09	-	-	0,53 ±0,01	0,49 ±0,03	0,47 ±0,09	-	-	0,53 ±0,01	0,49 ±0,03
	Fe (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	-	-	50 ±3	35 ±5	79 ±4	-	-	41 ±5	30 ±5	91 ±30	-	-	35 ±6	29 ±3	47 ±17	-	-	35 ±6	29 ±3	47 ±17	-	-	35 ±6	29 ±3
SCoCF	-	-	48 ±3	39 ±3	81 ±8	-	-	52 ±2	35 ±2	67 ±6	-	-	31 ±1	30 ±3	53 ±3	-	-	31 ±1	30 ±3	53 ±3	-	-	31 ±1	30 ±3
SPACF	-	-	45 ±10	30 ±9	71 ±4	-	-	38 ±13	28 ±8	56 ±4	-	-	29 ±15	23 ±10	31 ±3	-	-	29 ±15	23 ±10	31 ±3	-	-	29 ±15	23 ±10
SReCF	-	-	52 ±1	36 ±2	73 ±1	-	-	39 ±3	33 ±3	73 ±11	-	-	29 ±4	27 ±2	40 ±11	-	-	29 ±4	27 ±2	40 ±11	-	-	29 ±4	27 ±2
CRcSF	-	-	55 ±3	55 ±10	86 ±6	-	-	43 ±7	50 ±7	77 ±22	-	-	34 ±2	34 ±1	53 ±36	-	-	34 ±2	34 ±1	53 ±36	-	-	34 ±2	34 ±1
	Mn (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	-	-	2,80 ±0,13	2,26 ±0,96	1,66 ±0,14	-	-	1,67 ±0,30	1,89 ±0,70	0,93 ±0,03	-	-	0,76 ±0,07	0,97 ±0,23	0,56 ±0,10	-	-	0,76 ±0,07	0,97 ±0,23	0,56 ±0,10	-	-	0,76 ±0,07	0,97 ±0,23
SCoCF	-	-	2,39 ±0,82	2,15 ±0,55	1,32 ±0,34	-	-	1,25 ±0,39	2,23 ±0,53	0,75 ±0,28	-	-	0,66 ±0,19	1,31 ±0,65	0,57 ±0,25	-	-	0,66 ±0,19	1,31 ±0,65	0,57 ±0,25	-	-	0,66 ±0,19	1,31 ±0,65
SPACF	-	-	1,99 ±0,73	1,72 ±0,23	1,33 ±0,10	-	-	0,84 ±0,25	1,64 ±0,12	0,60 ±0,12	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14	0,35 ±0,07	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14	0,35 ±0,07	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14
SReCF	-	-	1,81 ±0,52	1,21 ±0,40	0,68 ±0,39	-	-	0,75 ±0,21	1,04 ±0,34	0,45 ±0,17	-	-	0,40 ±0,25	0,55 ±0,03	0,27 ±0,03	-	-	0,40 ±0,25	0,55 ±0,03	0,27 ±0,03	-	-	0,40 ±0,25	0,55 ±0,03
CRcSF	-	-	1,95 ±0,61	0,92 ±0,06	0,51 ±0,03	-	-	0,93 ±0,12	0,96 ±0,03	0,44 ±0,08	-	-	0,55 ±0,09	0,38 ±0,05	0,31 ±0,08	-	-	0,55 ±0,09	0,38 ±0,05	0,31 ±0,08	-	-	0,55 ±0,09	0,38 ±0,05
	Zn (mg dm ⁻³)																							
CRcCF	-	-	0,31 ±0,02	0,31 ±0,04	0,34 ±0,07	-	-	0,21 ±0,02	0,22 ±0,03	0,30 ±0,08	-	-	0,16 ±0,03	0,17 ±0,02	0,19 ±0,04	-	-	0,16 ±0,03	0,17 ±0,02	0,19 ±0,04	-	-	0,16 ±0,03	0,17 ±0,02
SCoCF	-	-	0,27 ±0,07	0,35 ±0,06	0,35 ±0,02	-	-	0,20 ±0,02	0,30 ±0,05	0,26 ±0,05	-	-	0,13 ±0,01	0,26 ±0,07	0,22 ±0,05	-	-	0,13 ±0,01	0,26 ±0,07	0,22 ±0,05	-	-	0,13 ±0,01	0,26 ±0,07
SPACF	-	-	0,24 ±0,02	0,30 ±0,08	0,27 ±0,01	-	-	0,17 ±0,02	0,21 ±0,10	0,21 ±0,03	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03	0,16 ±0,00	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03	0,16 ±0,00	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03
SReCF	-	-	0,78 ±0,79	0,37 ±0,04	0,28 ±0,00	-	-	0,41 ±0,39	0,30 ±0,02	0,28 ±0,05	-	-	0,22 ±0,13	0,22 ±0,01	0,17 ±0,02	-	-	0,22 ±0,13	0,22 ±0,01	0,17 ±0,02	-	-	0,22 ±0,13	0,22 ±0,01
CRcSF	-	-	0,38 ±0,19	0,22 ±0,02	0,28 ±0,00	-	-	0,22 ±0,08	0,21 ±0,02	0,29 ±0,01	-	-	0,16 ±0,01	0,15 ±0,02	0,23 ±0,07	-	-	0,16 ±0,01	0,15 ±0,02	0,23 ±0,07	-	-	0,16 ±0,01	0,15 ±0,02

⁽¹⁾ CRcCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CRcSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. ⁽²⁾ Erro padrão da média. Traços indicam que não foi realizada análise de solo

4.1.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais

Segundo o critério de Kaiser (1958), foi possível representar os resultados com apenas dois componentes principais (67% da variância dos dados). Para a camada de 0-20 cm, o CP 1 consiste predominantemente do contraste entre as concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} e o valor do pH do solo, com a concentração de $\text{H}+\text{Al}$, e pode-se inferir sobre a fertilidade do solo, assim como nos tratamentos que envolve manejo de resíduos (Figura 10). O CP 2 consistiu predominantemente do contraste entre a concentração de K^+ e as concentrações das demais bases.

Aos dois anos de idade, houveram diferenças entre os tratamentos. Nesta idade, o tratamento SPASP teve a maior concentração de bases trocáveis (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) no solo, o tratamento SPASCa, teve a menor. Os tratamentos apresentaram concentrações de K^+ semelhantes, com exceção do tratamento SPASP, que apresentou concentração pouco superior (Tabela 6).

Aos quatro anos de idade, houve redução na concentração de K^+ no solo. A redução mais acentuada foi no tratamento SPASK, devido à omissão deste nutriente na fertilização (Tabela 6). Aos quatro anos de idade, as concentrações de Ca^{2+} ($28,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Mg^{2+} ($34,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) no tratamento SPASK foi mais elevada em relação aos demais tratamentos, apresentando 69% a mais de Ca^{2+} e 50% a mais de Mg^{2+} no solo, relativamente ao tratamento CReCF. No tratamento SPASK, como o K foi o nutriente mais limitante, houve significativa redução do crescimento (item 4.3.1, Figura 23) e, conseqüentemente menor demanda dos demais nutrientes, justificando as altas concentrações no solo. Os tratamentos SPACF, SPASN e SPASP tiveram concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} semelhantes aos quatro anos. O tratamento SPASCa teve valores inferiores ($3,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} e $1,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Mg^{2+}), além da alta concentração de $\text{H}+\text{Al}$.

Aos seis e aos oito anos de idade, houveram as mesmas diferenças entre os tratamentos. As baixas concentrações de Ca, Mg e de pH, e a alta concentração de $\text{H}+\text{Al}$ do tratamento SPASCa, foi associada à ausência de calagem. As espécies de eucalipto cultivadas no Brasil são tolerantes ao Al (SILVEIRA et al., 2001), contudo a disponibilidade de Ca no solo deve ser alta, pois, esse é o nutriente que mais se acumula em folhas, ramos e no caule desta essência florestal (BELLOTE, 1979). Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de calcário visando suprir de modo adequado as demandas de Ca e Mg pelas árvores (BARROS e NOVAIS, 1990).

Figura 10 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e $H+Al$ na camada de 0-20 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 2 (círculo preenchido), 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 0-5 cm, o CP 1 consistiu predominantemente do contraste entre as concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} e o valor do pH do solo, com a concentração de $H+Al$ (Figura 11). Nesta camada, em todos os tratamentos, a redução nas concentrações de K^+ no solo foi observada apenas do segundo para o quarto ano, se mantendo constante até o final da rotação de cultivo (Tabela 6).

O tratamento SPASCa teve baixas concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} , menores valores de pH, e altos valores de $H+Al$ em todas as idades avaliadas. Nos primeiros 5 cm do solo, o CP 2 foi altamente determinado pela concentração de P do solo. No tratamento SPASP, houve redução na concentração de P do solo do segundo ao sexto ano e uma moderada elevação no oitavo ano. O tratamento SPASP teve baixas concentrações de P, especialmente, aos seis anos de idade. Isto se deve pelo fato deste tratamento não ter recebido quantidades adequadas de P

na fertilização, o que refletiu em uma baixa concentração deste nutriente no solo ao longo do ciclo.

Figura 11 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K, Ca, Mg e H+Al da camada de 0-5 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 2 (círculo preenchido), 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 10-20 cm, o CP 1 foi composto predominantemente pelo contraste entre o valor do pH do solo e a concentração de H+Al (Figura 12). Houve a acidificação desta camada do solo com o decorrer da idade do povoamento, com destaque para o tratamento SPASCa, que teve maior acidez aos quatro, seis e oito anos de idade (Tabela 6). O cultivo do eucalipto tende a acidificar o solo, principalmente, devido à absorção de cátions pelas raízes das árvores. Nesta mesma camada, também foram observados maiores concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e P no tratamento SPASK.

Figura 12 – Análise de componentes principais para as concentrações de P, MO, pH, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e H+Al na camada de 10-20 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 2 (circulo preenchido), 4 (circulo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Considerando as concentrações de micronutrientes no solo na camada de 0-20 cm, o CP 1 foi composto pelo contraste entre a concentração de Fe com a concentração dos demais nutrientes e o valor de pH do solo (Figura 13). O CP 2 foi composto predominantemente pelo contraste do valor de pH, com as concentrações de Cu e Zn.

O contraste observado no CP 2 era esperado, devido à influência do pH do solo na disponibilidade dos micronutrientes. O tratamento SPASCa, que não recebeu calagem apresentou menores valores de pH em todos os anos avaliados e altas concentrações de Cu e Zn, quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 6). Em solos alcalinos ou que receberam calagem, o aumento do pH pode levar à menor disponibilidade de micronutrientes, como Fe, Mn, Cu e Zn (SOUZA et al., 2007).

Em geral, houveram grandes reduções no pH do solo e nas concentrações dos micronutrientes entre o sexto e o oitavo ano de idade, com exceção do Fe (Figura 13). Em solos bem aerados, a concentração de Fe é controlada principalmente pelo pH e pelas

condições redox do meio. Em solos bem aerados, aumentando-se o pH a níveis perto de 6,0 - 7,0, a quantidade de Fe solúvel pode diminuir sensivelmente quando em comparação com solos mais ácidos (GOODMAN, 1985).

Figura13 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-20 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 0-5 cm do solo, o comportamento dos componentes principais foi diferente do observado nas demais camadas. O CP1 foi composto pelo contraste das concentrações de Fe e Cu, com os demais nutrientes e o valor de pH. O CP 2 foi composto predominantemente pelo contraste entre as concentrações de Zn e B com a concentração de Fe (Figura 14).

Nesta camada, houve redução das concentrações de Zn, B e Mn, e aumento nas concentrações de Fe e Cu do solo (Tabela 6). O tratamento SPASCa teve concentrações mais elevadas de Zn e B aos quatro anos de idade, e altas concentrações de Fe e Cu aos seis e oito anos de idade.

Figura 14 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-5 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 4 (circulo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Na camada de 10-20 cm, o CP 1 consistiu no contraste entre a concentração de Fe com a concentração dos demais micronutrientes e o valor de pH (Figura 15). O CP 2 foi composto pelo contraste entre o valor de pH com a concentração dos demais micronutrientes, exceto o B. Este foi um comportamento esperado, pois, com o aumento do pH nesta camada, ocorre redução na disponibilidade dos micronutrientes. A concentração de micronutrientes entre o sexto e o oitavo ano de idade também foi reduzida em todos os tratamentos (Tabela 6).

Figura 15 – Análise de componentes principais para as concentrações de pH, B, Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 10-20 cm do solo para os tratamentos SPACF (3), SPASN (5), SPASP (6), SPASK (7) e SPASCa (8) aos 4 (círculo sem preenchimento), 6 (quadrado preenchido) e 8 (quadrado sem preenchimento) anos de idade

Tabela 6 - Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com fertilização mineral

(continua)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos	
	P (mg dm ⁻³)																							
SPACF	6,7	±1,1 ⁽²⁾	7,3	±1,4	6,1	±1,6	6,0	±0,9	4,6	±1,1	7,8	±0,7	5,7	±3,0	5,5	±1,1	2,7	±0,8	8,7	±7,2	4,7	±3,2	4,8	±0,5
SPASN	7,2	±0,7	6,5	±2,0	3,5	±0,8	6,4	±0,9	5,2	±1,0	7,3	±2,0	3,5	±0,5	4,8	±2,3	2,9	±0,2	5,7	±4,7	4,3	±1,4	4,4	±0,2
SPASP	5,2	±0,5	5,4	±0,7	3,8	±1,0	5,7	±1,2	4,1	±1,0	4,2	±0,4	4,0	±0,6	4,7	±0,9	14,2	±20,4	1,7	±0,5	3,2	±1,0	3,9	±0,8
SPASK	8,3	±3,3	13,5	±2,9	5,6	±1,8	6,8	±0,4	3,9	±0,6	9,3	±0,4	6,3	±2,1	6,4	±2,5	2,3	±1,0	13,0	±6,6	6,8	±5,9	3,9	±0,3
SPASCa	9,3	±4,8	12,7	±2,7	7,6	±1,8	7,4	±2,3	4,8	±2,6	11,4	±5,7	6,2	±2,3	6,3	±0,3	2,2	±0,6	9,2	±2,2	3,9	±0,3	4,4	±0,5
	MO (g dm ⁻³)																							
SPACF	57	±7	38	7	35	4	48	4	21	2	26	4	32	3	22	±7	17	±2	18	±4	20	±2	22	±6
SPASN	54	±7	47	17	38	6	42	6	21	5	25	0	29	3	21	±4	15	±2	17	±4	20	±1	17	±3
SPASP	34	±1	37	4	30	9	35	9	22	2	24	6	25	4	26	±1	17	±2	17	±4	19	±5	22	±7
SPASK	77	±7	41	6	36	5	38	5	16	3	24	3	33	3	27	±2	14	±0	16	±2	19	±2	20	±4
SPASCa	48	±10	47	16	37	9	38	9	19	1	29	12	32	3	34	±14	16	±1	20	±3	20	±1	22	±5
	pH (CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹)																							
SPACF	3,8	±0,1	3,8	±0,1	3,9	±0,2	3,6	±0,1	4,0	±0,1	3,9	±0,1	3,9	±0,2	3,7	±0,0	4,0	±0,1	3,8	±0,0	3,9	±0,1	3,7	±0,0
SPASN	3,8	±0,1	3,8	±0,0	3,7	±0,1	3,5	±0,1	4,0	±0,1	4,0	±0,1	3,9	±0,1	3,7	±0,0	4,1	±0,1	3,8	±0,0	3,9	±0,1	3,7	±0,1
SPASP	4,2	±0,0	3,8	±0,1	3,7	±0,1	3,6	±0,0	4,0	±0,2	3,8	±0,1	3,7	±0,1	3,7	±0,0	4,0	±0,2	3,9	±0,0	3,8	±0,1	3,7	±0,0
SPASK	4,0	±0,2	4,2	±0,4	3,8	±0,3	3,8	±0,3	4,0	±0,1	4,0	±0,0	3,8	±0,2	3,8	±0,1	4,0	±0,1	4,0	±0,0	3,8	±0,3	4,0	±0,0
SPASCa	3,4	±0,2	3,5	±0,1	3,4	±0,1	3,4	±0,2	3,8	±0,1	3,7	±0,1	3,5	±0,0	3,5	±0,1	3,9	±0,1	3,8	±0,0	3,7	±0,0	3,7	±0,0
	K (mmol _c dm ⁻³)																							
SPACF	1,53	±1,50	0,28	±0,25	0,34	±0,08	0,47	±0,06	1,21	±0,86	0,09	±0,00	0,25	±0,15	0,26	±0,00	1,01	±0,7	0,09	±0,0	0,28	±0,1	0,21	±0,2
SPASN	1,13	±0,32	0,33	±0,20	0,39	±0,10	0,60	±0,12	1,09	±0,41	0,14	±0,07	0,22	±0,05	0,30	±0,06	1,08	±0,5	0,09	±0,0	0,08	±0,0	0,13	±0,1
SPASP	2,06	±0,15	0,28	±0,09	0,20	±0,13	0,38	±0,06	2,01	±0,52	0,12	±0,05	0,11	±0,05	0,17	±0,12	1,63	±0,3	0,12	±0,0	0,08	±0,0	0,13	±0,1
SPASK	2,38	±1,62	0,43	±0,19	0,11	±0,05	0,17	±0,12	1,48	±1,11	0,16	±0,00	0,14	±0,10	0,21	±0,18	1,25	±0,9	0,08	±0,0	0,08	±0,0	0,09	±0,0
SPASCa	2,07	±1,49	0,30	±0,17	0,34	±0,27	0,43	±0,24	1,44	±0,56	0,16	±0,08	0,30	±0,15	0,38	±0,06	1,51	±0,6	0,14	±0,1	0,19	±0,1	0,21	±0,1
	Ca (mmol _c dm ⁻³)																							
SPACF	7,9	±4,0	12,2	±3,4	4,1	±1,3	5,7	±2,5	2,4	±0,4	4,7	±1,3	4,2	±1,9	2,4	±0,9	2,2	±0,6	2,8	±0,6	2,5	±0,9	2,1	±1,2
SPASN	7,7	±2,9	22,8	±28,3	9,2	±10,7	4,6	±0,4	2,1	±0,5	5,2	±4,0	4,2	±3,0	1,1	±0,0	2,2	±0,3	3,7	±3,0	1,8	±0,6	0,9	±0,3
SPASP	11,2	±6,3	13,4	±2,0	5,2	±4,9	2,2	±0,1	2,2	±0,5	3,6	±0,9	2,8	±0,1	2,4	±1,5	2,5	±0,7	1,9	±1,1	2,4	±1,6	1,1	±0,2
SPASK	18,3	±3,7	19,2	±15,1	13,4	±7,4	3,6	±2,7	2,6	±0,9	5,4	±4,4	10,7	±4,9	2,3	±0,5	1,5	±0,2	3,8	±3,2	8,9	±8,8	1,0	±0,1
SPASCa	2,0	±0,5	1,5	±0,7	1,6	±0,7	0,7	±0,1	1,6	±0,0	1,0	±0,2	1,0	±0,1	0,8	±0,3	1,8	±0,2	0,6	±0,1	1,4	±1,1	1,3	±0,1
	Mg (mmol _c dm ⁻³)																							
SPACF	6,3	±2,0	9,2	±1,1	4,3	±2,0	6,0	±2,8	1,0	±0,4	4,9	±1,9	4,2	±2,3	3,1	±1,5	0,8	±0,1	2,3	±0,3	1,2	±0,3	2,5	±1,5
SPASN	6,7	±2,2	23,5	±29,8	9,0	±9,8	6,3	±1,0	1,5	±0,4	5,7	±4,8	4,4	±3,9	1,8	±0,5	0,8	±0,4	3,9	±3,9	1,4	±0,6	1,5	±0,3
SPASP	11,3	±4,2	10,6	±3,4	5,0	±4,2	2,5	±0,2	1,5	±0,5	3,8	±1,5	1,9	±0,4	2,7	±1,5	0,9	±0,7	1,7	±0,8	2,1	±1,9	1,2	±0,5
SPASK	16,4	±8,9	22,8	±22,1	14,4	±8,0	4,4	±2,6	1,5	±1,1	7,1	±5,3	11,1	±6,2	3,6	±0,5	0,8	±0,1	4,3	±4,0	10,8	±10,4	1,8	±0,0
SPASCa	0,7	±0,1	0,8	±0,3	0,6	±0,3	0,8	±0,1	0,8	±0,1	0,6	±0,1	0,4	±0,2	0,6	±0,2	0,7	±0,1	0,4	±0,0	0,4	±0,1	0,6	±0,0

Tabela 6 - Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com fertilização mineral

(continuação)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos		2		4		6		8 anos	
	H+Al (mmol _c dm ⁻³)																							
SPACF	106	±23 ⁽²⁾	77	±22	71	±27	108	±24	63	±8	63	±3	70	±16	78	±0	55	±10	53	±8	56	±13	66	±5
SPASN	110	±19	82	±9	79	±18	99	±11	62	±5	50	±17	65	±7	61	±13	47	±6	55	±7	54	±9	49	±7
SPASP	63	±7	63	±9	64	±16	84	±3	59	±3	69	±19	60	±10	77	±16	47	±6	50	±5	56	±9	64	±14
SPASK	118	±4	69	±9	69	±23	94	±11	54	±4	53	±2	67	±13	76	±3	48	±4	45	±1	52	±9	63	±17
SPASCa	140	±38	87	±48	102	±29	153	±81	64	±7	77	±17	92	±24	108	±48	57	±9	62	±8	65	±2	76	±3
	CTC ₇ (mmol _c dm ⁻³)																							
SPACF	121,3	±26,5	98,5	±21,7	79,3	±26,2	119,7	±29,4	67,8	±9,2	72,8	±3,9	78,5	±15,3	83,3	±2,4	58,9	±10,4	58,4	±8,5	59,6	±12,5	71,0	±8,2
SPASN	125,5	±15,8	128,1	±67,4	97,6	±9,5	109,9	±9,7	66,6	±4,1	61,3	±26,1	74,1	±5,5	63,7	±13,9	50,9	±5,7	62,5	±13,7	56,9	±8,2	51,0	±7,2
SPASP	87,6	±3,6	87,5	±6,1	74,4	±14,3	89,1	±3,0	64,4	±2,6	76,3	±19,3	65,0	±10,4	82,3	±12,7	51,5	±5,6	54,0	±4,9	60,6	±12,1	65,9	±14,9
SPASK	155,1	±15,2	111,3	±41,5	96,5	±17,8	101,7	±5,2	59,3	±2,9	65,8	±11,3	89,0	±3,6	81,7	±3,6	51,5	±5,2	53,0	±6,1	72,1	±13,4	65,9	±16,9
SPASCa	144,5	±37,6	89,1	±47,5	104,0	±29,9	154,9	±81,7	68,0	±7,5	78,3	±16,8	93,8	±23,8	109,5	±49,0	60,9	±9,2	62,7	±7,6	66,8	±3,0	77,6	±3,1
	V (%)																							
SPACF	12,8	±4,9	22,6	±5,3	11,9	±6,3	9,9	±2,0	6,7	±2,0	13,2	±4,2	11,4	±6,7	6,9	±2,6	6,9	±1,5	8,9	±1,2	6,9	±2,8	6,5	±3,3
SPASN	12,7	±5,0	28,3	±30,5	18,5	±19,9	10,5	±2,4	7,3	±2,3	16,5	±7,3	11,9	±8,9	5,1	±0,4	8,1	±2,0	11,4	±8,6	5,9	±2,6	5,0	±0,5
SPASP	27,9	±11,0	28,0	±5,9	13,9	±12,3	5,8	±0,0	8,8	±1,2	10,0	±3,7	7,5	±1,2	6,8	±4,6	9,8	±1,6	6,9	±3,7	7,1	±4,1	3,6	±0,3
SPASK	23,7	±4,7	34,1	±17,9	29,5	±15,5	8,2	±5,8	9,4	±2,1	18,0	±10,6	24,9	±12,7	7,5	±0,6	6,8	±1,2	14,6	±11,1	25,3	±20,5	4,5	±1,3
SPASCa	3,5	±1,4	3,9	±3,5	2,4	±0,8	1,4	±0,4	5,6	±0,6	2,4	±0,4	1,9	±0,4	1,7	±0,3	6,7	±0,4	1,9	±0,4	2,9	±1,8	2,7	±0,2
	Sat. Al ³⁺ (%)																							
SPACF	51	±11,1	38	±3,6	64	±15,4	-	-	71	±7	56	±11	64	±17	-	-	70	±7	67	±2	75	±8	-	-
SPASN	48	±12,1	44	±41,9	57	±28,5	-	-	70	±7	58	±22	64	±20	-	-	67	±6	65	±24	78	±9	-	-
SPASP	26	±12,0	37	±6,2	62	±22,4	-	-	65	±3	64	±9	73	±4	-	-	60	±6	77	±11	75	±11	-	-
SPASK	25	±0,3	32	±16,5	31	±15,2	-	-	64	±6	54	±16	35	±19	-	-	71	±4	61	±20	42	±30	-	-
SPASCa	80	±4,4	88	±4,2	89	±4,6	-	-	78	±2	91	±1	91	±2	-	-	73	±1	93	±1	89	±7	-	-
	S - SO ₄ (mg dm ⁻³)																							
SPACF	-	-	3,9	0,5	3,0	1,0	-	-	-	-	4,9	±1,1	4,0	±1,3	-	-	-	-	9,7	6,8	4,8	±2,4	-	-
SPASN	-	-	2,5	0,3	3,0	0,3	-	-	-	-	5,1	±3,3	3,7	±1,0	-	-	-	-	3,2	0,1	3,3	±0,2	-	-
SPASP	-	-	4,0	1,0	4,0	0,5	-	-	-	-	4,0	±0,8	5,0	±1,0	-	-	-	-	7,5	2,2	7,0	±2,7	-	-
SPASK	-	-	7,3	3,0	3,9	0,5	-	-	-	-	6,4	±0,8	3,8	±0,2	-	-	-	-	9,7	0,7	4,0	±0,5	-	-
SPASCa	-	-	7,0	0,7	5,2	3,0	-	-	-	-	7,8	±1,3	8,3	±0,5	-	-	-	-	8,5	0,7	9,0	±0,9	-	-

Tabela 6 - Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade em diferentes idades e tratamentos com fertilização mineral

(conclusão)

Tratamento ⁽¹⁾	0-5 cm								5-10 cm								10-20 cm							
	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos	2	4	6	8 anos
B (mg dm ⁻³)																								
SPACF	-	-	0,33 ±0,03 ⁽²⁾	0,31 ±0,13	0,23 ±0,03	-	-	0,27 ±0,04	0,27 ±0,04	0,11 ±0,09	-	-	0,26 ±0,02	0,20 ±0,04	-	-	0,26 ±0,02	0,20 ±0,03	0,15 ±0,02	-	-	0,26 ±0,02	0,20 ±0,03	0,15 ±0,02
SPASN	-	-	0,42 ±0,11	0,26 ±0,06	0,25 ±0,03	-	-	0,24 ±0,07	0,29 ±0,08	0,20 ±0,04	-	-	0,24 ±0,07	0,29 ±0,08	-	-	0,24 ±0,07	0,20 ±0,04	0,22 ±0,03	-	-	0,24 ±0,07	0,20 ±0,04	0,22 ±0,03
SPASP	-	-	0,33 ±0,12	0,30 ±0,03	0,27 ±0,08	-	-	0,26 ±0,08	0,26 ±0,02	0,26 ±0,04	-	-	0,26 ±0,08	0,26 ±0,02	-	-	0,20 ±0,06	0,22 ±0,05	0,18 ±0,08	-	-	0,20 ±0,06	0,22 ±0,05	0,18 ±0,08
SPASK	-	-	0,38 ±0,03	0,34 ±0,10	0,19 ±0,01	-	-	0,26 ±0,06	0,27 ±0,01	0,15 ±0,03	-	-	0,26 ±0,06	0,27 ±0,01	-	-	0,31 ±0,06	0,23 ±0,01	0,16 ±0,09	-	-	0,31 ±0,06	0,23 ±0,01	0,16 ±0,09
SPASCa	-	-	0,55 ±0,12	0,32 ±0,06	0,32 ±0,11	-	-	0,34 ±0,11	0,28 ±0,04	0,22 ±0,08	-	-	0,34 ±0,11	0,28 ±0,04	-	-	0,27 ±0,04	0,22 ±0,08	0,26 ±0,05	-	-	0,27 ±0,04	0,22 ±0,08	0,26 ±0,05
Cu (mg dm ⁻³)																								
SPACF	-	-	0,34 ±0,03	0,38 ±0,07	0,31 ±0,01	-	-	0,45 ±0,05	0,43 ±0,15	0,38 ±0,05	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06	0,46 ±0,00	-	-	0,53 ±0,02	0,57 ±0,06	0,46 ±0,00
SPASN	-	-	0,33 ±0,10	0,32 ±0,11	0,32 ±0,08	-	-	0,48 ±0,05	0,43 ±0,06	0,37 ±0,04	-	-	0,57 ±0,00	0,57 ±0,06	-	-	0,57 ±0,00	0,57 ±0,06	0,45 ±0,02	-	-	0,57 ±0,00	0,57 ±0,06	0,45 ±0,02
SPASP	-	-	0,37 ±0,04	0,42 ±0,11	0,32 ±0,08	-	-	0,49 ±0,04	0,54 ±0,07	0,39 ±0,08	-	-	0,59 ±0,04	0,67 ±0,06	-	-	0,59 ±0,04	0,67 ±0,06	0,43 ±0,06	-	-	0,59 ±0,04	0,67 ±0,06	0,43 ±0,06
SPASK	-	-	0,38 ±0,05	0,33 ±0,12	0,32 ±0,01	-	-	0,45 ±0,05	0,43 ±0,06	0,34 ±0,03	-	-	0,49 ±0,05	0,61 ±0,11	-	-	0,49 ±0,05	0,61 ±0,11	0,41 ±0,04	-	-	0,49 ±0,05	0,61 ±0,11	0,41 ±0,04
SPASCa	-	-	0,39 ±0,08	0,44 ±0,07	0,61 ±0,30	-	-	0,46 ±0,02	0,52 ±0,09	0,47 ±0,06	-	-	0,52 ±0,02	0,69 ±0,18	-	-	0,52 ±0,02	0,69 ±0,18	0,46 ±0,05	-	-	0,52 ±0,02	0,69 ±0,18	0,46 ±0,05
Fe (mg dm ⁻³)																								
SPACF	-	-	45 ±10	30 ±9	71 ±4	-	-	38 ±13	28 ±8	85 ±4	-	-	28,7 ±15	23,4 ±10	-	-	28,7 ±15	23,4 ±10	30,6 ±3	-	-	28,7 ±15	23,4 ±10	30,6 ±3
SPASN	-	-	46 ±0	30 ±8	80 ±11	-	-	37 ±13	28 ±6	85 ±11	-	-	30,0 ±0	22,7 ±6	-	-	30,0 ±0	22,7 ±6	24,3 ±3	-	-	30,0 ±0	22,7 ±6	24,3 ±3
SPASP	-	-	47 ±4	33 ±4	85 ±37	-	-	37 ±4	30 ±1	85 ±47	-	-	26,7 ±1	25,0 ±1	-	-	26,7 ±1	25,0 ±1	40,6 ±25	-	-	26,7 ±1	25,0 ±1	40,6 ±25
SPASK	-	-	42 ±5	31 ±6	67 ±12	-	-	28 ±6	35 ±12	85 ±13	-	-	22,6 ±5	20,2 ±7	-	-	22,6 ±5	20,2 ±7	28,1 ±11	-	-	22,6 ±5	20,2 ±7	28,1 ±11
SPASCa	-	-	56 ±3	53 ±8	100 ±5	-	-	44 ±10	54 ±3	85 ±6	-	-	29,7 ±1	42,2 ±10	-	-	29,7 ±1	42,2 ±10	47,5 ±1	-	-	29,7 ±1	42,2 ±10	47,5 ±1
Mn (mg dm ⁻³)																								
SPACF	-	-	1,99 ±0,73	1,72 ±0,23	1,33 ±0,10	-	-	0,84 ±0,25	1,64 ±0,12	0,60 ±0,12	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14	0,35 ±0,07	-	-	0,49 ±0,15	0,76 ±0,14	0,35 ±0,07
SPASN	-	-	3,12 ±1,21	2,20 ±0,88	1,27 ±0,55	-	-	1,10 ±0,53	1,89 ±0,64	0,49 ±0,11	-	-	0,55 ±0,10	0,88 ±0,17	-	-	0,55 ±0,10	0,88 ±0,17	0,32 ±0,13	-	-	0,55 ±0,10	0,88 ±0,17	0,32 ±0,13
SPASP	-	-	2,59 ±0,92	1,75 ±0,47	1,18 ±0,32	-	-	0,93 ±0,10	1,65 ±0,37	0,68 ±0,12	-	-	0,48 ±0,14	0,87 ±0,09	-	-	0,48 ±0,14	0,87 ±0,09	0,36 ±0,16	-	-	0,48 ±0,14	0,87 ±0,09	0,36 ±0,16
SPASK	-	-	4,51 ±1,70	4,36 ±0,10	1,93 ±0,57	-	-	1,58 ±0,34	4,04 ±0,48	0,78 ±0,06	-	-	0,89 ±0,29	1,52 ±0,23	-	-	0,89 ±0,29	1,52 ±0,23	0,48 ±0,06	-	-	0,89 ±0,29	1,52 ±0,23	0,48 ±0,06
SPASCa	-	-	1,05 ±0,44	0,70 ±0,19	0,63 ±0,20	-	-	0,60 ±0,26	0,73 ±0,26	0,43 ±0,07	-	-	0,40 ±0,03	0,53 ±0,28	-	-	0,40 ±0,03	0,53 ±0,28	0,23 ±0,01	-	-	0,40 ±0,03	0,53 ±0,28	0,23 ±0,01
Zn (mg dm ⁻³)																								
SPACF	-	-	0,24 ±0,02	0,30 ±0,08	0,27 ±0,01	-	-	0,17 ±0,02	0,21 ±0,10	0,21 ±0,03	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03	0,16 ±0,00	-	-	0,14 ±0,02	0,16 ±0,03	0,16 ±0,00
SPASN	-	-	0,25 ±0,01	0,31 ±0,12	0,26 ±0,01	-	-	0,19 ±0,03	0,27 ±0,09	0,21 ±0,02	-	-	0,14 ±0,00	0,21 ±0,03	-	-	0,14 ±0,00	0,21 ±0,03	0,16 ±0,00	-	-	0,14 ±0,00	0,21 ±0,03	0,16 ±0,00
SPASP	-	-	0,24 ±0,02	0,32 ±0,03	0,23 ±0,03	-	-	0,18 ±0,02	0,29 ±0,04	0,20 ±0,06	-	-	0,12 ±0,02	0,24 ±0,01	-	-	0,12 ±0,02	0,24 ±0,01	0,15 ±0,04	-	-	0,12 ±0,02	0,24 ±0,01	0,15 ±0,04
SPASK	-	-	0,23 ±0,04	0,28 ±0,06	0,26 ±0,03	-	-	0,16 ±0,04	0,22 ±0,06	0,20 ±0,01	-	-	0,11 ±0,05	0,23 ±0,07	-	-	0,11 ±0,05	0,23 ±0,07	0,17 ±0,03	-	-	0,11 ±0,05	0,23 ±0,07	0,17 ±0,03
SPASCa	-	-	0,34 ±0,14	0,25 ±0,05	0,25 ±0,09	-	-	0,19 ±0,06	0,21 ±0,03	0,25 ±0,04	-	-	0,15 ±0,04	0,20 ±0,08	-	-	0,15 ±0,04	0,20 ±0,08	0,19 ±0,01	-	-	0,15 ±0,04	0,20 ±0,08	0,19 ±0,01

⁽¹⁾ SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem; SPASF: sem parte aérea e sem fertilização. ⁽²⁾ Erro padrão da média. Traços indicam que não foi realizada análise de solo

4.2 Ciclagem biogeoquímica de nutrientes

4.2.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais

4.2.1.1 Serapilheira depositada

A deposição de serapilheira de folhas e galhos teve variação sazonal (entre junho de 2011 e maio de 2012), e as maiores deposições ocorreram nos períodos de maior precipitação pluvial e temperatura média do ar (outubro a março) e de maior crescimento das árvores (Figura 16). Neste período, a deposição média de todos os tratamentos foi de $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ seis meses⁻¹ de serapilheira, sendo 48% de folhas e 52% de galhos. No período de menor precipitação pluvial e temperatura média do ar (abril a setembro), a deposição média foi de $2,8 \text{ t ha}^{-1}$ seis meses⁻¹ de serapilheira, sendo 36% de folhas e 64% de galhos.

Quando somadas as deposições dos períodos de maior e de menor precipitação, a deposição média foi de $6,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de serapilheira, sendo 43% de folhas e 57% de galhos. A deposição de folheto variou, em média, entre 100 kg ha^{-1} em novembro e 700 kg ha^{-1} em janeiro. A deposição de galhada teve variação média entre 160 kg ha^{-1} em outubro e 600 kg ha^{-1} em janeiro. Estes valores foram semelhantes aos encontrados em estudos realizados por Cunha et al. (2005), Gama-Rodrigues (2005) e Costa et al. (2005), em que a maior deposição de serapilheira em plantação de *E. grandis* também ocorreu no período de maior crescimento vegetativo.

Cunha et al. (2005), em estudo com *E. grandis* aos oito anos de idade, e Schumacher et al. (1994), em estudo com *E. camaldulensis* e *E. torrelliana*, aos sete e dez anos de idade, respectivamente, também encontraram queda estacional de serapilheira durante o ano. Estes autores, apesar de encontrarem alterações na deposição em diferentes estações, não encontraram tendência sazonal nítida, nem correlações significativas com as variáveis climáticas. Estas variações na deposição de serapilheira são decorrentes de aspectos fenológicos das plantas ou motivadas por fatores de ordem climática ou biológica (SOUZA; DAVIDE, 2001), como senescência das folhas, deficiência mineral e seca (LARCHER, 2000). Assim, em um mesmo ecossistema florestal, podem ocorrer de ano para ano, variações no total de material depositado e/ou na intensidade de participação dos compartimentos da parte aérea. Os picos de deposição de serapilheira também podem estar relacionados a fatores climáticos extremos, como ventos fortes e períodos de alta umidade que acelerariam o processo de perda de folhagem senescente pelas árvores (SCHUMACHER et al., 2008).

As quantidades de serapilheira depositadas variaram entre 8,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento CReCF, e 7,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento CReSF e estão na faixa de valores encontrados por outros autores para diferentes espécies do gênero *Eucalyptus* (SOUZA; DAVIDE, 2001; BALIEIRO et al., 2004; ZAIA; GAMA-RODRIGUES, 2004).

O conteúdo de nutrientes na serapilheira depositada teve variações entre os tratamentos, sendo diretamente dependente da massa depositada (Tabela 7). O folheto apresentou maior contribuição na deposição dos nutrientes, devido ao seu maior conteúdo. Em média, a deposição anual de N foi de 45,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o tratamento CReCF, o qual não diferiu-se dos demais tratamentos SCoCF, SPACF, SReCF e CReSF que depositaram 44,0; 44,8; 45,5; 41,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente. Houve pouca variação no conteúdo de N entre tratamentos quando comparados entre os períodos de maior e de menor precipitação, tanto nas deposições de folheto como nas de galhada. Em plantações de eucalipto, o retorno de N ao solo, via serapilheira, pode variar entre 18 e 140 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (REIS; BARROS, 1990; ATTIWILL; ADAMS, 1993).

A deposição anual de P no tratamento CReCF foi de 2,8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ diferindo dos tratamentos SReCF (2,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e CReSF (2,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹) (Tabela 7). Reis e Barros (1990) encontraram variação na deposição de P, por meio da produção de folheto e galhada, entre 0,9 e 8 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (REIS; BARROS, 1990). A deposição anual de K foi de 4,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento CReCF não diferindo dos tratamentos SCoCF, SPACF, SReCF e CReSF que depositaram 5,2; 4,2; 4,4 e 4,0 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Em todos os tratamentos, tanto no folheto quanto na galhada, ocorreu pequena variação nos conteúdos de P, K, Mg e S, conforme o período de avaliação. Deste modo, a diferença de aporte de nutrientes entre os períodos de maior ou menor precipitação pluvial foi decorrente, em grande parte, da variação de massa dos diversos componentes da serapilheira que caiu ao longo do ano. O folheto foi o componente que mais contribuiu para a deposição de nutrientes no solo, de maneira que a manutenção da fertilidade do solo em plantios de eucalipto, principalmente nas rotações de cultivo subsequentes, é diretamente dependente da quantidade e qualidade do folheto e, por conseguinte, da sua taxa de decomposição (SCHUMACHER et al., 2008).

Figura 16 – Produção de folheda nos tratamentos com manejo de resíduos florestais (a), Produção de galhada nos tratamentos com manejo de resíduos (b), Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar, da área de estudo no período correspondente a doze meses de coleta (junho de 2011 a maio de 2012) (c). As linhas acima das barras indicam o erro padrão da média

Tabela 7 – Deposição anual de nutrientes no solo por meio de folheda e de galhada nos tratamentos com manejo de resíduos florestais

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹																		
Período de maior precipitação pluviométrica ⁽²⁾						Período de menor precipitação pluviométrica ⁽³⁾							Total no ano ⁽⁴⁾					
Folheda																		
CReCF	17,3	1,2 a	2,0	10,7	3,4 b	0,9 b	10,3	0,5	1,8	6,1	1,9	0,8	27,6	1,7 a	3,8	16,8	5,3	1,7 b
SCoCF	16,9	1,0 ab	2,1	11,8	3,7 ab	0,8 b	10,9	0,5	1,9	6,4	2,0	0,8	27,8	1,5 ab	4,0	18,2	5,6	1,7 b
SPACF	17,5	1,3 a	1,7	12,6	4,0 a	0,9 b	10,1	0,4	1,4	5,8	1,9	0,7	27,6	1,7 a	3,2	18,4	5,9	1,7 b
SReCF	17,8	1,2 a	1,9	12,7	4,0 a	0,9 b	10,5	0,5	1,5	6,3	2,0	0,8	28,3	1,6 a	3,4	19,0	6,0	1,7 b
CReSF	16,9	0,7 b	1,6	11,0	3,0 b	1,4 a	11,2	0,6	1,5	6,4	1,9	0,9	28,1	1,3 b	3,1	17,3	5,0	2,2 a
Sig. teste F	0,68	0,01	0,13	0,30	0,04	<0,01	0,93	0,08	0,10	0,73	0,63	0,86	0,95	0,05	0,12	0,60	0,18	<0,01
Galhada																		
CReCF	9,4	0,5 a	0,5 a	5,7	2,3 a	1,1 a	9,0	0,5 a	0,6 b	5,7 a	2,1 ab	0,8	18,3 a	1,1 a	1,1 a	11,3 a	4,4 a	1,8 a
SCoCF	8,8	0,5 a	0,5 a	5,7	2,1 a	0,9 ab	7,4	0,4 ab	0,6 b	5,8 a	2,2 a	0,8	16,2 ab	0,9 ab	1,1 a	11,6 a	4,3 a	1,6 ab
SPACF	7,6	0,4 b	0,4 b	5,0	2,1 a	0,8 b	9,6	0,5 a	0,7 a	5,9 a	2,4 a	0,8	17,2 ab	0,9 ab	1,0 a	10,9 a	4,5 a	1,6 ab
SReCF	8,1	0,2 c	0,4 b	5,1	2,2 a	0,7 b	9,1	0,4 ab	0,6 b	4,5 ab	1,8 b	0,6	17,2 ab	0,7 b	1,0 a	9,6 ab	4,0 a	1,4 b
CReSF	7,7	0,4 b	0,3 c	4,4	1,1 b	0,7 b	6,0	0,3 b	0,6 b	3,5 b	0,9 c	0,5	13,8 b	0,7 b	0,9 b	7,9 b	2,0 b	1,2 c
Sig. teste F	0,63	<0,01	<0,01	0,19	<0,01	<0,01	0,06	0,03	0,03	0,03	<0,01	0,05	0,04	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
Folheda + Galhada																		
CReCF	26,7	1,8 a	2,5 ab	16,4	5,7 a	2,0 a	19,3	1,0	2,5	11,7	4,0 a	1,6	45,9	2,8 a	4,9 ab	28,1	9,7	3,6
SCoCF	25,8	1,5 a	2,7 a	17,5	5,8 a	1,7 b	18,2	0,8	2,5	12,3	4,1 a	1,6	44,0	2,4 ab	5,2 a	29,8	9,9	3,3
SPACF	25,1	1,6 a	2,1 b	17,6	6,2 a	1,7 b	19,7	0,9	2,1	11,7	4,2 a	1,5	44,8	2,6 a	4,2 b	29,4	10,4	3,2
SReCF	25,9	1,4 ab	2,3 b	17,9	6,2 a	1,6 b	19,6	0,9	2,1	10,7	3,8 a	1,4	45,5	2,3 b	4,4 ab	28,6	9,9	3,1
CReSF	24,7	1,1 b	2,0 b	15,3	4,1 b	2,1 a	17,2	0,9	2,1	9,9	2,8 b	1,3	41,9	2,0 b	4,0 b	25,2	7,0	3,4
Sig. teste F	0,30	0,001	0,03	0,19	<0,01	<0,01	0,23	0,09	0,12	0,08	<0,01	0,28	0,99	0,04	<0,01	0,87	0,10	0,82

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade; ⁽²⁾Meses: outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março; ⁽³⁾Meses: abril, maio, junho, julho, agosto, setembro; ⁽⁴⁾ Soma de todos os meses do ano (junho de 2011 a maio de 2012)

4.2.1.2 Serapilheira acumulada

O tratamento em que se mantiveram os resíduos sobre o solo e não recebeu fertilização mineral, CReSF, apresentou o menor acúmulo de serapilheira sobre o solo no período de oito anos de cultivo (Figura 17). Isto pode ser explicado pela menor quantidade de serapilheira depositada neste tratamento (Figura 16). Em geral, o acúmulo de serapilheira é função da biomassa do povoamento. Houve estabilização do conteúdo de serapilheira acumulada em cada tratamento até os quatro anos de idade. A deposição de serapilheira se intensificou em todos os tratamentos, principalmente, a partir dos quatro anos de idade, após a fase de fechamento de copas e maior competição intraespecífica.

Figura 17 – Serapilheira acumulada sobre o solo nos tratamentos com manejo de resíduos florestais em função da idade. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LSD

O acúmulo de serapilheira no tratamento CReCF elevou-se de 17 t ha⁻¹ no quarto ano para aproximadamente 26 t ha⁻¹ no sétimo ano (Figura 17). Em povoamentos de eucalipto, devido à recalcitrância dos resíduos produzidos, são relatadas baixas taxas de decomposição, que promove o acúmulo de serapilheira ao longo do ciclo de cultivo (GAMA-RODRIGUES; BARROS, 2002). No entanto, no oitavo ano após o plantio, o acúmulo de serapilheira reduziu em média 5,5; 4,5; 5,2 e 6,5 t ha⁻¹ nos tratamentos CReCF, SCoCF, SPACF e CReSF, respectivamente, quando comparados ao ano anterior. A decomposição das frações mais

lábéis e a intensificação da ciclagem biogeoquímica de nutrientes podem ter contribuído para a expressiva redução no acúmulo de serapilheira no oitavo ano, além da menor produção de serapilheira nesta idade.

O tratamento SReCF não seguiu o mesmo comportamento dos demais e teve pequena elevação de $0,24 \text{ t ha}^{-1}$ no acúmulo de serapilheira (Figura 17). Este tratamento atingiu o máximo de acúmulo de serapilheira aos seis anos de idade, antes dos demais. Aos sete anos de idade houve queda brusca no acúmulo de serapilheira que se estabilizou até o oitavo ano. A partir do sétimo ano, o povoamento pode ter atingido uma fase de baixo crescimento, devido ao aumento da competição intraespecífica. Neste período houve menor produção de serapilheira, consequentemente também redução da quantidade acumulada no solo.

De modo geral, as concentrações de nutrientes na serapilheira reduziram com o decorrer da idade do povoamento, devido ao efeito de diluição e à eficiência da ciclagem bioquímica (Tabela 8). Houve pequena variação das concentrações de Ca, Mg, S, Cu, Mn e Zn nos compartimentos da parte aérea com a idade, o que está relacionado às menores concentrações de nutrientes na serapilheira. Em geral, o tratamento CReCF teve as maiores concentrações de nutrientes na serapilheira em relação aos demais tratamentos. A concentração dos macronutrientes na serapilheira acumulada no ano, no geral, correspondeu à seguinte ordem decrescente para todos os tratamentos: $\text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{S} > \text{K} > \text{P}$, e, para os micronutrientes: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$, independentemente do tratamento.

Tabela 8 – Concentração de nutrientes na serapilheira acumulada nos diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais e idades

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
CReCF	5,9 bc	0,17 ab	0,65	9,4 ab	1,2 cd	1,5 a	37 ab	9 ab	638 bc	391	20
SCoCF	5,4 bc	0,11 b	0,53	10,7 a	1,4 bc	1,3 a	24 bc	4 c	423 d	432	11
SPACF	6,6 b	0,14 b	0,50	6,9 b	1,6 ab	1,4 a	41 a	11 a	960 ab	391	16
SReCF	8,6 a	0,17 ab	0,73	10,4 a	1,8 a	1,5 a	47 a	6 bc	1365 a	463	19
CReSF	4,9 c	0,25 a	0,43	7,0 b	1,1 d	0,9 b	19 c	13 a	633 c	571	10
Sig. teste F	<0,01	0,04	0,08	0,03	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	0,21
	4 anos										
CReCF	8,2	0,32	0,41 a	6,1 a	1,2 a	1,3 b	20 a	9	3143 b	248 a	8
SCoCF	8,1	0,35	0,43 a	6,1 a	1,2 a	1,5 b	20 a	8	2561 b	249 a	7
SPACF	7,3	0,28	0,34b	4,5 bc	1,1 a	1,6 ab	15 ab	11	5748 a	156 b	10
SReCF	7,6	0,28	0,39 a	4,7 b	1,3 a	1,8 a	14 b	10	4614 ab	130 b	9
CReSF	8,4	0,33	0,33b	3,5 c	0,7 b	1,5 b	19 a	11	2963 b	263 a	8
Sig. teste F	0,25	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,06	0,34	<0,01	<0,01	0,12
	6 anos										
CReCF	5,9	0,13	0,26 ab	3,4 ab	1,0 a	1,2	11	9 b	3841	149 b	5
SCoCF	5,8	0,12	0,32 a	4,1 a	1,1 a	0,9	9	9 b	2129	161 b	4
SPACF	6,2	0,14	0,28 ab	3,8 ab	1,1 a	1,2	8	11 a	3465	139 b	5
SReCF	6,0	0,19	0,24 b	3,2 b	1,0 a	1,3	7	11 a	5428	110 c	6
CReSF	6,1	0,21	0,25 b	3,3 ab	0,8 b	1,1	9	12 a	2160	244 a	4
Sig. teste F	0,20	0,32	0,02	0,02	<0,01	0,13	0,58	0,03	0,19	<0,01	0,10
	8 anos										
CReCF	6,8 ab	0,50 a	0,18	3,2 b	0,8 ab	0,6 b	45 a	8 a	1078 a	129 c	5 b
SCoCF	6,9 a	0,50 a	0,22	4,0 a	1,0 a	0,7 a	37 ab	8 a	1188 a	153 b	6 a
SPACF	5,7 c	0,50 a	0,18	3,2 b	0,9 a	0,5 b	29 c	7 ab	1179 a	112 c	6 a
SReCF	6,2 bc	0,41 b	0,17	3,2 b	0,9 a	0,5 b	32 bc	6 b	965 b	112 c	5 b
CReSF	6,4 ab	0,25 c	0,21	3,2 b	0,7 b	0,4 c	32 bc	7 ab	837 b	194 a	5 b
Sig. teste F	<0,01	<0,01	0,47	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

4.2.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais

4.2.2.1 Serapilheira depositada

A produção de folhas e galhos teve variação ao longo dos meses e a deposição destes compartimentos foi diferente para cada tratamento (Figura 18). As maiores deposições de folheto ocorreram nos períodos de maior precipitação pluvial, temperatura média do ar e de maior crescimento das árvores (outubro a fevereiro). No tratamento SPACF, a deposição de folheto variou entre $145 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ em maio e $767 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ em novembro. A deposição de galhada variou entre $218 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ em abril e $492 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ em novembro. O tratamento SPASN teve a maior deposição de folheto ($910 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$) em janeiro, mês com maior precipitação pluvial. A formação da serapilheira segue uma sazonalidade em função das condições climáticas ao longo do ano e é favorecida em períodos quentes e úmidos (POGGIANI et al., 1998).

No período de maior precipitação pluvial e temperatura média do ar (outubro a março), a deposição média de serapilheira (folheto e galhada) foi de $3,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ seis meses}^{-1}$, sendo 51% folhas e 49% galhos (Figura 18). No período de menor precipitação pluvial e temperatura média do ar (abril a setembro), a deposição média de serapilheira foi de $2,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ seis meses}^{-1}$, sendo 39% folhas e 61% galhos. Quando somadas as deposições dos períodos de maior e de menor precipitação pluvial, houve $6,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de deposição média serapilheira, sendo 46% folhas e 54% galhos. A influência sazonal na variação das concentrações de nutrientes na serapilheira foi geralmente pequena e também foi relatada por outros autores (SCHUMACHER et al., 1994; CUNHA et al., 2005). O padrão sazonal de retorno de nutrientes ao solo foi determinado pela deposição de serapilheira, pois a concentração dos nutrientes não teve grandes variações durante o período de avaliação.

O conteúdo de nutrientes na serapilheira depositada teve variações entre os tratamentos (Tabela 9). Carpanezzi (1980) cita que as concentrações de nutrientes do material orgânico depositado no solo é dependente de fatores como a fertilidade do solo e a nutrição mineral das árvores, além da influência do regime de chuvas. Em média, a deposição de N foi de $47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no tratamento SPASN. Este valor não diferiu dos demais tratamentos SPACF, SPASP, SPASK e SPASCa, que depositaram 45,2; 43,2; 41,1 e 43,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Em todos os tratamentos, a deposição de N é mais expressiva durante o período de maior precipitação pluvial, pois a deposição de nutrientes é diretamente dependente da massa depositada.

A deposição de P nos tratamentos SPACF e SPASN foi de $2,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $2,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente, diferindo dos tratamentos SPASP ($1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), SPASK ($1,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e SPASCa ($1,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Os conteúdos totais anuais de deposição de Ca e Mg não diferiram entre os tratamentos.

A deposição anual de K foi de $4,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no tratamento SPACF, diferindo apenas do tratamento SPASK ($2,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Tabela 9). No folheto, o conteúdo de K não teve diferença entre os tratamentos. O menor conteúdo de K na galhada depositada foi encontrado no tratamento SPASK, o qual não recebeu fertilização com este elemento, o que promoveu menor ciclagem biogeoquímica deste nutriente.

A deposição de Mg pelo folheto e pela galhada no tratamento SPASCa foi a menor em relação aos demais tratamentos (Tabela 9). A omissão da calagem neste tratamento pode ter influenciado nos níveis de Mg no solo disponível para absorção pelas árvores.

Estes resultados deixam claro que a quantidade de nutrientes minerais depositados ao solo por meio da queda das folhas e galhos depende do estado nutricional das árvores. No entanto, apenas a deposição no solo não garante que esses nutrientes estarão disponíveis para as árvores. É necessário que ocorra os processos de decomposição da serapilheira pelos microorganismos do solo.

Figura 18 – Produção de folheto nos tratamentos com fertilização mineral (a), Produção de galhada nos tratamentos com fertilização (b), Precipitação pluviométrica e temperatura média do ar na área de estudo no período correspondente a doze meses de coleta (c). As linhas acima das barras indicam o erro padrão da média

Tabela 9 – Deposição anual de nutrientes no solo por meio de folheda e galhada nos tratamentos com fertilização mineral

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹																		
Período de maior precipitação pluviométrica ⁽²⁾						Período de menor precipitação pluviométrica ⁽³⁾						Total no ano ⁽⁴⁾						
Folheda																		
SPACF	17,5	1,3 a	1,7	12,6	4,0 a	0,9 b	10,1	0,4	1,4	5,8	1,9	0,7	27,6	1,7 a	3,2	18,4	5,9	1,7
SPASN	19,7	1,2 a	1,6	13,2	4,1 a	0,8 b	10,6	0,4	1,3	6,7	2,0	0,8	30,3	1,7 a	2,9	19,9	6,2	1,6
SPASP	18,7	0,7 b	1,9	11,6	3,6 ab	1,5 a	11,4	0,4	1,5	6,4	2,0	0,9	30,0	1,1 b	3,4	18,1	5,7	2,3
SPASK	18,1	0,8 b	1,1	12,2	3,7 ab	1,5 a	10,0	0,5	1,1	5,6	1,7	0,7	28,1	1,3 b	2,2	17,8	5,4	2,3
SPASCa	19,1	0,8 b	1,6	11,0	3,1 b	1,5 a	9,7	0,4	1,8	5,5	1,6	0,7	28,8	1,2 b	3,4	16,5	4,7	2,2
Galhada																		
SPACF	7,6	0,4 a	0,4 a	5,0	2,1 a	0,8 a	9,6	0,5 ab	0,7 ab	5,9 a	2,4 a	0,8	17,2 a	0,9 ab	1,0 ab	10,9 a	4,5 a	1,6 a
SPASN	8,1	0,4 a	0,4 a	4,4	1,9 a	0,7 ab	8,2	0,7 a	0,9 a	5,3 a	1,9 ab	0,6	16,3 ab	1,0 a	1,3 a	9,7 ab	3,8 ab	1,3 ab
SPASP	7,4	0,1 b	0,4 a	4,2	1,9 a	0,8 a	5,6	0,3 c	0,5 bc	4,0 ab	1,4 b	0,5	13,0 b	0,5 c	0,9 b	8,1 b	3,3 bc	1,3 ab
SPASK	9,1	0,3 ab	0,2 b	4,7	1,8 a	0,6 b	3,8	0,3 c	0,3 c	3,2 b	1,1 bc	0,3	12,9 b	0,5 c	0,4 c	7,8 b	2,9 c	0,9 b
SPASCa	8,5	0,3 ab	0,4 a	4,3	1,2 b	0,8 a	5,6	0,4 bc	0,6 b	3,2 b	0,8 c	0,6	14,1 ab	0,7 b	1,0 ab	7,5 b	1,9 d	1,3 ab
Folheda + Galhada																		
SPACF	25,1	1,6 a	2,1 a	17,6	6,2 a	1,7 b	19,7	0,9	2,1	11,7	4,2 a	1,5	44,8	2,6 a	4,2 a	29,4	10,4	3,2
SPASN	27,8	1,6 a	2,0 a	17,6	6,0 a	1,5 b	18,8	1,1	2,2	12,1	4,0 a	1,4	46,6	2,7 a	4,1 a	29,7	10,0	2,9
SPASP	26,0	0,8 b	2,3 a	15,8	5,5 a	2,3 a	17,0	0,7	2,0	10,4	3,4 ab	1,3	43,0	1,6 b	4,3 a	26,2	8,9	3,6
SPASK	27,2	1,0 b	1,2 b	16,9	5,5 a	2,1 a	13,9	0,8	1,4	8,7	2,8 b	1,1	41,0	1,8 b	2,6 b	25,6	8,3	3,2
SPASCa	27,6	1,0 b	2,0 a	15,3	4,2 b	2,2 a	15,3	0,9	2,3	8,7	2,4 c	1,3	42,9	1,9 b	4,4 a	24,1	6,6	3,5

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade; ⁽²⁾Meses: outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março; ⁽³⁾ Meses: abril, maio, junho, julho, agosto, setembro; ⁽⁴⁾ Soma de todos os meses do ano (junho de 2011 a maio de 2012)

4.2.2.2 Serapilheira acumulada

Até aos quatro anos de idade, houve estabilização do conteúdo de serapilheira acumulada em todos os tratamentos (Figura 19). A partir desta idade, ocorreu o fechamento de copas e então o processo de deposição dos resíduos se intensificou, resultando em maior acúmulo de serapilheira ao longo do ciclo. Em geral, todos os tratamentos tiveram, aproximadamente, a mesma quantidade de serapilheira acumulada no quarto ano, variando entre 15 t ha^{-1} no tratamento SPASP e 16 t ha^{-1} no tratamento SPACF. Desta idade em diante, o acúmulo de serapilheira aumentou 6 t ha^{-1} por ano, em média.

A partir do sétimo ano, houve queda brusca no acúmulo de serapilheira em todos os tratamentos. No oitavo ano de idade, o acúmulo de serapilheira reduziu em média $5,2$; $5,1$; $8,7$; $7,5$ e $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ nos tratamentos SPACF, SPASN, SPASP, SPASK E SPASCa, respectivamente, quando comparados ao ano anterior. A decomposição das frações mais lábeis e a intensificação da ciclagem bioquímica de nutrientes podem ter contribuído para a expressiva redução no acúmulo de serapilheira no oitavo ano. Aos oito anos de idade, o tratamento sem a parte aérea e sem fertilização com K, SPASK, teve o menor acúmulo de serapilheira sobre o solo.

Figura 19 – Serapilheira acumulada sobre o solo nos tratamentos com fertilização mineral em função da idade. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LSD

De modo geral, as concentrações de macro e micronutrientes na serapilheira diminuíram com o decorrer da idade do povoamento. Os tratamentos que não receberam algum nutriente na fertilização mineral tiveram menor concentração deste nutriente na serapilheira, quando comparados ao tratamento que recebeu a fertilização completa. As diferenças mais expressivas ocorreram no oitavo ano após o plantio, na concentração de P, que se reduziu no tratamento SPASP ($0,28 \text{ g kg}^{-1}$), em comparação à concentração no tratamento SPACF ($0,50 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 10). Nos anos em que foram observadas diferenças entre os tratamentos, o tratamento SPACF apresentou as maiores concentrações de nutrientes na serapilheira.

De modo geral, as folhas continham maiores concentrações da maioria dos nutrientes, por ser um tecido fisiologicamente mais ativo e apresentar taxa de decomposição mais acelerada. Do ponto de vista da ciclagem de nutrientes, as folhas representam a via mais rápida de retorno e mais rica de nutrientes, o que configura uma estratégia das árvores na utilização de nutrientes para seu crescimento (CALDEIRA et al., 2008).

A concentração total anual dos macronutrientes na serapilheira acumulada, no geral, correspondeu à seguinte ordem decrescente para todos os tratamentos: $\text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{S} > \text{K} > \text{P}$, e, para os micronutrientes: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$, independentemente do tratamento.

Tabela 10 – Concentração de nutrientes na serapilheira acumulada em diferentes tratamentos com fertilização mineral e idades

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
SPACF	6,6 c	0,14 b	0,50	6,9 ab	1,6 a	1,4 b	41 a	11 b	960 b	391	16
SPASN	7,4 bc	0,16 b	0,60	9,3 a	1,5 ab	1,4 b	33 ab	7 c	1128 a	500	13
SPASP	10,0 a	0,16 b	0,63	8,9 a	1,6 a	1,6 a	29 b	13 ab	1195 a	789	22
SPASK	4,3 d	0,17 b	0,70	8,3 a	1,5 ab	1,4 b	45 a	11 b	1040 a	409	15
SPASCa	8,5 ab	0,28 a	0,87	5,7 b	1,2 b	1,2 c	35 ab	13 a	1168 a	657	15
Sig. teste F	<0,01	0,04	0,08	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	0,21
	4 anos										
SPACF	7,3	0,28	0,34 ab	4,5 a	1,1 a	1,6 a	15 b	11	5748 a	156 b	10
SPASN	7,3	0,26	0,39 a	5,1 a	1,3 a	1,5 a	21 a	11	3905 b	186 ab	8
SPASP	7,2	0,31	0,36 a	4,9 a	1,3 a	1,5 a	21 a	10	4475 b	172 ab	8
SPASK	8,4	0,40	0,29 b	4,9 a	1,2 a	1,6 a	20 a	10	4956 ab	189 ab	9
SPASCa	9,5	0,33	0,38 a	3,2 b	0,5 b	1,3 b	20 a	10	2316 c	211 a	8
Sig. teste F	0,25	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,06	0,34	<0,01	<0,01	0,11
	6 anos										
SPACF	6,2	0,14	0,28 a	3,8 ab	1,1 a	1,2	8	11 a	3465	139 b	5
SPASN	5,0	0,17	0,24 ab	4,1 a	1,1 a	0,7	8	10 ab	1634	146 ab	4
SPASP	4,9	0,13	0,23 b	3,2 bc	1,0 ab	0,8	10	10 ab	1834	126 b	4
SPASK	5,0	0,16	0,17 c	3,4 ab	0,9 b	0,9	8	8 b	2698	137 b	4
SPASCa	5,4	0,15	0,28 a	2,5 c	0,5 c	0,8	8	8 b	1264	183 a	3
Sig. teste F	0,20	0,32	0,02	0,02	<0,01	0,13	0,58	0,03	0,19	<0,01	0,10
	8 anos										
SPACF	5,7 bc	0,50 a	0,18	3,2 b	0,9 a	0,5 a	29b	7 a	1179 b	112 b	6 a
SPASN	5,5 c	0,29 b	0,17	3,1 b	0,9 a	0,4 b	43 a	7 a	1579 ab	120 b	4 c
SPASP	5,3 c	0,28 b	0,18	3,1 b	0,9 a	0,4 b	49 a	7 a	1134 b	123 b	5 b
SPASK	7,0 a	0,34 b	0,19	3,8 a	0,9 a	0,5 a	48 a	7 a	2003 a	145 a	6 a
SPASCa	5,9 ab	0,25 b	0,21	2,6 c	0,5 b	0,4 b	31 b	7 a	885 c	153 a	5 b
Sig. teste F	<0,01	<0,01	0,47	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada característica, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

4.3 Crescimento das árvores

4.3.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais

O volume de madeira das árvores não aumentou devido à retenção dos resíduos da colheita ou partes deles no solo, durante toda a rotação de cultivo (Figura 20). O crescimento das árvores foi afetado pela fertilização mineral e isto foi perceptível desde o primeiro ano após a instalação do experimento. O volume no tratamento CReCF foi 42% maior do que no tratamento CReSF, que teve o menor crescimento entre os tratamentos. No terceiro ano, o IMA do tratamento CReCF ($55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), foi 62% maior do que o do tratamento CReSF ($34 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Em plantações de *E. globulus*, na Austrália, Mendham et al. (2003) constataram que a remoção ou manutenção dos resíduos não influenciou a produtividade de madeira do povoamento em uma área com solo de alta fertilidade, porém, em solos de baixa fertilidade, grandes diferenças foram encontradas. Estes autores observaram que a maior produtividade foi alcançada pelo tratamento que recebeu o dobro dos resíduos. O tratamento em que os resíduos foram mantidos não diferenciou do que teve os resíduos removidos. A manutenção ou remoção de partes dos resíduos florestais não diminuiu o crescimento em madeira das árvores, no entanto, o esgotamento dos recursos do solo (matéria orgânica e nutrientes) pode afetar o potencial de produtividade dos povoamentos de *Eucalyptus* em rotações subsequentes e/ou de ciclos de cultivo mais longos (MENDHAM et al., 2003).

A falta de resposta em produtividade de madeira em povoamentos de eucalipto, quanto a remoção ou manutenção dos resíduos, foi demonstrada em diversos trabalhos no mundo: na Índia (SANKARAN et al., 2008), em Portugal (JONES et. al., 1999) e na China (XU et al., 2008). Estes autores concluíram que isto se deve à baixa quantidade de resíduos remanescentes da rotação de cultivo anterior. Por isso, a aplicação de nutrientes via fertilização mineral tem influência expressiva no aumento da produtividade de madeira do povoamento, o que contribui mais do que a manutenção dos resíduos na área.

Em um estudo feito por Rocha (2014), em povoamentos de *E. grandis* no Brasil, a produção de madeira foi de $350 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ao final da rotação de cultivo (oito anos), no tratamento em que todos os resíduos florestais foram mantidos sobre o solo. Quando só a serapilheira foi mantida (colheita das árvores inteiras), houve perda de 15% no volume de madeira e, quando todos os resíduos foram removidos, a perda de produtividade foi de 39%. No experimento deste autor, não foi feita a calagem e foram aplicados 15 kg ha^{-1} de N, 30 kg

ha^{-1} de P_2O_5 e 165 kg ha^{-1} de K_2O . As doses de fertilizantes aplicados foram menores do que as recomendadas, considerando as concentrações disponíveis no solo, ao contrário do presente estudo, o qual recebeu a fertilização mineral em níveis adequados (100 kg ha^{-1} de N, 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 , 150 kg ha^{-1} de K_2O e 2 t ha^{-1} de calcário). Este fato pode explicar a falta de resposta em crescimento entre os tratamentos com diferentes manejos de resíduos, pois os nutrientes estavam em níveis adequados no solo para suprir a demanda nutricional das árvores (Figura 20).

Figura 20 – Volume de madeira com casca (a) e incremento médio anual (IMA) de madeira com casca (b) em função da idade em diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

Nenhuma diferença foi encontrada ao longo da rotação de cultivo em relação à biomassa total de madeira e de casca entre o tratamento que se manteve todos os resíduos (CReCF) e os tratamentos em que os resíduos foram parcialmente removidos (SCoCF, SPACF, SReCF) (Figura 21). Porém, o tratamento CReSF teve menor acúmulo de biomassa de madeira e casca em relação aos demais tratamentos que receberam fertilização mineral.

Figura 21 – Produção de biomassa de madeira (a), casca (b), galho (c) e folha (d) em função da idade em diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

Aos oito anos de idade, no tratamento CReCF, os compartimentos copa (folhas e galhos), casca e madeira representaram 5, 9 e 86% da biomassa total da parte aérea, respectivamente (Figura 21). No início do crescimento do povoamento, a produção de folhas e galhos foi alta devido à necessidade do estabelecimento da área fotossintética. Além disso, como não há competição por luz e água, a maioria dos fotoassimilados produzidos é destinada

à produção de copa (GONÇALVES et al., 2002). Após o terceiro ano, a biomassa de folhas e galhos diminuiu acentuadamente, devido ao fechamento de copas neste estágio de desenvolvimento da floresta. A quantidade relativa de tronco (madeira e casca) aumenta gradativamente em relação à quantidade de copa devido ao fechamento do dossel das árvores (GONÇALVES et al., 2002).

No oitavo ano, o tratamento CReCF teve o maior produção de biomassa (220 t ha^{-1}), 65% superior à produção do tratamento CReSF (133 t ha^{-1}) (Figura 22). A produção de biomassa dos tratamentos SCoCF, SPACF e SReCF foi de 206, 196 e 195 t ha^{-1} , respectivamente. Uma das principais contribuições da manutenção dos resíduos florestais no solo para o aumento da produtividade em biomassa é a redução da exportação de nutrientes, e aumento da disponibilidade destes para as árvores por meio da decomposição da serapilheira (Du TOIT et al., 2008; DELEPORTE et al., 2008; LACLAU et al., 2010). No entanto, em plantios comerciais, nos quais é almejada alta produtividade de madeira, somente a entrada de nutrientes via decomposição dos resíduos florestais não é capaz de suprir a demanda nutricional.

Figura 22 - Produção de biomassa da parte aérea (madeira, casca, galho e folha) em função da idade em diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

4.3.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais

O tratamento SPASK, o qual não recebeu fertilização potássica, teve expressivo decréscimo em produtividade de madeira quando comparados aos demais tratamentos (Figura 23). Nos tratamentos SPASN, SPASP e SPASCa, a omissão dos respectivos nutrientes na fertilização mineral, pouco influenciou o crescimento em relação ao tratamento que recebeu fertilização mineral completa (SPACF).

O crescimento das árvores foi mais afetado pela omissão de K na fertilização, a partir do terceiro ano de idade, sendo o volume no tratamento SPACF, 49% maior do que no tratamento SPASK (Figura 23). Consequentemente, o IMA no tratamento SPASK diminuiu no terceiro ano ($51 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e foi 50% menor do que o tratamento SPACF ($26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Nos tratamentos em que se omitiu algum nutriente, a redução do incremento médio anual foi mais pronunciada até aos três anos após o plantio. Pode-se inferir que após este período, devido ao fechamento de copas e a maior deposição de serapilheira, os processos de ciclagem de nutrientes começaram a ocorrer de maneira mais pronunciada e foram capazes de suprir a demanda nutricional do povoamento.

É evidente a resposta negativa à omissão de K na fertilização mineral, sendo este um fator limitante à produtividade do eucalipto. O menor crescimento em altura, DAP e volume do *E. grandis* no tratamento SPASK, confirma a importância da fertilização potássica para aumentar a produtividade de madeira (GAVA, 1997; FARIA et al., 2002; GONÇALVES et al., 2004). O K desempenha importantes funções enzimáticas e reguladoras como abertura e fechamento dos estômatos (BRADY; WEIL, 2008). A deficiência deste nutriente na planta culmina na redução da área foliar e, consequentemente, na menor interceptação da radiação além de acelerar a senescência das folhas, fatores responsáveis pela redução da biomassa produzida (MARSCHNER, 1995).

Almeida et al. (2010) verificaram que a aplicação de K aumentou em 130% a biomassa aérea das árvores no terceiro ano de idade. Vários outros trabalhos demonstraram respostas expressivas à aplicação de K em povoamentos florestais (GAVA et al., 1997; FARIA et al., 2002; LACLAU et al., 2009; ALMEIDA et al., 2010). Outro possível efeito da fertilização com K, não medido neste experimento, é o menor controle da abertura e do fechamento dos estômatos das árvores mal nutridas com este elemento, o que resulta em redução da eficiência de uso de água pelas árvores, conforme relatado por Teixeira et al. (1995) para várias espécies de eucalipto. Isto implica em maior produção de matéria seca das

árvores fertilizadas por unidade de volume de água transpirada, em comparação com as árvores não fertilizadas com K.

Figura 23 - Volume de madeira com casca (a) e incremento médio anual (IMA) de madeira com casca (b) em função da idade em diferentes tratamentos com fertilização mineral. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

Não houve resposta à fertilização nitrogenada (contraste entre os tratamentos SPASN e SPACF) (Figura 23). A ausência ou pequena resposta do eucalipto à adubação nitrogenada pode ser atribuída à maior quantidade de N mineralizado da matéria orgânica do solo (GAMA-RODRIGUES, 1997; PULITO, 2009). Pulito (2009) observou que, em média, nos povoamentos mais jovens, a fertilização resultou em aumento de 12% de produtividade. Esta resposta caiu para 6% entre três e quatro anos de idade. Na idade de corte, não foi observada resposta à fertilização. Assim, nos estádios iniciais dos povoamentos, a fertilização

nitrogenada pode acelerar o ritmo de crescimento das árvores, pois aumenta a disponibilidade de N em uma fase em que as taxas de mineralização deste nutriente no solo e nos resíduos vegetais não conseguem atender à alta demanda das árvores. Desta forma, outros nutrientes cujas concentrações no solo são extremamente baixas, como o P (NOVAIS et al., 1982) e o K (GAVA, 1997; VALERI et al., 1991) são mais limitantes e, conseqüentemente, mais responsivos ao crescimento do eucalipto.

A produção de biomassa de madeira e casca (Figura 24) teve o mesmo comportamento do crescimento em volume (Figura 23). O tratamento SPASK teve a menor produção de biomassa em todos os compartimentos (madeira, casca, galho e folha). Os demais tratamentos apresentaram maiores médias quanto ao acúmulo de biomassa, em todos os compartimentos, não diferindo entre si.

Figura 24 - Produção de biomassa de madeira (a), casca (b), galho (c) e folha (d) em função da idade em diferentes tratamentos com fertilização mineral. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

Ao omitir o K na fertilização, reduziu-se a quantidade de copa, o que implica em redução de área foliar das árvores e, conseqüentemente, sua captação de energia (Figura 24). No oitavo ano de idade, a diferença entre biomassa de copa entre os tratamentos SPACF e SPASK foi de 72%. Resultados semelhantes foram encontrados por Leal et al. (1988) e Miranda et al. (1998), ao compararem o crescimento de árvores de eucalipto com ou sem aplicação de fertilizantes. Neste experimento, na primeira rotação, a fertilização potássica proporcionou ganhos de 99 e de 87% na biomassa da parte aérea e da copa, respectivamente, em relação ao tratamento que não recebeu K.

No oitavo ano, o tratamento SPASK teve a menor produção de biomassa (91 t ha^{-1}), 46% inferior à produção do tratamento SPACF (196 t ha^{-1}) (Figura 25). A produção de biomassa dos tratamentos SPASN, SPASP e SPASCa foi de 199, 180 e 203 t ha^{-1} , respectivamente. Barros et. al. (1992) relataram que a necessidade de K aumenta com a produção de biomassa e, portanto, com a idade do eucalipto. Estes autores verificaram em um povoamento *E. grandis* que a produção máxima de biomassa aos seis anos de idade foi obtida com a aplicação da dose de $179 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$, a qual aumentou em 63% a produção quando comparada a ausência de K na fertilização.

Figura 25 - Produção de biomassa da parte aérea (madeira, casca, galho e folha) em função da idade em diferentes tratamentos com fertilização mineral. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. As barras indicam as diferenças mínimas significativas a 5% de probabilidade pelo teste LCD

4.4 Concentração e acúmulo de nutrientes na parte aérea

4.4.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais

Os tratamentos aplicados influenciaram nas concentrações dos nutrientes nos compartimentos da parte aérea (madeira, casca, galhos e folhas). As maiores diferenças nas concentrações ocorreram em função da idade do povoamento (Tabelas 11, 12, 13 e 14).

Na madeira e na casca, as maiores concentrações de N ocorreram na fase inicial (segundo ano) e, a partir desta idade, grandes reduções ocorreram nas concentrações em todos os tratamentos (Tabelas 11 e 12). Nos galhos, a concentração de N foi maior aos seis anos de idade, reduzindo-se no oitavo ano (Tabela 13). Houve aumento na concentração de N nas folhas no quarto ano, a qual se manteve constante até o sexto ano de idade (Tabela 14). Dos seis aos oito anos de idade, a concentração de N nas folhas reduziu em todos os tratamentos. Laclau, Bouillet e Ranger (2000) encontraram redução na concentração dos nutrientes no tronco (lenho e casca) das árvores, com o decorrer da idade, em plantações de eucalipto. Estes mesmos autores também relataram aumento da concentração de N nas folhas com o aumento da idade do povoamento.

Os compartimentos da parte aérea mais ricos em N seguiram a seguinte ordem: folha > casca > galho > madeira. A elevada concentração de N nas folhas e galhos aos dois anos, aliada à alta biomassa destes compartimentos nesta idade, resultou em grande acúmulo de N. Aproximadamente 65% do N acumulado na parte aérea foi encontrado na copa (Figura 26). No quarto ano após o plantio, a contribuição da copa no acúmulo total de N caiu para 40% e, no oitavo ano, reduziu para aproximadamente 30%. Este comportamento foi semelhante em todos os tratamentos estudados. O tratamento CReSF teve menores conteúdos de N acumulados nos compartimentos em função da sua menor biomassa de madeira, casca, folhas e galhos. Em todos os tratamentos, o acúmulo de N na madeira aumentou com a idade das árvores, proporcionalmente, à medida que a biomassa de madeira aumentou. Inversamente, o acúmulo de N na copa diminuiu com a idade à medida que a biomassa de folhas e galhos diminuiu. Este comportamento sugere a retranslocação de N contido nas folhas para o cerne, aumentando sua proporção com a idade.

A concentração de P na madeira diminuiu até o sexto ano e aumentou após esta idade, (Tabela 11). No oitavo ano, a concentração de P na madeira foi menor em todos os tratamentos. Na casca, galhos e folhas, a concentração de P apresentou pequena redução dos dois aos quatro anos, aumentando após esta idade até o sexto ano (Tabelas 14, 15 e 16). No

oitavo ano, a concentração de P apresentou pequeno aumento na casca, galhos e folhas. Os compartimentos da parte aérea mais ricos em P seguiram a seguinte ordem: folha > casca > madeira > galho. O acúmulo de P nos compartimentos foi proporcional ao acúmulo de biomassa, pois ocorreram poucas variações na concentração deste nutriente nos compartimentos aéreos em função da idade (Figura 26). A maior parte do P acumulado na parte aérea, aos dois anos de idade, foi alocada na copa das árvores. A partir do quarto ano até o final da rotação de cultivo, aproximadamente 78% do P estava estocado na madeira e menos de 10% foi encontrado na copa.

A concentração de K na madeira reduziu com o decorrer da idade em todos os tratamentos (Tabela 11). Entre o segundo e o quarto ano, a concentração de K reduziu drasticamente em todos os tratamentos. Este comportamento foi o mesmo relatado por Laclau, Bouillet e Ranger (2000) e Rocha (2014), porém com diferentes valores de concentração. Na casca, galhos e folhas, a concentração de K teve o mesmo comportamento do P (Tabelas 14, 15 e 16). Os compartimentos da parte aérea mais ricos em K seguiram a seguinte ordem: folha > casca > galho > madeira. No tratamento CReCF, observou-se que o conteúdo de K na madeira, aos oito anos (28 kg ha^{-1}), foi menor do que aos seis anos de idade (32 kg ha^{-1}) apesar do aumento de biomassa de madeira de 115 kg ha^{-1} no sexto ano e 191 kg ha^{-1} no oitavo ano. Silva (1996), quantificando o estoque de nutrientes em plantações de eucalipto, também constatou que o conteúdo de K na madeira reduziu à medida que as árvores cresceram, o que sugere a retranslocação interna deste nutriente na árvore (Figura 26). Os demais tratamentos apresentaram o mesmo comportamento quanto ao acúmulo de nutrientes ao longo dos anos, mas em menores proporções, devido às diferenças no manejo de resíduos que influenciaram na produção de biomassa.

A concentração de Ca na madeira reduziu com o decorrer da idade em todos os tratamentos (Tabela 11). Nos demais compartimentos, pequenas oscilações na concentração de Ca ocorreram entre os anos (Tabelas 14, 15 e 16). Os compartimentos da parte aérea mais ricos em Ca seguiram a seguinte ordem: casca > folha > galho > madeira. Em relação ao Ca, aos dois anos de idade, houve baixo acúmulo deste nutriente na madeira, próximo a 12% do total acumulado até o final da rotação de cultivo (Figura 26). O conteúdo de Ca acumulado apenas na madeira, no segundo ano, foi próximo de 10% do total acumulado neste compartimento. O acúmulo de Ca foi proporcional ao acúmulo de biomassa, pois a concentração de Ca sofreu poucas alterações. Dos dois aos quatro anos de idade, houve um aumento de 77 kg ha^{-1} no conteúdo de Ca acumulado na casca das árvores. No final da

rotação de cultivo, 75% do Ca acumulado na parte aérea estava presente na casca e apenas 13% estava presente na madeira.

A concentração de Mg na madeira e nos galhos diminuiu com a idade em todos os tratamentos (Tabela 11). Na casca e nas folhas a concentração deste nutriente foi variável entre os anos. Os compartimentos da parte aérea mais ricos em Mg seguiram a seguinte ordem: casca > folha > galho > madeira. O acúmulo de Mg nos compartimentos da parte aérea reduziu no segundo ano de idade, o que representou aproximadamente 12% do total acumulado até o final da rotação de cultivo (Figura 26). Aproximadamente 57, 23 e 20% do Mg acumulado no final da rotação de cultivo estava presente na casca, madeira e copa, respectivamente.

O sistema de colheita, no qual a madeira é descascada no campo, pode representar considerável manutenção de K, Ca, e Mg no solo, uma vez que estes foram os elementos mais acumulados na casca das árvores. Hopmans et al. (1993) avaliaram os efeitos do descascamento das árvores no campo e constataram que a remoção de nutrientes pela colheita da madeira de um povoamento de eucalipto representa, geralmente, pequena quantidade da reserva disponível no solo. No entanto, o conteúdo na casca é alto quando comparado ao da madeira, podendo aumentar ainda mais a exportação de nutrientes do campo, e reduzir os estoques no solo nas futuras rotações de cultivo.

Exceto na casca, a concentração de S reduziu no oitavo ano de idade em todos os tratamentos (Tabela 12). As concentrações deste nutriente foram similares na casca, galho e folha (Tabelas 14, 15 e 16). O acúmulo de S na parte aérea apresentou o mesmo comportamento do acúmulo de biomassa (Figura 27). Aos oito anos de idade, em todos os tratamentos, 85% do S estava acumulado na madeira.

Com referência aos micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn, em todos os tratamentos, a concentração destes nos compartimentos da parte aérea, teve variações com o decorrer da idade. Na madeira, o Zn e o B apresentaram reduções em suas concentrações do segundo ao oitavo ano de idade (Tabela 11). Neste compartimento, as concentrações dos demais micronutrientes oscilaram entre os anos. A concentração de B na casca decresceu dos dois aos oito anos de idade e, os demais micronutrientes, tiveram oscilações em suas concentrações com o decorrer dos anos (Tabela 12). O acúmulo dos micronutrientes seguiu o comportamento do acúmulo de biomassa (Figura 27). Aos oito anos de idade, a ordem de acúmulo dos micronutrientes na parte aérea foi: $Mn > Fe > B > Cu > Zn$.

Na idade de corte do eucalipto (oito anos), o N foi o macronutriente mais acumulado na parte aérea, seguido pelo Ca, K, S, P e Mg. Entre os micronutrientes, o Mn foi o mais

acumulado na parte aérea, seguido pelo Fe, B, Cu e Zn. A ordem de acúmulo dos macros e micronutrientes foi a mesma observada em todos os tratamentos estudados. Estes resultados evidenciam a importância que os compartimentos da biomassa arbórea (casca, galhos e folhas) têm ao permanecerem como resíduos no solo, contribuindo com a redução da exportação de nutrientes do sítio florestal na operação de colheita. Depois do N, o Ca e o K são os nutrientes que mais poderão limitar a produtividade das próximas rotações de cultivo, considerando-se a colheita do tronco. Esta limitação pode ser substancialmente reduzida, principalmente para o Ca, se a colheita se restringir apenas à retirada da madeira descascada.

Tabela 11 – Concentração de nutrientes na madeira aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com manejo de resíduos florestais

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
CReCF	2,5	0,72a	2,4	0,9	0,32	0,33	1,2	4,0a	44	56ab	6,3
SCoCF	2,5	0,65a	2,5	0,8	0,26	0,33	3,4	2,8b	11	47bc	6,8
SPACF	2,4	0,65a	2,3	0,7	0,20	0,30	1,7	3,3ab	9	61ab	6,8
SReCF	2,4	1,10a	2,3	0,8	0,25	0,33	3,1	2,8b	14	40c	7,0
CReSF	2,3	0,57b	2,4	0,7	0,22	0,30	2,5	2,8b	9	58ab	2,8
Sig. teste F	0,77	0,04	0,22	0,36	0,09	0,51	0,18	0,01	0,34	0,03	0,49
	4 anos										
CReCF	1,2	0,13	0,4ab	0,3	0,08	0,54	3,2	3,0	33a	10b	1,1
SCoCF	1,2	0,12	0,6a	0,3	0,11	0,53	3,2	2,0	10c	11b	1,5
SPACF	1,2	0,12	0,4ab	0,3	0,08	0,53	4,4	1,4	19b	9b	1,2
SReCF	1,1	0,11	0,3b	0,3	0,09	0,51	3,9	2,0	13c	7b	1,0
CReSF	1,2	0,10	0,4ab	0,3	0,07	0,49	4,4	1,7	15bc	20a	1,1
Sig. teste F	0,69	0,42	0,02	1,00	0,30	0,44	0,75	0,37	<0,01	0,02	0,45
	6 anos										
CReCF	1,6	0,04	0,3	0,3	0,08ab	0,20	5,2	2,4a	37	10	1,9
SCoCF	1,3	0,08	0,3	0,4	0,08ab	0,23	4,4	1,3b	43	11	1,7
SPACF	1,7	0,02	0,3	0,3	0,08ab	0,22	2,2	1,1b	15	8	0,9
SReCF	1,8	0,05	0,4	0,4	0,11a	0,24	3,2	1,8b	51	10	1,8
CReSF	1,6	0,05	0,3	0,4	0,06b	0,20	2,7	2,1ab	38	20	2,0
Sig. teste F	0,09	0,78	0,62	0,09	0,02	0,42	0,51	0,03	0,20	0,08	0,07
	8 anos										
CReCF	1,6	0,32	0,2	0,2	0,06b	0,37	4,8	0,8	9	7b	1,3
SCoCF	1,5	0,31	0,2	0,3	0,10a	0,35	5,7	2,0	21	10ab	1,0
SPACF	1,5	0,31	0,2	0,2	0,08ab	0,36	5,1	1,7	8	7b	1,2
SReCF	1,4	0,32	0,1	0,2	0,06b	0,35	6,2	5,2	7	4c	0,8
CReSF	1,5	0,31	0,1	0,3	0,05b	0,34	6,6	1,3	11	14a	1,7
Sig. teste F	0,83	0,43	0,24	0,13	<0,01	0,74	0,97	0,35	0,64	0,02	0,47

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 12 - Concentração de nutrientes na casca aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com manejo de resíduos florestais

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
CReCF	8,9	0,33	4,1	12,3	1,87	0,79ab	18,5	3,0b	40	552b	9,5a
SCoCF	9,6	0,32	4,7	12,4	2,05	0,65b	15,7	7,5a	41	696ab	5,0b
SPACF	9,1	0,34	4,0	8,8	1,58	0,84a	21,9	2,5b	35	628ab	10,5a
SReCF	9,7	0,57	3,9	9,6	2,49	0,70b	24,4	7,0a	45	487b	9,0a
CReSF	10,2	0,29	5,1	13,7	2,11	0,65b	20,0	2,0b	62	845a	8,0a
Sig. teste F	0,53	0,66	0,26	0,39	0,35	<0,01	0,12	0,05	0,28	0,03	0,05
	4 anos										
CReCF	3,8	0,30b	2,9	10,3	2,29a	0,61a	14,2	2,9	43	192b	4,7
SCoCF	3,5	0,81a	2,5	9,5	2,52a	0,36b	13,9	2,7	32	287a	4,5
SPACF	3,4	0,37b	2,3	8,7	1,82ab	0,62a	11,7	2,8	49	147b	4,7
SReCF	3,6	0,47b	2,5	7,8	1,99ab	0,63a	11,5	2,4	36	131b	4,0
CReSF	3,4	0,70a	1,9	8,4	1,37b	0,29c	10,8	2,4	40	187b	4,1
Sig. teste F	0,86	<0,01	0,06	0,85	0,05	<0,01	0,64	0,60	0,60	<0,01	0,58
	6 anos										
CReCF	4,5	0,75a	3,2	8,4	2,78a	0,27a	13,0	5,7a	90	213	4,5
SCoCF	3,7	0,62ab	2,7	10,7	2,48a	0,17b	16,2	3,9b	44	182	3,2
SPACF	4,0	0,42b	2,4	10,9	1,98a	0,16b	16,1	4,3b	73	116	3,6
SReCF	4,1	0,43b	2,7	7,8	2,29a	0,17b	12,1	4,5b	64	197	5,4
CReSF	4,2	0,49b	2,4	6,1	0,95b	0,14b	8,5	3,2c	54	240	3,4
Sig. teste F	0,17	0,01	0,35	0,44	0,05	0,02	0,15	0,03	0,06	0,35	0,52
	8 anos										
CReCF	4,0	0,58	2,8	12,3	1,72a	0,29	11,4b	2,1ab	83	127	6,5
SCoCF	3,4	0,38	2,0	9,6	1,70a	0,26	10,6b	2,6a	106	150	3,7
SPACF	3,4	0,43	2,6	8,9	1,65a	0,34	17,3a	1,8ab	146	111	4,8
SReCF	3,5	0,44	2,0	8,2	1,52a	0,27	10,5b	0,8c	64	71	4,2
CReSF	3,1	0,42	1,9	7,3	0,82b	0,20	10,9b	2,2a	38	157	3,9
Sig. teste F	0,29	0,87	0,07	0,13	<0,01	0,83	0,03	<0,01	0,08	0,14	0,31

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 13 – Concentração de nutrientes nos galhos aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com manejo de resíduos florestais

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
CReCF	4,2	0,27	2,4 a	3,7 ab	0,65 a	1,07	13,5	7,0 ab	23 b	145	5,0 c
SCoCF	4,7	0,25	2,7 a	3,9 ab	0,88 a	1,18	13,5	3,5 c	39 a	107	6,0 ab
SPACF	3,8	0,14	1,9 ab	4,8 a	0,64 a	1,24	11,2	7,0 ab	26 ab	111	5,0 c
SReCF	3,3	0,19	1,7 ab	2,0 c	0,82 a	1,12	11,8	5,0 bc	16 b	86	6,5 a
CReSF	3,9	0,11	1,0 c	2,7 bc	0,28 b	1,12	12,0	7,5 a	20 b	226	5,5 bc
Sig. teste F	0,41	0,20	0,02	0,01	<0,01	0,56	0,48	<0,01	<0,01	0,15	0,01
	4 anos										
CReCF	3,4	0,42a	1,3	2,7	0,80	0,33	5,9	4,5b	33	167b	1,8a
SCoCF	2,8	0,34b	1,5	2,4	0,80	0,26	4,4	7,3a	22	134b	2,1a
SPACF	2,9	0,34b	1,1	2,3	0,64	0,29	6,9	4,1b	24	159b	0,9b
SReCF	3,2	0,40a	1,2	3,0	0,96	0,30	6,6	4,5b	31	166b	2,1a
CReSF	3,4	0,34b	0,9	2,5	0,61	0,27	7,0	6,7a	25	270a	3,1a
Sig. teste F	0,26	0,02	0,11	0,64	0,21	0,47	0,73	<0,01	0,62	0,05	0,04
	6 anos										
CReCF	5,4	0,44	2,0	3,9a	1,11a	0,23	8,1b	10,1	28	243	3,0
SCoCF	3,7	0,47	1,8	3,7b	0,88a	0,18	9,2ab	7,3	31	259	2,8
SPACF	4,6	0,40	1,7	5,4a	1,34a	0,17	11,3a	7,7	31	251	3,0
SReCF	3,7	0,57	1,9	3,4b	1,07a	0,25	5,9c	10,1	24	195	2,4
CReSF	5,4	0,64	2,3	3,5b	0,58b	0,15	8,8ab	11,1	33	472	3,5
Sig. teste F	0,09	0,79	0,49	0,02	0,02	0,46	0,02	0,55	0,76	0,07	0,80
	8 anos										
CReCF	3,1a	0,31	1,1	3,3	1,10	0,37	18,3b	8,7	40	232	6,3
SCoCF	4,8bc	0,48	1,4	3,6	1,25	0,38	21,2bc	8,6	35	220	3,7
SPACF	4,5c	0,42	1,4	3,2	1,28	0,34	23,0c	7,0	31	146	3,2
SReCF	4,4c	0,49	1,5	4,5	1,49	0,40	35,0a	8,5	27	194	6,3
CReSF	5,3b	0,41	1,4	4,5	0,86	0,38	33,8a	6,9	34	358	7,3
Sig. teste F	<0,01	0,50	0,53	0,26	0,34	0,33	<0,01	0,39	0,33	0,67	0,68

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 14 – Concentração de nutrientes nas folhas aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com manejo de resíduos florestais

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
CReCF	19,5	1,25	5,5 b	4,0	1,91	1,60 b	39,0	6,5	121	191 b	9,0
SCoCF	17,5	1,34	6,8 a	4,6	2,51	1,89 a	34,0	6,0	147	244 b	13,0
SPACF	20,4	0,88	4,5 c	5,8	2,48	1,48 b	37,5	5,0	122	248 b	9,5
SReCF	18,0	0,97	5,9 ab	4,6	2,25	1,48 b	52,0	6,5	122	168 b	11,0
CReSF	16,8	0,93	4,9 c	5,4	1,83	1,48 b	43,5	7,5	113	701 a	13,5
Sig. teste F	0,25	0,07	<0,01	0,76	0,10	<0,01	0,08	0,50	0,73	<0,01	0,11
	4 anos										
CReCF	21,2	1,08	4,4 a	6,0	2,85 a	1,34	43,5	6,6	126	219	8,1
SCoCF	21,4	1,05	5,0 a	4,5	2,81 a	1,29	34,4	5,8	124	189	6,9
SPACF	19,8	1,08	4,7 a	6,1	2,92 a	1,11	37,7	5,6	133	194	7,1
SReCF	19,0	1,19	4,4 a	5,0	2,78 a	1,21	42,8	6,9	123	187	6,8
CReSF	19,3	0,99	3,6 b	4,7	2,13 b	1,41	43,2	6,8	113	344	6,8
Sig. teste F	0,45	0,55	<0,01	0,09	<0,01	0,25	0,63	0,58	0,33	0,54	0,92
	6 anos										
CReCF	21,0	1,24	6,0	4,8	2,15 b	0,53	37,4	10,2	141	207 b	6,5
SCoCF	19,7	1,26	4,9	5,1	2,39 b	0,84	35,5	8,8	139	211 b	5,8
SPACF	20,1	1,07	4,6	4,9	3,00 a	0,87	33,7	8,0	128	229 b	6,1
SReCF	17,5	1,21	5,3	5,1	3,17 a	0,83	42,6	8,6	125	157 b	8,9
CReSF	19,7	1,33	5,6	5,2	2,12 b	0,85	43,8	9,7	141	602 a	5,7
Sig. teste F	0,18	0,80	0,12	0,40	<0,01	0,52	0,13	0,52	0,94	0,01	0,34
	8 anos										
CReCF	17,9	0,97 ab	5,3	5,0	1,78 a	0,83	47,9	7,3	85	223 ab	11,5
SCoCF	17,7	0,90 bc	5,4	3,9	1,60 b	0,86	36,5	6,5	79	126 c	7,9
SPACF	19,2	1,12 a	4,8	4,9	1,78 a	0,71	39,1	7,9	99	160 bc	8,7
SReCF	15,0	0,81 c	6,1	5,1	1,90 a	0,71	34,0	7,4	94	176 bc	11,0
CReSF	18,8	0,79 c	4,7	4,5	1,39 b	0,64	44,5	6,3	75	304 a	7,8
Sig. teste F	0,06	0,01	0,14	0,57	0,03	0,21	0,36	0,62	0,20	0,04	0,13

⁽¹⁾CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Figura 26 – Produção de biomassa e acúmulo de N, P, K, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea em diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais em função da idade. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização

Figura 27 – Acúmulo de S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos compartimentos da parte aérea em diferentes tratamentos com manejo de resíduos florestais em função da idade. CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização

4.4.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais

Expressivas diferenças nas concentrações de nutrientes foram observadas em função da idade do povoamento. No geral, com exceção do S, a concentração de macronutrientes na madeira diminuiu com a idade do povoamento (Tabela 15). Os micronutrientes Cu, Mn e Zn também tiveram suas concentrações reduzidas com o decorrer da idade. As concentrações de Fe aumentaram do segundo ao sexto ano de idade e, no oitavo ano se aproximaram das concentrações encontradas no segundo ano de idade. A concentração de B na madeira aumentou com o decorrer da idade.

Na casca as concentrações de N, K e S diminuíram com o decorrer da idade, e, as de P, aumentaram (Tabela 16). As concentrações de Ca e Mg tiveram aumento do quarto para o sexto ano, porém, no oitavo ano de idade, se igualaram às concentrações no segundo ano. Todos os micronutrientes tiveram suas concentrações reduzidas com o decorrer da idade, com exceção do Fe, que aumentou sua concentração do segundo para o oitavo ano de idade. As concentrações de nutrientes nas folhas e galhos variam entre os anos avaliados em todos os tratamentos (Tabelas 17 e 18). Nestes compartimentos estão contidas as maiores concentrações de N seguidos pela casca e madeira.

A menor produção de biomassa do tratamento SPASK resultou em menor acúmulo total de N, 222 kg ha⁻¹, enquanto que o tratamento que recebeu fertilização completa, SPACF, acumulou um total de 412 kg ha⁻¹ de N (Figura 28). O acúmulo de N no tratamento SPASK foi 47% inferior ao acumulado no tratamento SPACF. Os tratamentos SPACF, SPASN, SPASP e SPASCa tiveram comportamento semelhante quanto à distribuição do N acumulado nos compartimentos da parte aérea.

No segundo ano de idade, aproximadamente 71% do N acumulado na parte aérea foi encontrado na copa, 14% estavam contidos na madeira e 15% na casca (Figura 28). No quarto ano de idade, a contribuição da copa no acúmulo total de N reduziu-se para 39%, a madeira contribuiu com 44% e, a casca, com 17%. No oitavo ano de idade, o acúmulo de N na madeira representou 61% do total acumulado na parte aérea e a copa contribuiu com 24%. Os valores de N na casca se mantiveram constantes dos dois aos oito anos de idade, correspondendo aproximadamente à 16% do total de N acumulado na parte aérea. As diferenças entre as concentrações e os acúmulos de nutrientes nos compartimentos das árvores podem ser atribuídas à retranslocação destes nutrientes dos tecidos velhos para os novos (SWITZER; NELSON, 1972), de acordo com as atividades fisiológicas próprias de cada compartimento e tecido da planta ao longo de seu desenvolvimento.

Exceto para o tratamento SPASK, o acúmulo de P nos compartimentos foi proporcional ao acúmulo de biomassa, pois ocorreram poucas variações na concentração de P nos compartimentos aéreos em função da idade (Figura 28). Do total de P acumulado na parte aérea, aos dois anos de idade, 41% foram alocados na copa das árvores. A partir do quarto ano até o final da rotação de cultivo aproximadamente 78% do P estava estocado na madeira e, 12% do P, na copa. No tratamento SPASK, o acúmulo de P aos seis anos de idade foi maior na copa (65% do total de P acumulado), apesar da biomassa de folhas e galhos, nesta mesma idade, ter representado 20% da biomassa total dos compartimentos da parte aérea.

O acúmulo de K foi proporcional ao acúmulo de biomassa em cada tratamento (Figura 28). No tratamento SPACF, o conteúdo de K na copa reduziu-se de 52 kg ha^{-1} no segundo ano para 36 kg ha^{-1} no oitavo ano de idade. Na madeira, o conteúdo de K aumentou de 7 kg ha^{-1} no segundo ano para 40 kg ha^{-1} no oitavo ano de idade. Houve tendência de redução dos nutrientes alocados na copa e aumento dos nutrientes alocados no tronco com o aumento da idade. O tratamento SPASK, que teve menor acúmulo de biomassa em todos os compartimentos, apresentou também menor conteúdo de todos os macros e micronutrientes, em todas as idades avaliadas.

A estreita relação entre a produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes foi observada em vários trabalhos em plantações de eucalipto (BELLOTE et al., 1980; SILVA et al., 1983; PEREIRA et al., 1984; POGGIANI et al., 1984; POGGIANI, 1985; SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001). De modo geral, a omissão da aplicação de algum nutriente na fertilização mineral dos tratamentos conduziu à redução da produção de biomassa das árvores e/ou da concentração de nutrientes nos compartimentos da parte aérea. A omissão do K na fertilização mineral no tratamento SPASK contribuiu para a redução do acúmulo de nutrientes nos compartimentos da parte aérea.

Em relação ao Ca, aos dois anos de idade, houve baixo acúmulo deste nutriente na madeira, próximo a 8% do total acumulado nos compartimentos da parte aérea (Figura 28). A copa acumulou 59% do total do Ca acumulado na parte aérea. O acúmulo de Ca foi proporcional ao acúmulo de biomassa nos compartimentos, pois a concentração de Ca sofreu poucas alterações (Tabelas 15, 16, 17 e 18). Dos dois aos quatro anos de idade, ocorreu incremento de 70 kg ha^{-1} no conteúdo de Ca acumulado na casca. No final da rotação, 68% do Ca acumulado na parte aérea estava presente na casca e apenas 17% na madeira. O tratamento que não recebeu calagem, SPASCa, teve menores acúmulos totais de Ca em todas as idades avaliadas, quando comparado ao tratamento que recebeu fertilização completa e calagem SPACF. Ao final da rotação de cultivo, na idade de oito anos, o acúmulo total de Ca no

tratamento SPASCa foi 61% abaixo do acúmulo total de Ca no tratamento SPACF, o que representa 91 kg ha⁻¹ a menos de Ca acumulado nos compartimentos da parte aérea. Este resultado evidencia a importância da calagem para garantir os níveis adequados de Ca para as árvores.

O acúmulo de Mg em todos os tratamentos foi proporcional ao acúmulo de biomassa nos compartimentos da parte aérea (Figura 28). Na idade de dois anos, 71% do total do Mg acumulado estava presente na copa, 20% se acumulou na casca e 9% encontrava-se na madeira. Ao final da rotação de cultivo, aproximadamente, 57, 23 e 20% do Mg acumulado estava presente na casca, madeira e copa, respectivamente. Assim como para o Ca, menores quantidades de Mg foram acumuladas no tratamento SPASCa em relação ao tratamento SPACF. O tratamento que não recebeu calagem acumulou 16 kg ha⁻¹ a menos que o tratamento SPACF.

O acúmulo de S na parte aérea teve o mesmo comportamento do acúmulo de biomassa. Aos oito anos de idade, em todos os tratamentos, 85% do S estava acumulado na madeira (Figura 28).

Em relação aos micronutrientes B, Cu, Fe, e Zn, em todos os tratamentos, o acúmulo destes nutrientes seguiu o comportamento do acúmulo de biomassa. Quanto ao Mn, houve maior acúmulo na casca em relação aos demais compartimentos da parte aérea (Figura 29).

Aos oito anos, o N foi o macronutriente mais acumulado na parte aérea das árvores, seguido pelo Ca, K, S, P e Mg, respectivamente. Entre os micronutrientes, o Mn foi o que mais se acumulou na parte aérea, seguido pelo Fe, B, Cu e Zn. A ordem de acúmulo dos macros e micronutrientes foi a mesma em todos os tratamentos estudados. Segundo Gonçalves et al. (2000), povoamentos bem supridos nutricionalmente nos primeiros anos de crescimento, podem garantir maior quantidade de nutrientes na biomassa e, conseqüentemente, maior estoque disponível para os processos de ciclagem.

O conhecimento da alocação de nutrientes nos componentes das árvores permite ao silvicultor optar por técnicas de colheita que reduzam a exportação de nutrientes do sítio. A madeira foi o compartimento que mais imobilizou nutrientes ao final da rotação de cultivo. As quantidades exportadas foram bastante significativas, devendo ser repostas para assegurar a manutenção do potencial produtivo do sistema nas próximas rotações de cultivo.

Tabela 15 – Concentração de nutrientes na madeira aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com fertilização mineral

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
SPACF	2,4	0,65b	2,3	0,7	0,20	0,30	1,7	3,3b	9	61a	6,8
SPASN	2,4	1,43a	2,5	0,8	0,23	0,33	4,4	4,3a	21	54b	4,8
SPASP	2,6	0,56b	2,5	0,9	0,25	0,30	3,0	5,0a	115	64a	9,0
SPASK	2,5	0,85b	2,1	0,8	0,20	0,35	3,3	2,8b	33	31c	4,0
SPASCa	2,6	0,60b	2,5	0,7	0,24	0,33	2,7	2,5b	22	51b	9,5
Sig. teste F	0,77	0,04	0,22	0,36	0,09	0,51	0,18	0,01	0,34	0,03	0,49
	4 anos										
SPACF	1,2	0,12	0,4a	0,3	0,08	0,53	4,4	1,4	19ab	9	1,2
SPASN	1,3	0,22	0,5a	0,3	0,10	0,50	3,4	1,6	7c	12	1,7
SPASP	1,2	0,20	0,5a	0,3	0,11	0,52	4,1	1,5	22a	10	1,1
SPASK	1,5	0,11	0,3b	0,3	0,11	0,52	3,2	2,2	13b	9	1,0
SPASCa	1,3	0,14	0,5a	0,3	0,07	0,50	2,5	1,8	18b	12	1,5
Sig. teste F	0,69	0,42	0,02	1,00	0,30	0,44	0,75	0,37	<0,01	0,06	0,45
	6 anos										
SPACF	1,7	0,02	0,3	0,3	0,08a	0,22	2,2	1,1b	15	8	0,9
SPASN	1,6	0,05	0,2	0,3	0,10a	0,20	2,5	1,1b	19	9	1,0
SPASP	1,7	0,02	0,4	0,4	0,10a	0,22	5,0	3,4a	44	13	2,6
SPASK	1,9	0,06	0,2	0,4	0,10a	0,23	2,2	1,2b	42	10	2,0
SPASCa	1,5	0,09	0,3	0,2	0,05b	0,21	3,1	1,0b	41	14	2,1
Sig. teste F	0,09	0,78	0,62	0,09	0,02	0,42	0,51	0,03	0,20	0,08	0,07
	8 anos										
SPACF	1,5	0,31	0,2	0,2	0,08ab	0,36	5,1	1,7	8	7	1,2
SPASN	1,5	0,32	0,2	0,3	0,09a	0,35	5,2	1,2	9	8	0,9
SPASP	1,5	0,31	0,2	0,2	0,08b	0,36	5,2	1,2	9	8	0,9
SPASK	1,6	0,31	0,1	0,2	0,06b	0,35	6,4	3,6	13	7	1,8
SPASCa	1,6	0,30	0,1	0,1	0,04c	0,35	4,9	4,6	9	7	1,4
Sig. teste F	0,83	0,43	0,24	0,13	<0,01	0,74	0,97	0,35	0,64	0,06	0,47

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 16 – Concentração de nutrientes na casca aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com fertilização mineral

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
SPACF	9,1	0,34	4,0	8,8	1,58	0,84b	21,9	2,5b	35	628a	10,5a
SPASN	9,2	0,33	3,6	9,9	1,85	0,65c	17,4	2,5b	68	758a	6,0b
SPASP	9,7	0,41	4,2	9,6	2,16	0,84b	20,2	3,5a	51	543a	10,5a
SPASK	9,9	0,38	3,6	9,8	2,30	0,70c	21,9	3,5a	86	313b	7,0b
SPASCa	9,1	0,45	4,5	7,6	2,09	1,16a	19,6	3,0b	48	520a	9,0a
Sig. teste F	0,53	0,66	0,26	0,39	0,35	<0,01	0,12	0,05	0,28	0,03	0,05
	4 anos										
SPACF	3,4	0,37b	2,3	8,7	1,82ab	0,62a	11,7	2,8	49	147b	4,7
SPASN	3,5	0,83a	2,0	10,1	2,39ab	0,33b	10,3	2,6	51	248a	5,1
SPASP	3,5	0,80a	2,2	9,5	2,35ab	0,36b	12,2	2,9	42	221a	4,4
SPASK	3,7	0,67a	1,2	12,0	2,52a	0,36b	11,6	2,0	59	114b	6,1
SPASCa	3,6	0,85a	2,7	9,1	1,69b	0,35b	13,6	3,2	44	278a	4,2
Sig. teste F	0,86	<0,01	0,06	0,85	0,05	<0,01	0,64	0,60	0,60	<0,01	0,58
	6 anos										
SPACF	4,0	0,42b	2,4	10,9	1,98ab	0,16	16,1	4,3	73	116	3,6
SPASN	4,4	0,37b	2,2	8,6	2,22ab	0,18	12,8	3,6	52	149	3,8
SPASP	3,9	0,38b	2,7	9,2	2,69a	0,17	10,0	4,0	111	250	4,7
SPASK	4,3	0,45a	1,5	12,7	2,30ab	0,14	15,0	3,7	50	126	4,7
SPASCa	4,4	0,49a	2,8	10,1	1,23b	0,18	12,9	3,6	145	288	4,5
Sig. teste F	0,17	0,01	0,35	0,44	0,05	0,06	0,15	0,06	0,06	0,35	0,52
	8 anos										
SPACF	3,4	0,43	2,6	8,9	1,65b	0,34	17,3a	1,8a	146	111	4,8
SPASN	3,5	0,48	2,5	11,8	1,60b	0,28	10,8b	1,4b	54	116	5,7
SPASP	3,6	0,43	2,3	9,1	1,48b	0,29	12,4b	2,5ab	99	106	5,3
SPASK	3,4	0,34	1,1	10,3	1,43b	0,36	13,6b	2,6a	46	90	7,1
SPASCa	3,5	0,50	2,5	3,5	0,77a	0,21	11,4b	1,7ab	65	153	4,4
Sig. teste F	0,29	0,87	0,07	0,13	<0,01	0,83	0,03	<0,01	0,08	0,14	0,31

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 17 – Concentração de nutrientes nos galhos aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com fertilização mineral

Tratamento ⁽¹⁾	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
	2 anos										
SPACF	3,8	0,14	1,9b	4,8a	0,64a	1,24	11,2	7,0b	26a	111	5,0b
SPASN	4,8	0,11	1,8a	3,4b	0,64a	1,12	9,5	5,5ab	19b	153	5,5b
SPASP	3,9	0,13	2,2a	2,6b	0,71a	1,18	10,0	8,0a	9c	79	8,0b
SPASK	2,8	0,00	0,5b	4,3ab	0,90a	1,18	13,0	3,0c	38a	145	13,0a
SPASCa	4,6	0,28	2,0a	2,6b	0,23b	1,18	11,5	3,5bc	33a	168	5,5b
Sig. teste F	0,41	0,20	0,02	0,01	<0,01	0,56	0,48	<0,01	<0,01	0,15	0,01
	4 anos										
SPACF	2,9	0,34b	1,1	2,3	0,64	0,29	6,9	4,1c	24	159b	0,9b
SPASN	3,5	0,36b	1,1	2,6	0,78	0,32	7,1	7,2a	27	181ab	3,2a
SPASP	2,9	0,33b	0,9	2,1	0,84	0,29	5,2	5,5b	20	144b	1,5b
SPASK	3,7	0,28b	0,7	2,9	0,67	0,30	4,8	5,9b	23	91c	1,7b
SPASCa	4,0	0,47a	1,4	2,7	0,63	0,33	6,8	6,2b	33	217a	3,5a
Sig. teste F	0,26	0,02	0,11	0,64	0,21	0,47	0,73	<0,01	0,62	0,05	0,04
	6 anos										
SPACF	4,6	0,40	1,7	5,4a	1,34a	0,17	11,3a	7,7	31	251	3,0
SPASN	3,8	0,55	1,0	2,2c	0,85bc	0,13	4,4c	7,9	18	203	2,4
SPASP	3,7	0,57	2,2	2,0c	0,77bc	0,12	8,1b	8,0	39	174	2,7
SPASK	3,9	0,66	1,0	3,7b	1,11ab	0,13	8,5ab	9,3	26	199	3,2
SPASCa	4,1	0,59	1,2	2,5bc	0,48c	0,11	7,9b	8,6	23	363	4,6
Sig. teste F	0,09	0,79	0,49	0,02	0,02	0,46	0,02	0,55	0,76	0,07	0,80
	8 anos										
SPACF	4,5b	0,42	1,4	3,2	1,28	0,34	23,0c	7,0	31	146	3,2
SPASN	4,5b	0,30	1,5	4,2	1,34	0,39	34,8b	9,2	26	254	4,3
SPASP	4,3b	0,36	1,2	2,8	0,86	0,32	44,0a	6,2	22	190	4,1
SPASK	4,8a	0,30	0,5	2,3	0,67	0,30	26,2c	4,8	17	158	2,5
SPASCa	4,1b	0,35	1,3	1,9	0,59	0,35	35,1b	7,4	24	210	3,4
Sig. teste F	<0,01	0,50	0,53	0,26	0,34	0,33	<0,01	0,39	0,33	0,67	0,68

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Tabela 18– Concentração de nutrientes nas folhas aos dois, quatro, seis e oito anos de idade, nos tratamentos com fertilização mineral

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
2 anos											
SPACF	20,4	0,88	4,5 b	5,8	2,48	1,48 b	37,5	5,0	122	248 b	9,5
SPASN	19,2	1,01	5,6 a	5,4	2,37	1,60 ab	59,5	5,5	116	317 ab	11,5
SPASP	23,9	1,09	6,4 a	5,7	2,55	1,66 a	40,5	8,5	147	279 ab	13,0
SPASK	23,4	1,21	4,0 b	4,5	2,18	1,72 a	40,5	5,0	130	222 b	12,0
SPASCa	20,8	0,98	5,6 a	5,3	1,66	1,60 ab	48,0	5,5	136	374 a	9,5
Sig. teste F	0,25	0,07	<0,01	0,76	0,10	<0,01	0,08	0,50	0,73	<0,01	0,11
4 anos											
SPACF	19,8	1,08	4,7 a	6,1	2,92 ab	1,11	37,7	5,6	133	194	7,1
SPASN	19,1	0,98	3,9 b	4,2	2,47 b	1,33	35,7	6,4	116	163	7,2
SPASP	20,7	1,01	4,0 b	4,6	2,88 ab	1,44	40,8	6,9	117	159	6,8
SPASK	19,4	1,01	3,1 c	6,7	3,09 a	1,35	37,3	5,3	106	267	6,9
SPASCa	20,6	1,03	4,3 ab	4,8	1,87 c	1,33	39,8	6,3	113	259	6,4
Sig. teste F	0,45	0,55	<0,01	0,09	<0,01	0,25	0,63	0,58	0,33	0,54	0,92
6 anos											
SPACF	20,1	1,07	4,6	4,9	3,00 ab	0,87	33,7	8,0	128	229 ab	6,1
SPASN	18,5	1,23	4,0	5,1	3,00 ab	0,62	31,2	7,7	120	186 b	5,8
SPASP	20,1	1,22	5,2	4,3	2,68 b	0,66	33,7	7,7	135	176 b	6,6
SPASK	19,3	1,25	3,4	6,4	3,32 a	0,53	45,3	8,5	143	277 ab	6,1
SPASCa	18,8	1,23	4,0	4,8	2,01 c	0,84	34,8	9,0	134	398 a	5,9
Sig. teste F	0,18	0,80	0,12	0,40	<0,01	0,52	0,13	0,52	0,94	0,01	0,34
8 anos											
SPACF	19,2	1,12 a	4,8	4,9	1,78 a	0,71	39,1	7,9	99	160 b	8,7
SPASN	17,8	0,80 c	5,6	4,9	1,85 a	0,77	38,3	8,5	85	197 ab	8,7
SPASP	18,5	1,01 ab	6,3	4,2	1,73 ab	0,96	45,7	6,6	81	161 b	9,8
SPASK	16,2	0,89 bc	3,2	4,6	1,83 a	0,66	46,2	6,6	71	188 ab	8,3
SPASCa	15,5	0,80 c	5,4	3,7	1,45 b	0,77	38,6	6,7	68	214 a	8,4
Sig. teste F	0,06	0,01	0,14	0,57	0,03	0,21	0,36	0,62	0,20	0,04	0,13

⁽¹⁾SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem. Médias seguidas de letras iguais na coluna, para cada nutriente e idade, não diferem, estatisticamente, pelo teste LSD a 5% de probabilidade

Figura 28 – Produção de biomassa e acúmulo de N, P, K, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea em diferentes tratamentos com fertilização mineral em função da idade. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem

Figura 29 – Acúmulo de S, B, Cu, Fe, Mn e Zn nos compartimentos da parte aérea em diferentes tratamentos com fertilização mineral em função da idade. SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem

4.5 Balanço nutricional do povoamento florestal

4.5.1 Efeito do manejo dos resíduos florestais

A manutenção dos resíduos florestais (folhas, galhos, casca e serapilheira) sobre o solo e a exploração somente da madeira é visto como o sistema de colheita mais adequado do ponto de vista nutricional e de conservação do solo. O balanço nutricional do povoamento de *E. grandis* demonstra que a sustentabilidade da produção de madeira é diretamente dependente do manejo adotado. A copa e a casca representaram 16% e 27%, respectivamente, do total de nutrientes estocados na biomassa florestal. A serapilheira acumulou grande parte dos nutrientes no solo, 261 kg ha⁻¹, o que representou 23% do estoque total na biomassa florestal (Tabela 19). A madeira correspondeu a 35% do estoque total da biomassa florestal acumulando 407 kg ha⁻¹ de nutrientes.

Os tratamentos CReCF e CReSF foram os que menos exportaram biomassa (167 t ha⁻¹) e macronutrientes (467 kg ha⁻¹), na colheita (Tabela 19). O tratamento SReCF teve a maior exportação de biomassa (218 t ha⁻¹) e macronutrientes (1,7 t ha⁻¹), na colheita. Mesmo o tratamento mais conservacionista, em que todos os resíduos florestais permanecem no solo, não é sustentável do ponto de vista nutricional. Isto se deve à alta produtividade de madeira o que implica em elevada extração de nutrientes do sítio florestal. Este compartimento representa 76% da biomassa florestal e os mais altos estoques de nutrientes (576 kg ha⁻¹) estão contidos em sua massa.

O N e P foram os nutrientes que tiveram balanço nutricional negativo, em todos os tratamentos. Contudo, o saldo de nutrientes continuou positivo, o que garantiria adequado suprimento de N e P às árvores nas rotações de cultivo subsequentes (Tabela 19). O tratamento CReSF teve balanço nutricional negativo para o Ca e nulo para o Mg, porém o saldo destes nutrientes permaneceu positivo. A fertilização em níveis adequados durante a implantação do povoamento garantiu elevado estoque de todos os nutrientes no solo, o que contribuiu para que seus saldos finais fossem positivos.

Tabela 19 - Balanço de nutrientes na área do experimento para os tratamentos com manejo de resíduos florestais

Componente	Biomassa	N	P	K	Ca	Mg
	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				
Estoque de nutrientes antes da instalação do experimento						
Estoque no solo (0-200 cm) ⁽¹⁾		2710	30	113	485	227
Estoque na biomassa florestal						
Serapilheira	24	141	12	5	79	24
Madeira	167	250	52	32	60	13
Casca	18	62	8	47	163	30
Copa	9	100	7	26	36	14
Total	218	553	79	110	338	81
Total		3263	109	223	803	308
Saídas com a colheita						
CReCF	167	250	52	32	60	13
SCoCF	176	350	59	58	96	27
SPACF	194	412	67	105	259	57
SReCF	218	553	79	110	338	81
CReSF	167	250	52	32	60	13
Entradas						
Deposição atmosférica ⁽³⁾		31,5	-	31,5	51,0	12,6
Fertilização ⁽²⁾						
CReCF		130	44	125	480	120
SCoCF		130	44	125	480	120
SPACF		130	44	125	480	120
SReCF		130	44	125	480	120
CReSF		10	0	10	0	0
Balanço de nutrientes ⁽⁴⁾						
CReCF		-89	-8	125	471	120
SCoCF		-189	-15	99	435	106
SPACF		-251	-23	52	272	76
SReCF		-392	-35	47	193	52
CReSF		-209	-52	10	-9	0
Saldo de nutrientes ⁽⁵⁾						
CReCF		3175	101	348	1294	428
SCoCF		3075	94	322	1258	414
SPACF		3013	86	275	1095	384
SReCF		2872	74	270	1016	360
CReSF		3055	57	233	814	308

⁽¹⁾ Para determinar a contribuição do solo foram realizadas análises das concentrações disponíveis de P, K, Ca e Mg pelo método da resina e para o N foi considerando que 10% do N total é decomponível; ⁽²⁾ Na fertilização foram utilizados Sulfato de Amônio, Superfosfato Triplo, Cloreto de Potássio e Calcário, como fontes de N, P, K, Ca e Mg; ⁽³⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010b); ⁽⁴⁾ Foram consideradas como as estradas de nutrientes, a adubação e a deposição atmosférica menos as saídas por meio da colheita; ⁽⁵⁾ O saldo foi calculado por meio da soma do balanço com o estoque inicial de nutrientes; CReCF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CReSF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização

Os tratamentos com diferentes retiradas de resíduos florestais foram considerados como cenários de manejo florestal (Tabela 20). O cenário SCoCF e SPACF são adotados nos povoamentos florestais da região de estudo. Quando comparados ao cenário mais conservador, CReCF, ou ao mais exaustivo, SReCF, infere-se por meio do balanço nutricional

as diferenças entre práticas de manejo quanto ao número de rotações florestais potenciais que o sítio suporta, para garantir a produtividade de madeira.

Para o manejo florestal aplicado no tratamento CReCF, os estoques de N e P seriam suficientes para mais de dez rotações de cultivo e os estoques de K, Ca e Mg para indefinidas rotações de cultivo (Tabela 20). O balanço nutricional de um povoamento de *E. grandis* feito no trabalho de Rocha (2014) apresentou, para o manejo em que todos os resíduos foram mantidos no solo, estoques de N no solo e na biomassa florestal suficientes para mais sete rotações de cultivo. Para P, Ca e Mg, os estoques seriam suficientes para mais de dez rotações de cultivo.

No manejo florestal em que a copa foi retirada, tratamento SCoCF, o estoque de N seria suficiente para mais de dez rotações e, o de P, para mais seis rotações de cultivo (Tabela 20). Os demais nutrientes apresentaram número de rotações de cultivo indefinido para seu estoque. Para o manejo SPACF, os estoques de P seriam suficientes apenas para quatro rotações de cultivo e, o de N, para mais de dez. No manejo SReCF, os estoques de N garantiriam mais sete rotações de cultivo e o de P somente mais duas rotações. A retirada dos resíduos da rotação anterior comprometeu os estoques de N e P no solo neste tratamento.

Rocha (2014) relatou em um povoamento de *E. grandis*, para o manejo no qual a serapilheira foi removida, que os estoques de P, K e Ca seriam suficientes para mais três rotações de cultivo, o estoque de N para mais quatro e o de Mg para mais cinco rotações de cultivo. Neste manejo, ocorreram perdas de 15% no crescimento das árvores, devido à remoção da casca e da copa. O Ca e o P foram os nutrientes mais limitantes à produção.

O manejo CReSF teve as piores previsões quanto às futuras rotações de cultivo e o P é o nutriente que mais limitaria as próximas rotações de cultivo, sendo suficiente para apenas mais uma rotação de cultivo (Tabela 20). O N, Ca e Mg seriam suficientes para mais de dez rotações de cultivo. Neste tratamento, a fertilização mineral com P, Ca e Mg foi nula e, a de N e K, tiveram suas doses bastante reduzidas, o que refletiu nos estoques destes nutrientes no solo no momento da instalação do povoamento.

A remoção completa ou parcial dos resíduos florestais do solo afetaria principalmente os estoques de N e P, em médio e longo prazo. Para que a produção florestal seja mantida, mesmo com a remoção total ou parcial dos resíduos florestais, devem-se fazer investimentos em fertilizantes minerais, a fim de garantir a sustentabilidade da produção de madeira nas rotações de cultivo subsequentes.

Tabela 20 - Número potencial de rotações de cultivo, considerando os tratamentos com manejo de resíduos florestais como cenários de manejo florestal

Cenários	N	P	K	Ca	Mg
Rotação de cultivo de 7 anos					
CR _{re} CF	>10	>10	In	In	In
SCoCF	>10	6	In	In	In
SPACF	>10	4	In	In	In
SReCF	7	2	In	In	In
CR _{re} SF	>10	1	In	>10	>10

In: Indefinido; CR_{re}CF: com todos os resíduos florestais e com fertilização completa; SCoCF: sem copa e com fertilização completa; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SReCF: sem resíduos e com fertilização completa; CR_{re}SF: com todos os resíduos florestais e sem fertilização

4.5.2 Efeito da aplicação dos fertilizantes minerais

O balanço nutricional oferece uma perspectiva das práticas silviculturais adotadas, quanto à sustentabilidade da produtividade de madeira em longo prazo. Quando a finalidade do povoamento florestal é a produção de biomassa para a geração de energia nas indústrias, folhas, galho, cascas e, em alguns casos, a serapilheira podem ser levados junto com a madeira no momento da colheita.

Em todos os tratamentos, a parte aérea foi removida do sítio florestal juntamente com a madeira, portanto apresentam as mesmas quantidades de nutrientes exportadas pela colheita. Cerca de 15 % dos nutrientes da biomassa florestal estavam acumulados na copa (183 kg ha⁻¹) (Tabela 21). O N foi o nutriente mais exportado (414 kg ha⁻¹) em todos os tratamentos. Isto se deve à extração da copa e ao elevado acúmulo de N neste compartimento (cerca de 30% do N na biomassa florestal).

O balanço de nutrientes destes tratamentos mostrou a influência da fertilização mineral na sustentabilidade nutricional do povoamento. Em geral, o N e o P foram os nutrientes que tiveram balanço nutricional negativo, em todos os tratamentos, embora o saldo de nutrientes tenha continuado positivo, devido às entradas de nutrientes pela fertilização mineral garantindo as rotações subsequentes (Tabela 21).

O tratamento SPASN teve o menor saldo de N no solo (2,9 t ha⁻¹) pois a entrada de N com a fertilização nitrogenada neste tratamento foi inferior a dos demais tratamentos (Tabela 21). Os balanços nutricionais e os saldos do K, Ca e Mg foram positivos para os tratamentos SPACF, SPASN e SPASP.

O tratamento SPASK teve balanço nutricional negativo para o K, devido à baixa fertilização potássica na implantação do povoamento (Tabela 21). Mesmo assim, o saldo deste

nutriente foi positivo. A casca, do ciclo anterior, foi o compartimento que mais contribuiu para a manutenção dos estoques de K (47 kg ha^{-1}), o que representa 43% do K na biomassa florestal.

O tratamento SPASCa teve os balanços de Ca e Mg negativos, devido à falta de calagem. Os saldos de Ca e Mg foram positivos, mas 44% e 32%, respectivamente, abaixo dos saldos dos demais tratamentos.

Tabela 21 - Balanço de nutrientes na área do experimento para os tratamentos com fertilização mineral

Componente	Biomassa t ha^{-1}	N	P	K kg ha^{-1}	Ca	Mg
Estoque de nutrientes antes da instalação do experimento						
Estoque no solo (0-200cm) ⁽¹⁾		2710	30	113	485	227
Estoque na biomassa florestal						
Serapilheira	24	141	12	5	79	24
Madeira	167	250	52	32	60	13
Casca	18	62	8	47	163	30
Copa	9	100	7	26	36	14
Total	218	553	79	110	338	81
Total		3263	109	223	803	308
Saídas com a colheita						
Todos tratamentos	194	412	67	105	259	57
Entradas						
Deposição atmosférica ⁽³⁾		31,5	-	31,5	51,0	12,6
Fertilização ⁽²⁾						
SPACF		130	44	125	480	120
SPASN		10	44	125	480	120
SPASP		130	0	125	480	120
SPASK		130	44	10	480	120
SPASCa		130	44	125	0	0
Balanço de nutrientes ⁽⁴⁾						
SPACF		-251	-23	52	272	76
SPASN		-371	-23	52	272	76
SPASP		-251	-67	52	272	76
SPASK		-251	-23	-64	272	76
SPASCa		-251	-23	52	-208	-44
Saldo de nutrientes ⁽⁵⁾						
SPACF		3013	86	275	1095	384
SPASN		2893	86	275	1095	384
SPASP		3013	42	275	1095	384
SPASK		3013	86	160	1095	384
SPASCa		3013	86	275	615	264

⁽¹⁾ Para determinar a contribuição do solo foram realizadas análises das concentrações disponíveis de P, K, Ca e Mg pelo método da resina e para o N foi considerando que 10% do N total é decomponível; ⁽²⁾ Na fertilização foram utilizados Sulfato de Amônio, Superfosfato Triplo, Cloreto de Potássio e Calcário, como fontes de N, P, K, Ca e Mg; ⁽³⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010b); ⁽⁴⁾ Foram consideradas como as estradas de nutrientes, a adubação e a deposição atmosférica menos as saídas por meio da colheita; ⁽⁵⁾ O saldo foi calculado por meio da soma do balanço com o estoque inicial de nutriente; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem

No manejo do cenário SPACF, o estoque de N garantiria mais do que dez rotações de cultivo. O estoque de P seria suficiente para mais quatro rotações e, o de K, Ca e Mg para mais indefinidas rotações de cultivo (Tabela 22). No cenário SPASN, o estoque de N limitou o número potencial de rotações de cultivo para oito. Este número cairia para quatro rotações de cultivo se fosse considerado o estoque de P. O P foi o nutriente mais limitante no cenário SPASP e apenas mais uma rotação de cultivo seria possível.

No cenário SPASK, o estoque de N seria suficiente para mais de dez rotações de cultivo, o estoque de P, para mais quatro, e, o de K, para mais três rotações de cultivo. O cenário SPASCa teve maiores limitações no estoque de P, sendo suficiente para mais quatro rotações de cultivo. O estoque de Ca seria suficiente para mais três rotações de cultivo, e, o de Mg, para mais seis rotações.

Tabela 22 – Número potencial de rotações de cultivo, considerando os tratamentos com fertilização mineral como cenários de manejo florestal

Cenários	N	P	K	Ca	Mg
Rotação de cultivo de 7 anos					
SPACF	>10	4	In	In	In
SPASN	8	4	In	In	In
SPASP	>10	1	In	In	In
SPASK	>10	4	3	In	In
SPASCa	>10	4	In	3	6

In: Indefinido; SPACF: sem parte aérea e com fertilização completa; SPASN: sem parte aérea e sem fertilização com N; SPASP: sem parte aérea e sem fertilização com P; SPASK: sem parte aérea e sem fertilização com K; SPASCa: sem parte aérea e sem calagem

É evidente o impacto da omissão de algum nutriente na fertilização mineral no número potencial de rotações de cultivo. Embora os resíduos florestais exerçam papéis fundamentais na qualidade química do solo, a inadequada fertilização do solo pode diminuir expressivamente o potencial produtivo do sítio florestal.

5 CONCLUSÕES

A hipótese I, “A manutenção dos resíduos florestais eleva a disponibilidade de nutrientes no solo”, não foi corroborada. O manejo de resíduos florestais não influenciou a fertilidade do solo após a aplicação dos tratamentos.

A hipótese II, “A remoção total ou parcial dos resíduos florestais reduzem a produtividade de madeira”, não foi corroborada. Os níveis de nutrientes no solo estavam adequados, devido à aplicação de fertilizantes minerais no momento da instalação do experimento e foram suficientes para suprir a demanda das árvores.

A hipótese III, “O P e K são os nutrientes mais limitantes da produtividade de madeira”, foi parcialmente corroborada. A omissão de P na fertilização não afetou a produtividade de madeira na rotação de cultivo avaliada, porém este foi o nutriente mais limitante quanto ao número potencial de rotações. A omissão de K na fertilização reduziu em 50% a produtividade de madeira.

A hipótese IV, “A remoção total ou parcial dos resíduos florestais e ou a omissão de nutrientes via fertilização mineral reduzem a taxa de ciclagem biogeoquímica de nutrientes em um povoamento de *E. grandis*”, foi parcialmente corroborada. A remoção total ou parcial dos resíduos florestais não influenciou na ciclagem biogeoquímica de nutrientes. A omissão de K via fertilização reduziu em 60% a deposição anual deste nutriente o que afetou sua a ciclagem biogeoquímica.

Estes resultados evidenciam a importância da manutenção dos resíduos florestais no solo e sua contribuição na redução da exportação de nutrientes do sítio florestal devido à operação de colheita. O conhecimento da alocação de nutrientes nos componentes das árvores permite ao silvicultor optar por técnicas de colheita que reduzam a exportação de nutrientes do sítio. Embora os resíduos florestais exerçam funções fundamentais na qualidade química do solo e nutrição mineral das árvores, a inadequada fertilização do solo pode diminuir expressivamente o potencial produtivo do sítio florestal.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 259, p. 1786-1795, 2010.
- ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. Nutrient cycling in forests. **New Phytology**, Lancaster. v. 124, p. 561-582, 1993.
- BALIEIRO, F.C.; FRANCO, A.A.; PEREIRA, M.G.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M.; ALVES, B.J.R. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo, em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 597-601, jun. 2004.
- BARICHELO, L.R. **Quantificação da biomassa e dos nutrientes em floresta de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil**. 2003. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- BARROS FILHO, N.F. **Produção e partição de biomassa e de nutrientes e recomendação de fertilizantes para o *Pinus taeda* L. (NUTRIPINUS)**. 2003. 56 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- BARROS, N.F. de; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 487-592.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba, IPEF, 2005. p. 269-286.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa. 1990. p. 127-186.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; LEAL, P.G.L. Fertilizing eucalypt plantations on the Brazilian savannah soils. **South African Forestry Journal**, Pietermaritzburg, v. 160, p. 7-12, 1992.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. 330p.
- BELLOTE, A.F.J. **Concentração, acumulação e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) em função da idade**. 1979. 129p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1979.
- BELLOTE, A.F.J.; SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill, ex-Maiden em função da idade: 1 - Macronutrientes. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 1-23, 1980.

BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soil. **Forestry Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, n. 1/2, p. 13-22, 2000.

BIZON, J.M.C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes.** 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CALDEIRA, M.V.W.; VITORINO, M.D.; SCHAADT, S.S.; MORAES, E.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma floresta ombrófila densa. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 53-68, 2008.

CARPANEZZI, A. A. **Deposição de material orgânico e nutrientes em uma floresta natural e em uma plantação de *Eucalyptus* no interior do Estado de São Paulo.** 1980. 107 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1980.

CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; PEPPER, D.A.; MENDHAM, D.S.; GROVE, T.S.; O'CONNELL, A.M.; Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 217, p. 1–18, 2005.

COSTA, G.S.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CUNHA, G.M. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no Norte Fluminense. **Revista Árvore**, n. 29, p. 563-570, 2005.

CUNHA, G.C.; GRENDENE, L.A.; DURLO, M.A.; BRESSAN, D.A. Nutrient cycling in a seasonal deciduous forest with special respect to the mineral content produced by the litter fall. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 36-64, 1993.

CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no norte fluminense. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 353-363, maio/jun. 2005.

DELEPORTE, P.; LACLAU, J.P.; NZILA, J.D.; KAZOTTI, J.G.; MARIEN, J.N.; BOUILLET, J.P.; SZWARC, M.; D'ANNUNZIO, R.; RANGER, J. Effects of slash and litter management practices on soil chemical properties and growth of second rotation Eucalypts in the Congo. In: NAMBIAR, E.K.S. **Site management and productivity in tropical plantation forests.**, Bogor: Center for International Forestry Research, 2008. p. 5-22.

Du TOIT, B.; DOVEY, S.B.; SMITH, C.W. Effects of slash and site management treatments on soil properties, nutrition and growth of a *Eucalyptus grandis* plantation in South Africa In.: NAMBIAR, E.K.S. **Site management and productivity in tropical plantation forests.** Bogor: Center for International Forestry Research, 2008. p. 63-78.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3.ed. Brasília:EMBRAPA, 2013. 353p.

FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta a adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 577-584, 2002.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. New York: Wiley, 2000. 489 p.

GAMA-RODRIGUES, A.C. **Ciclagem de nutrientes por espécies florestais em povoamentos puros e mistos em solos de tabuleiro da Bahia, Brasil**. 1997. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 193-207, 2002.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. & SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 29, p. 393-901, 2005.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 84-94, 1997.

GAVA, J.L.; GONÇALVES, J.L.M.; SHIBATA, F.Y.; CORRADINI, L. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 497-504, 1997.

GOODMAN, B.A. The characterization of iron complexes with soil organic matter. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, A.; SCHWERTMANN, U., ed. **Iron in soils and clay minerals**. Bad Windsheim, NATO Advanced Study Institute, 1985. p.842-51.

GONÇALVES, J.L.M. Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba. **Anais...** Piracicaba: CNPFloresta; IPEF; UNESP; SIF; FUPEF, 1995. p. 43-60.

_____. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Org.). **Conservação de solos**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 1-46.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações de florestas**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 131-204.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexo do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 1, p. 1-58.

- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.
- GONÇALVES, J.L.M.; POGGIANI, F.; STAPE, J.L.; SERRANO, M.I.P.; MELLO, S.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; BENTIVINHA, S.R.P.; OLIVEIRA, L.E.G. **Efeito de práticas de cultivo mínimo e intensivo do solo sobre a ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo, configuração do sistema radicular e nutrição mineral de povoamentos de *Eucalyptus grandis***. Piracicaba: ESALQ, 1997. 83 p.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6-27, Aug. 2013.
- HOPMANS, P.; STEWART, H.T.L.; FLINN, D.W. Impacts of harvesting on nutrients in an eucalypt ecosystem in Southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 29-51, 1993.
- JONES, H.E.; MADEIRA, M.; HERRAEZ, L.; DIGHTON, J.; FABIAO, A.; GONCALEZ-RIO, F.; FERNANDEZ, MARCOS, M.; GOMEZ, C.; TOME, M.; FIETH, H.; MAGALHAES, M.C.; HOWSON, G. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.122, p.73–86, 1999.
- KOEHLER, W.C. **Variação estacional de deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa-PR**. 1989. 138 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 1989.
- KUMARASWAMY, S.; MENDHAM, D.S.; GROVE, T.S. Harvest residue effects on soil organic matter, nutrients and microbial biomass in eucalypt plantations in Kerala, India. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 328, p. 140-149, 2014.
- LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 181–189, 2000.
- LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; SAINT-ANDRÉ, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; MOREIRA, R.M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf life span and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 29, p. 111–124, 2009.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1771-1785, 2010.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

LEAL, P.G.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Produção de biomassa e absorção de nutrientes em *Eucalyptus grandis* influenciados pela aplicação de fosfato natural em solos de cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 165-182, 1988.

MADEIRA, M.; PEREIRA, J.S. Productivity, nutrient immobilization and soil chemical properties in an *Eucalyptus globulus* plantation under different water and nutrient regimes. **Water, Air, Soil and Pollution**, Amsterdam, v. 54, p. 621-624, 1990.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, A.S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London Academic, 1995. 889 p.

MATHERS, N.J.; MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; XU, Z.; SAFFIGNA, P.G. How does residue management impact soil organic matter composition and quality under *Eucalyptus globulus* plantations in southwestern Australia? **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, p. 253-267, 2003.

MELLO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 101-111, 2008.

MELO, V.F.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 165-171, maio/ago. 1995.

MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; RANCE, S.J. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 181, n. 3, p. 357-372, Aug. 2003.

MENDHAM, D.S.; SANKARAN, K.V.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; Eucalyptus globules harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantations establishment. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 34, p. 1903-1912, 2002.

MILLER, H.G. Nutrient cycles in forest plantations, their change with age and the consequence for fertilizer practice. In: AUSTRALIAN FOREST NUTRITION WORKSHOP: PRODUCTIVITY IN PERPETUITY, 1981, Canberra. **Proceedings...** Canberra: CSIRO, 1981. p. 187-199.

MIRANDA, G.A.; BARROS, N.F. de; LEITE, H.G.; COUTO, L.; MOACIR, N.F. Produtividade de povoamento de eucalipto em regime de talhadia, em função da adubação parcelada, no Vale do Jequitinhonha, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, p. 51-60, 1998.

NAMBIAR, E.K.S. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantation forests**. Jakarta: Centre for International Forestry Research, 2008. 236 p.

NAMBIAR, E.K.S.; KALLIO, M.H. Increasing and sustaining productivity in subtropical and tropical plantation forests: making a difference through research partnership. In: NAMBIAR, E.K.S. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantation forests**. Bogor: Centre for International Forestry Research, 2008. p. 133-157.

NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; COUTO, C. Níveis críticos de fósforo no solo para o eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, p. 29-37, 1982.

O'CONNELL, A.M.; MENDHAM, D.S. Impact of N and P fertilizer application on nutrient cycling in jarrah (*Eucalyptus marginata*) forests of south western Australia. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 40, n. 2, p. 136-143, July 2004.

O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; MENDHAM, D.; RANCE, S.J. Effects of site management in eucalypt plantations in southwestern Australia. In: NAMBIAR, E.K.S.; TIARKS, A.; COSSALTER, C.; RANGER, J. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantation forests: a progress report**. Bogor: Center for International Forestry Research, 2000. p. 61-71.

O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; MENDHAM, D.S.; CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.F.; SHAMMAS, K.; RANCE, S.J. Impact of inter-rotation site management on nutrient stores and flux rates and tree growth of eucalypt plantations in south-western Australia. In: NAMBIAR, E.K.S.; TIARKS, A.; RANGER, J. AND TOMA, T. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantation forests: impact on soils and options for management over successive rotations**. Bogor: CIFOR, 2004. p. 56-74.

OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers in ecological systems. **Ecology**, Durham, v. 44, n. 2, p. 322-331, 1963.

PEREIRA, A.R.; ANDRADE, D.C.; LEAL, P.G.L.; TEIXEIRA, N.C.S. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna* na região de cerrado de Minas Gerais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 15, p. 8-16, 1984.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus***: implicações silviculturais. 1985. 210 p. (Tese de Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF. 2005. p. 287-308.

POGGIANI, F., STAPE, J.L., GONÇALVES, J.L.M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. **Série Técnica IPEF**, v.12, n.31, p.33-44, 1998.

POGGIANI, F.; ZEN, S.; MENDES, F.S.; SPINA-FRANÇA, F.; Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos. **IPEF**, Piracicaba, n. 27, p. 17-30, ago.1984.

PRITCHETT, W.L. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1979. 500 p.

PULITO, A.P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. 2009. 59 p. (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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

REIS, M.G.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em plantios de Eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: UFV, 1990. p. 265-301.

REIS, G.G.; REIS, M.G. Reflexo do cultivo mínimo no ambiente e na fisiologia da árvore. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba. **Anais...** Piracicaba: CNPFloresta; IPEF; UNESP; SIF; FUEF, 1995. p. 148-162.

ROCHA, J.H.T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. 2014. 123 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SANKARAN, K.V.; GROVE, T.S.; KUMARASWAMY, S.; MANJU, V.S.; MENDHAM, D.S.; O’CONNELL, A.M. Export of nutrients in plant biomass following harvest of eucalypt plantations in Kerala, India. **Journal of Sustainable Forestry**, London, v. 2, p. 15-36. 2005.

SANKARAN, K.V.; MENDHAM, D.S.; CHACKO, K.C.; PANDALAI, R.C.; PILLAI, P.K.C.; GROVE, T.S.; O’CONNELL, A.M. Impact of site management practices on growth of eucalypt plantations in the Monsoonal Tropics in Kerala, India. In: NAMBIAR, E.K.S. **Site management and productivity in tropical plantation forests**. Bogor: Center for International Forestry Research, 2008. p. 23-38.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.D.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, p. 719-734, July/Dec. 1933.

SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SCHUMACHER, M.V.; POGGIANI, F.; SIMÕES, J.W. Transferência de nutrientes das copas para o solo através da deposição de folheto em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus torelliana* plantados em Anhembi, SP. **IPEF**, Piracicaba, n. 47, p. 56-61, 1994.

SCHUMACHER, M.V.; VIEIRA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 471-480, out./dez. 2008.

SCOLFORO, J.R.S. **Mensuração florestal 3: relações quantitativas em volume, peso e a relação hipsométrica**. Lavras: ESAL, FAEPE, 1993. 292 p.

SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, C.R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras:UFLA, FAEPE, 2004. 285 p.

SHAMMAS, K.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; MCMURTRIE, R.; DAMON, P.; RANCE, S.J. Contribution of decomposing harvest residues to nutrient cycling in a second rotation *Eucalyptus globulus* plantation in south-western Australia. **Biology and Fertility of Soils**, Amsterdam, v. 38, p. 228-235, 2003.

SILVA, C.D.; GONÇALVES, J.L.M.; FOLEGATTI, B.D.S.; STAPE, J.L.; GAVA, J.L. Infestação de plantas invasoras em povoamentos de eucalipto estabelecidos nos sistemas de cultivo mínimo e intensivo do solo. In. IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, 3., 1997, Salvador. **Proceedings...** Salvador: EMBRAPA, 1997. p. 234-241.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 84 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SILVA, H.D. da. **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill (ex-Maiden) em diferentes idades**. 1996. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

SILVA, H.D.; POGGIANI, F.; COELHO, L.C. Biomassa, concentração e conteúdo de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos de baixa fertilidade. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v. 6, p. 9-25, 1983.

SILVA, I.R. & MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.275-374.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M.R.A. Seja doutor do seu eucalipto. **Informações agronômicas**, Piracicaba, n.93, p.1-31, 2001.

SMITH, J.E.; HEATH, L.S. **A model of forest floor carbon mass for United States forest types**. Newtown Square: USDA, Forest Service, 2002. 37 p. (Research Paper, NE-722).

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; GÖRGENS, E.B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, 2005.

SOUZA, J.A.; DAVIDE, A.C. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 101-113, 2001.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantation in Northeastern Brazil**. 2002. 225 p. Thesis (PhD in Forest Science) – Colorado University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M. T. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2014, Campinas. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; ALTER, G.; SILVA, G.C.; AZEVEDOM, M.R. The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 259, p. 1684–1694, 2010.

SWITZER, G.L.; NELSON, L.E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda*) plantation ecosystems: the first years. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 36, p. 143-147, 1972.

TEIXEIRA, P.C.; LEAL, P.G.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Nutrición potásica y relaciones em plantas de Eucalyptus spp. **Bosque**, Valdivia. v. 16, n.2, p. 61-68, 1995.

TIESSSEN, H.; CUEVAS, E.; CHACON, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, London, v. 371, p.783–785, 1994.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 8, n. 1, p. 1-104, 1955.

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 195-276.

VALERI, S.V.; CORRADINI, L.; AGUIAR, I.B. Efeitos de níveis de NPK e calcário dolomítico na produção volumétrica de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Científica**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 63-70, 1991.

VERSINI, A.; MARESCHAL, L.; MATSOUMBOU, T.; ZELLER, B.; RANGER, J.; LACLAU, J.-P. Effects of litter manipulation in a tropical Eucalyptus plantation on leaching of mineral nutrients, dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, n. 6, p. 232-234, 2014.

VITAL, A.R.T.; LIMA, W.P.; CAMARGO, F.R.A. Efeitos do corte raso de uma plantação de Eucalyptus sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 55, p. 5-16, 1999.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 80 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

XU, D.P.; YANG, Z.J.; ZHANG, N.N. Effects of site management on tree growth, Aboveground biomass production and nutrient accumulation of a second-rotation plantation of *Eucalyptus urophylla* in Guangdong Province, China. In: NAMBIAR, E.K.S. **Site management and productivity in tropical plantation forests**. Bogor: Center for International Forestry Research, 2008. p. 23-38.

ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 843-852, 2004.

ZEN, S; YONEZAWA, J.T.; FELDEBERG, J.E. Implantação de florestas no sistema de cultivo mínimo. . In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba. **Anais...** Piracicaba: CNPFloresta; IPEF; UNESP; SIF; FUPEF, 1995. p. 65-72.

ZIMMERMANN, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa \ Arroz e Feijão, 2004. 402 p.