

REYNALDO CAMPOS SANTANA

**PREDIÇÃO DE BIOMASSA E ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES EM
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO NO BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2000

***À Bethe,
pela sua participação constante,
pelo amor, pelo carinho e pela confiança que nos une,
pelas alegrias e pelos sacrifícios compartilhados e
pelo estímulo e apoio em todos os momentos.***

***Aos meus pais, a quem devo
tudo que venho conquistando na vida.***

AGRADECIMENTO

À Bethe, às nossas famílias e aos nossos amigos, pelo carinho, pelo incentivo, pelo apoio e pela amizade em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, pela disponibilização do banco de dados utilizado neste trabalho.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos e pela realização do Doutorado *Sandwich*, por meio do Programa de Doutorado no País com Estágio no Exterior (PDEE).

À Universidade da Flórida (UFL), em particular ao Departamento de Ciência do Solo e da Água, por possibilitar a realização do Doutorado *Sandwich*.

Aos meus orientadores, professor Nairam F. de Barros (UFV) e professor Nicholas B. Comerford (UFL), pela orientação, pelos questionamentos, pelas críticas e pelas sugestões, fundamentais para a realização deste trabalho, e principalmente pela amizade.

Aos professores Helio G. Leite e Roberto F. de Novais, pela preciosa colaboração, pelos conselhos, pelo apoio e pelas críticas e sugestões.

Ao professor Paulo Roberto P. Gomes e ao Dr. Luiz Marcelo A. Sans, pelas críticas e sugestões.

À equipe do “Nick”, Mary McLeod, Criz, Isabel e Dilma; ao meu *roommate*, Tony; e à Maura, ao Nairam Filho, ao Nairo e à Márcia, que compartilharam o dia-a-dia com muitas alegrias, amizade e carinho na minha estada na Flórida.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Solos (UFV), aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo e da Água (UFL) e aos amigos de Curso, pelo convívio e pela amizade.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

REYNALDO CAMPOS SANTANA, filho de Adelaide Campos Santana e José Pinto Santana, nasceu em 17 de maio de 1964, em Porto Firme, Minas Gerais.

Em março de 1990, graduou-se em Engenharia Florestal, e em maio de 1993, obteve o título de *Magister Scientiae* em Solos e Nutrição de Plantas, ambos os Cursos realizados na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Entre julho de 1991 e novembro de 1992, trabalhou na Comercial e Agrícola Paineiras Ltda., empresa da Cia Suzano de Papel e Celulose.

Entre junho de 1993 e novembro de 1995, trabalhou na Duraflora S.A., empresa da Duratex S.A.

Em outubro de 1996, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa.

No período de março de 1999 a março de 2000, realizou treinamento, como Doutorado *Sandwich*, no Departamento de Ciência do Solo e da Água da Universidade da Flórida, E.U.A.

Em novembro de 2000, defendeu a tese de Doutorado.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
2.1. Produção de biomassa e amostragem do material vegetal.....	6
2.2. Modelo de produção de biomassa da parte aérea e do tronco...	7
2.3. Alocação relativa de biomassa da copa e do tronco.....	11
2.4. Análises químicas do material vegetal.....	11
2.5. Modelo para conteúdo de N, P, K, Ca e Mg no tronco, no lenho e na biomassa da parte aérea.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. Estimativa da biomassa da parte aérea e do tronco.....	13
3.2. Concentração de nutrientes nos diferentes componentes da árvore.....	25
3.3. Conteúdo de nutrientes nos diferentes componentes da árvore.....	32
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
APÊNDICES.....	55

RESUMO

SANTANA, Reynaldo Campos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2000. **Predição de biomassa e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil.** Orientador: Nairam Félix de Barros. Conselheiros: Helio Garcia Leite e Roberto Ferreira de Novais.

Este trabalho teve por objetivos modelar, para diferentes regiões do Brasil, a produção e o conteúdo de nutrientes na biomassa de eucalipto, avaliar o efeito de algumas características climáticas em tais predições e avaliar o impacto da intensidade de colheita na exportação de N, P, K, Ca e Mg. Utilizou-se o banco de dados do Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, o qual reúne, desde 1980, informações sobre biomassa e nutrientes em plantações de eucalipto em várias condições edáficas e climáticas do Brasil. Utilizaram-se dados coletados em 20 regiões, nos Estados do Pará, Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul, os quais foram analisados como um grande experimento. Foram desenvolvidos dois modelos, um para produção de biomassa e outro para o conteúdo e a alocação de nutrientes. O uso de características climáticas nos modelos foi importante para diferenciar a produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes entre regiões. Houve variação na produção de biomassa entre regiões, sendo a maior produtividade três vezes superior à menor. A produção de biomassa e o conteúdo de

nutrientes foram positivamente relacionados entre si e menores nas regiões com menos disponibilidade de água. A concentração de todos os nutrientes foi maior na folha e menor no lenho, exceto para a concentração de Ca, que foi maior na casca. Em média, do total de nutrientes da biomassa da parte aérea em um ciclo de corte de 6,5 anos, 68% do N, 69% do P, 67% do K, 63% do Ca e 68% do Mg foram acumulados até a idade de 4,5 anos, para as diferentes regiões. Tal fato pode evidenciar um menor potencial de resposta à aplicação de fertilizantes em plantios com idades superiores a 4,5 anos. Em média, a alocação de N, P, K, Ca e Mg na copa foi de 50, 44, 36, 27 e 39%, respectivamente, em relação à quantidade total da biomassa aérea, entre 6,5 e 8,5 anos de idade. Para obter uma expressiva redução na exportação desses nutrientes, além de deixar a copa no campo, é necessário descascar o tronco, deixando a casca na área. Assim, adotando-se a colheita apenas do lenho, a proporção de nutrientes não-exportados será de 65, 70, 64, 79 e 79%, para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, o que evidencia a importância do descascamento no campo, para se ter maior sustentabilidade da produção.

ABSTRACT

SANTANA, Reynaldo Campos, D.S. Federal University of Viçosa, November 2000. **Biomass estimation and nutrient allocation in Brazilian eucalypt plantations.** Adviser: Nairam Félix de Barros. Committee members: Helio Garcia Leite and Roberto Ferreira de Novais.

The objective of this work was to model growth and nutrient content in the aboveground biomass of eucalypt plantations in Brazil. It was intended to evaluate the influence of key climatic variables on eucalypt productivity, and the impact of harvesting on the removal of N, P, K, Ca, and Mg. The database employed was obtained from the Soil and Eucalypt Nutrition Program of the Soil Department of the Federal University of Viçosa, MG, Brazil. During the past 19 years, this program has established a database on eucalypt growth, nutrient accumulation in the biomass, and nutrient partitioning among aboveground components when grown under varying climatic, topographic and soil conditions. The data were collected in 20 regions spanning in the states of Espírito Santo, Minas Gerais, Pará, Rio Grande do Sul, and São Paulo. Two models were developed. The first simulated, biomass production while the second dealt with biomass nutrient content. Climatic characteristics were an important component of both models. There was a close relationship between the accumulation of biomass and nutrient content. The region with the highest productivity produced three times more aboveground biomass than the poorest

region. Regions with low water availability exhibited the lowest nutrient accumulation in aboveground biomass as well as the lowest biomass production. Nutrient concentrations were highest in the leaves and lowest in the stemwood, except for Ca, which exhibited its highest concentration in the stembark. The largest proportion (68% of N, 69% of P, 67% of K, 63% of Ca, and 68% of Mg) of all nutrients was accumulated in the biomass within 4.5 years following planting. Rotation is generally considered to be approximately 6.5 years. Beyond 4.5 years of age, the probability of a response to fertilizer application is low. From an ecological point of view, it is important to reduce nutrient removal during harvesting. Assuming a rotation age of between 6.5 and 8.5 years, the canopy contains 50% of the N, 44% of the P, 36% of the K, 27% of the Ca, and 39% of the Mg in the aboveground biomass. However, the canopy and stembark combined account 65% of the N, 70% of the P, 64% of the K, 79% of the Ca, and 79% of the Mg in the aboveground biomass. Therefore, debarking in the field can substantially reduce nutrient exportation and lead to, more sustainable production or less fertilizer use in Brazilian eucalypt plantations.

1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas atingem, em nível mundial, aproximadamente 150 milhões de hectares, e nas regiões tropical e temperada a área plantada está em plena expansão, sendo cada vez maior sua utilização em relação às florestas nativas (EVANS, 1999). A área com plantações de eucalipto no mundo está crescendo rapidamente, devendo exceder a 10 milhões de hectares no final de 2000 (ELDRIDGE et al., 1994). O Brasil possui 5 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo três milhões de hectares de eucalipto (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS, 2000), o que coloca o país em lugar de destaque entre os que cultivam esta essência florestal. Em relação às principais culturas plantadas no Brasil, a área cultivada com eucalipto é superior à com laranja (10^6 ha), mandioca ($1,6 \cdot 10^6$ ha) e café ($2,1 \cdot 10^6$ ha), e equivale à área plantada com arroz. A cana-de-açúcar ($5 \cdot 10^6$ ha), o feijão ($5 \cdot 10^6$ ha), o milho ($11 \cdot 10^6$ ha) e a soja ($13 \cdot 10^6$ ha) possuem áreas plantadas superiores à da eucaliptocultura no país (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 1998).

No Brasil, os Estados da Bahia, Paraná, Espírito Santo, Minas Gerais, Pará, Rio Grande do Sul e São Paulo são responsáveis por 86% da produção de eucalipto (IBGE, 1998). Essa dispersão geográfica das plantações implica o efeito de diferentes condições fisiográficas, edáficas e climáticas no crescimento do eucalipto (MOREIRA, 1997). Em decorrência de tal fato,

a produtividade das plantações de eucalipto no país varia de 15 a 107 m³ ha⁻¹ ano⁻¹.

A produção de uma floresta é alterada pela quantidade de radiação solar interceptada pela copa e pela eficiência de conversão da radiação em biomassa (MCMURTRIE et al., 1994). Essa eficiência é influenciada, principalmente, pela disponibilidade de água e de nutrientes. O aumento do fornecimento destes fatores tende a aumentar a produção (MARSCHNER, 1997), que é bastante influenciada pelas interações dos mesmos até que se atinja um nível ótimo.

Os fatores de crescimento podem tornar-se limitantes para as plantas por horas, dias, semanas ou, até mesmo, meses. A luz e o CO₂ tendem a ser mais constantes e menos limitantes ao crescimento de plantas nos trópicos. Por outro lado, a água e os nutrientes são os principais fatores que influenciam a produção, interferindo de forma prioritária na maioria dos ecossistemas florestais, e em condições desfavoráveis são responsáveis por produções aquém do potencial máximo (LINDER et al., 1996). Em condições de campo, as plantas são freqüentemente submetidas a períodos de estresse (TAIZ e ZEIGER, 1998), o que destaca a importância da adoção de técnicas silviculturais para otimizar o uso da água, dos nutrientes ou de ambos.

A interação entre água e nutrientes tem sido a maior evidência dos fatores que influenciam a produção de biomassa, como observado em experimentos de longa duração com *Pinus radiata*, na Austrália (RAISON et al., 1992), e com *E. globulus*, em Portugal (PEREIRA et al., 1994). Respostas positivas à adição de nutrientes e, ou, às suas interações com a água também têm sido relatadas para plantios de eucalipto no Brasil (BARROS e NOVAIS, 1990, 1996). Outros fatores, como características climáticas e características físicas e químicas dos solos, também influenciam a produção de biomassa (BARROS e NOVAIS, 1996). Deste modo, as interações entre os fatores de produção e as características genéticas irão definir o padrão de crescimento de uma cultura.

A sustentabilidade da produção de um ecossistema florestal é determinada, dentre outros fatores, pelo balanço de nutrientes, que, por sua vez, é influenciado pelo estoque e pelos fluxos de nutrientes. Os fluxos dependem de três importantes ciclos, o geoquímico, correspondente às

entradas e saídas de nutrientes do sistema; o bioquímico, correspondente à retranslocação interna na árvore; e o biogeoquímico, correspondente às trocas entre o solo e a planta (SWITZER e NELSON, 1972). Em condições de clima temperado, o ciclo biogeoquímico tende a otimizar o uso dos nutrientes do solo disponíveis para a produção florestal (RANGER e TURPAULT, 1999). Nessa situação, do total de nutrientes das reservas do solo, da manta orgânica e imobilizados em floresta de coníferas de 60 anos de idade, apenas uma pequena proporção é definitivamente imobilizada pela biomassa florestal. Por outro lado, o acúmulo de nutrientes na biomassa de florestas de regiões tropicais pode ser até cinco vezes maior do que na biomassa de florestas de regiões temperadas e boreais (MARION, 1979). Por essa razão, a sustentabilidade da produção de plantações florestais nos trópicos depende, em grande parte, do manejo florestal utilizado, com destaque para as técnicas que levam à maior eficiência de absorção/utilização de nutrientes pelas árvores e à manutenção de um máximo de resíduos na área. Assim, em regiões tropicais, comparativamente a outras regiões, a relação entre produção e conteúdo de nutrientes na biomassa deve ser mais estreita, conforme pode ser inferido dos trabalhos de NOVAIS e BARROS (1997) e SANTANA et al. (2000).

Maiores produtividades são acompanhadas de maiores exportações de nutrientes (GONÇALVES et al., 1997). A exportação dos nutrientes pela colheita altera o ciclo biogeoquímico e, ao longo do tempo, interfere na sustentabilidade da produção florestal. Em geral, a reposição de nutrientes pela ação do intemperismo, em solos tropicais, é baixa e a reposição pela precipitação é muito variável entre regiões (REIS e BARROS, 1990), o que requer suplementação via fertilizantes. No caso de N, há indicações de que a quantidade adicionada ao sistema via fixação biológica seja relativamente elevada (O'CONNELL e GROVE, 1996).

Para adoção de estratégias corretas de manejo florestal em longo prazo, visando a sua sustentabilidade, os manejadores florestais devem conhecer as relações entre a quantidade de nutrientes que é exportada do sítio e a biodisponibilidade dos nutrientes no solo (SPANGENBERG et al., 1996). Assim, o manejo de florestas tropicais requer a quantificação de nutrientes nos

vários compartimentos do ecossistema e de seus fluxos, para que se definam e se apliquem técnicas que visem o manejo florestal sustentável.

O conhecimento da produtividade e do conteúdo de nutrientes, numa determinada região, permite a adoção de técnicas silviculturais adequadas com a sustentabilidade da produção florestal. Dispondo-se de informações de regiões distintas, é possível desenvolver modelos para prever a biomassa e o conteúdo de nutrientes a ela associado. Deste modo, modelos podem ser gerados para predição dos resultados obtidos quando se adotam diferentes ciclos de corte, diferentes intensidades de colheita etc.

Modelos que envolvem a relação entre condições climáticas e crescimento são, freqüentemente, encontrados na literatura. O índice de Paterson foi desenvolvido para prever o potencial máximo de crescimento em termos de volume em grandes áreas (JOHNSTON et al., 1967), baseando-se na evapotranspiração, amplitude térmica anual, precipitação média anual, duração da estação de crescimento e temperatura média mensal do mês mais quente. Estudos similares sobre a produção primária, em trabalhos que abordam variações atmosféricas globais, têm sido baseados na evapotranspiração (LIETH e BOX, 1972) e na temperatura e precipitação (ESSER, 1984). JARVIS (1985) fez uma avaliação crítica de vários trabalhos e demonstrou a existência de correlação positiva entre produtividade e água disponível no solo, em florestas de coníferas. HINGSTON e GALBRAITH (1998), trabalhando com povoamentos de eucalipto, em 31 sítios na Austrália, atribuíram à idade e à precipitação média anual a explicação de 85% do crescimento em diâmetro e de 89% da altura média das árvores.

O desenvolvimento de modelos capazes de prever o potencial produtivo de diferentes regiões é útil para definir o grau de intervenção por meio de práticas de manejo, para otimizar o uso de recursos técnicos e financeiros, visando a produção florestal e a proteção do meio ambiente. Modelos de crescimento auxiliam os manejadores florestais de diferentes maneiras. Alguns usos importantes desses modelos incluem a habilidade de prever a produtividade e de explorar diferentes opções de manejo e alternativas silviculturais, além da sua utilização para definir políticas florestais (VANCLAY, 1994).

A dinâmica de nutrientes e a sua quantificação em alguns compartimentos, em plantios de eucalipto no Brasil, foram temas de vários estudos, em que a quantificação dos nutrientes foi realizada por métodos diretos, envolvendo a pesagem do componente da árvore e a análise química de suas amostras, ou indiretamente, por meio de equações alométricas (BELLOTE et al., 1980; POGGIANI, 1985; REIS e BARROS, 1990; BARROS e NOVAIS, 1996; GONÇALVES et al., 1997). Essas equações foram desenvolvidas para condições específicas e, portanto, não incluem informações sobre características climáticas. Ao considerar várias regiões, é possível que algumas características climáticas, em especial aquelas que influenciam a disponibilidade de água, possam resultar em componentes importantes para a estimativa do conteúdo de nutrientes em povoamentos florestais. Até então, não se registraram na literatura trabalhos para verificar a influência de características climáticas sobre a composição mineral de plantações de eucalipto. Tais avaliações forneceriam modelos gerais referentes a aspectos nutricionais de eucalipto e gerariam informações úteis ao planejamento de empreendimentos florestais em novas regiões e ao manejo nutricional das plantações de eucalipto.

No Brasil, ainda não se dispõe de dados sistematizados sobre o crescimento e a demanda nutricional das plantações de eucalipto nas várias regiões do país. O banco de dados do Programa em Nutrição e Solos Florestais da Universidade Federal de Viçosa (UFV) representa, provavelmente, o que melhor se pode dispor atualmente para eucalipto no Brasil. Por isto, este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de construir um modelo para estimar a biomassa de plantações de eucalipto com diferentes idades e em diferentes regiões; verificar a variação da concentração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na folha, no galho, na casca e no lenho de árvores, em diferentes idades, e sua relação com a biomassa; construir um modelo para estimar o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na biomassa do tronco, do lenho e da parte aérea de eucalipto, em diferentes regiões, e avaliar o efeito de algumas características climáticas sobre tal estimativa; e avaliar o impacto da intensidade de colheita na exportação desses nutrientes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, nos últimos 19 anos, formou um banco de dados sobre biomassa e nutrientes em plantios de eucalipto cultivados nas mais variadas condições edafoclimáticas brasileiras. Neste trabalho, foram utilizadas 1.217 árvores-amostra, coletadas em 20 regiões de cinco Estados (219 no Pará, 249 no Espírito Santo, 343 em Minas Gerais, 353 em São Paulo e 53 no Rio Grande do Sul). As espécies e os clones de eucalipto utilizados constituíam o melhor material genético disponível na época, para cada região. As práticas de manejo florestal podem ter variado, mas representaram o que melhor se conhecia na época. Em geral, o preparo do solo foi realizado por grade *bedding* ou arado de disco, nas linhas de plantio. A fertilização foi feita em faixa, sulco ou cova no plantio e em cobertura, aos 18 meses de idade.

2.1. Produção de biomassa e amostragem do material vegetal

A produção de biomassa foi estimada em povoamentos de seis meses a 11 anos de idade, em parcelas (600 m²) distribuídas aleatoriamente e representativas de cada região e em parcelas (600 m², com bordadura dupla) provenientes de delineamento experimental em blocos casualizados. Todas as árvores úteis das parcelas tiveram seu diâmetro (a 1,3 m de altura) e sua altura comercial medidos. Em cada parcela, uma árvore média foi abatida e seus

componentes (folha, galho, casca e lenho) foram pesados no campo. Subamostras foram coletadas, submetidas à secagem a 65 °C, em estufa com circulação forçada de ar, até peso constante, para determinação de matéria seca. A biomassa dos componentes das árvores, por hectare, foi obtida ao multiplicar a matéria seca de cada componente das árvores médias pelo número de árvores em um hectare.

2.2. Modelo de produção de biomassa da parte aérea e do tronco

O modelo apresentado foi ajustado para a biomassa da parte aérea (folha, galho, casca e lenho) e para a biomassa do tronco (casca e lenho), utilizando-se as 1.217 árvores-amostra, de 20 regiões de cinco Estados brasileiros, com diferentes características climáticas (Quadro 1), adotando-se o procedimento *stepwise*. O modelo empregado (*mod.1*) foi

$$\text{Ln}Y_{i1} = \beta_0 + \beta_1 DX_i / ID_i + \beta_2 \text{Ln}ID_i + \beta_3 \text{Ln}(W_i + 41) + \beta_4 \text{Ln}T_i + \beta_5 \text{Ln}PMS_i / \text{Ln}P_i + \varepsilon_i$$

em que

Y_{i1} = biomassa (B), em t ha⁻¹;

DX = variável *Dummy*, sendo $DX = 0$, para a estimativa da biomassa da parte aérea, ou $DX = 1$, para a estimativa da biomassa de tronco;

ID = idade (ano, tendo-se 0,5 ano como idade mínima para o modelo de biomassa da parte aérea; 1,5 ano como idade mínima para o modelo de biomassa de tronco; e 11 anos como idade máxima para ambos os modelos);

W = disponibilidade potencial de água (mm). A constante 41 foi adicionada aos valores dessa variável, em razão da transformação Ln e, também, pela presença de valores de W negativos, sendo o menor valor igual a - 40;

T = temperatura média anual (°C);

P = precipitação média anual (mm); e

PMS = precipitação média acumulada nos seis meses secos (mm, definido em função da menor precipitação média, maior evaporação média e maior temperatura média).

Quadro 1 – Material genético, número de árvores-amostra e valores médios de características climáticas utilizadas no ajuste do modelo para produção de biomassa da parte aérea e do tronco, em eucalipto cultivado em diversas regiões do Brasil

Região	Material Genético*	n	Característica Climática					
			P	PMS	EVP	W	T	
			-----mm-----					°C
Três Marias – MG	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	177	1.280	240	1.320	-40	23	
Lençóis Paulista – SP	1	35	1.200	240	1.200	0	20	
Luiz Antônio – SP	1, 2, 3, 5	207	1.440	240	1.380	60	20	
Carbonita – MG	1	12	1.280	240	1.260	20	22	
Itamarandiba – MG	10	23	1.280	240	1.260	20	22	
Bom Despacho – MG	1	13	1.440	240	1.260	180	21	
Paraopeba – MG	1	11	1.440	240	1.260	180	21	
Itapetininga – SP	1, 2	13	1.280	320	1.080	200	20	
Angatuba – SP	1, 2	16	1.280	320	1.080	200	20	
Depressão Central – RS	2	53	1.440	720	780	660	14	
Guanhães – MG	1	40	1.280	240	1.080	200	22	
Viçosa – MG	1	11	1.360	240	900	460	21	
Timóteo – MG	1, 4, 10	36	1.520	320	1.080	440	21	
São Miguel Arcanjo – SP	1, 2	12	1.440	480	1.080	360	20	
Itapeva – SP	1	18	1.440	480	1.080	360	20	
Ipatinga – MG	1, 5	20	1.520	320	1.080	440	22	
Litoral Norte – ES	1, 3	249	1.200	320	1.080	120	24	
São José dos Campos – SP	1, 2	34	1.840	480	600	1.240	19	
Paraibuna – SP	1, 2	18	1.840	480	540	1.300	20	
Monte Dourado – PA	3	219	2.320	560	1.140	1.180	26	

Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET (1999), resultados médios obtidos no período de 1931 a 1990; * 1 – *Eucalyptus grandis*, 2 – *E. saligna*, 3 – *E. grandis* x *E. urophylla*, 4 – *E. cloesiana*, 5 – *E. urophylla*, 6 – *E. camaldulensis*, 7 – *E. citriodora*, 8 – *E. terenticornis*, 9 – *E. pellita*, 10 – híbridos; n (nº de árvores-amostra); P (precipitação média anual); PMS (precipitação média acumulada nos seis meses secos, de abril a setembro foram os seis meses secos para todos os locais, exceto para Monte Dourado-PA, cujo período seco foi de julho a dezembro, e para a Depressão Central-RS, definido de novembro a abril); EVP (evaporação, tanque Classe A); W (P – EVP, disponibilidade potencial de água); e T (temperatura média anual).

A avaliação do relacionamento entre as variáveis dependente e independentes foi realizada no módulo *multiple regression* do software Statistica (STATSOFT, 1999), seguindo os seguintes critérios de significância estatística: linearidade e homogeneidade das variâncias dos erros (avaliadas pelo gráfico de resíduos, $Erro_i = Y - \hat{Y}$, em função do valor estimado) e normalidade de distribuição dos erros (análise visual do gráfico de probabilidade normal dos resíduos). Foram consideradas *outliers* as linhas de dados que, após o processamento das equações, apresentaram resíduos maiores do que 2,5 unidades de desvio-padrão.

A validação do modelo foi realizada segundo o método *Split-Sample*, por meio do procedimento *stepwise* (HAIR et al., 1998). Primeiro, ajustou-se um modelo global (*mod.1*), utilizando-se todos os dados. A seguir, estes dados foram divididos em duas subamostras, utilizando-se o procedimento *fill random values* do software Statistica. Este procedimento permite a geração de uma coluna de dados onde, aproximadamente, 50% das informações recebem números de forma casualizada, entre 0 e 0,5 (subamostra 1), e os 50% restantes recebem números entre 0,5 e 1 (subamostra 2). Em cada subamostra foi aplicado o *mod.1*, para comparação dos resultados entre as equações geradas. Esse procedimento, segundo os autores, é válido para efetuar a comparação subjetiva das variáveis independentes das equações, por meio dos coeficientes das regressões, dos coeficientes beta, dos valores t e de suas estatísticas (coeficiente de determinação, R^2 ; coeficiente de determinação ajustado, \bar{R}^2 ; e erro-padrão da estimativa, S_{xy}). Admite-se como um modelo de regressão válido, se os coeficientes, os valores t e as estatísticas das equações obtidas em cada subamostra forem semelhantes aos da equação global. Além disto, de modo complementar, foram obtidas outras 28 subamostras aleatórias, por meio do mesmo procedimento descrito. O modelo (*mod.1*) foi ajustado para cada uma dessas subamostras, sendo a média dos coeficientes das 30 equações (28 + subamostra 1 + subamostra 2) comparada, subjetivamente, com os coeficientes do modelo global.

Um segundo método foi utilizado na validação do modelo. Testou-se a identidade entre valores de biomassa aérea estimados pela equação global e os valores médios observados para uma mesma região, aplicando-se o

procedimento estatístico proposto por LEITE e OLIVEIRA (2000). Tal procedimento consiste na aplicação simultânea da análise da estatística F, proposta por Graybill (GRAYBILL, 1976), na aplicação do teste t para o erro médio e na verificação da ocorrência da condição $r_{Y_j Y_1} \geq 1 - |\bar{e}|$. Este procedimento testa a identidade entre dois vetores de dados quantitativos ou entre dois métodos analíticos. Considerando $\underline{Y}_{\sim j}$ o vetor dos valores estimados pelas equações de regressão e $\underline{Y}_{\sim 1}$ o vetor com os correspondentes valores observados, aceita-se a hipótese $H_0: \underline{Y}_{\sim j} = \underline{Y}_{\sim 1}$, se:

$$F_{H_0} = \frac{(\underline{\beta} - \underline{\theta})' (\underline{Y}'_1 \underline{Y}_1) (\underline{\beta} - \underline{\theta})}{2.QMRes} \geq F_{\alpha}(2, n - 2gl),$$

$$t_{\bar{e}} = \frac{\bar{e}}{s_e / \sqrt{n}} \geq t_{\alpha}(n - 1gl), \text{ e}$$

$$r_{Y_j Y_1} \geq 1 - |\bar{e}|, \text{ sendo:}$$

$\underline{Y}_{\sim j}$ = vetor de dados estimados; $\underline{Y}_{\sim 1}$ = vetor de dados observados;

$\underline{\beta}$ = vetor que contém a constante e a inclinação da reta obtida do ajuste do modelo $Y_j = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \varepsilon$;

$$\underline{\theta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

n = número de observações;

QMRes = quadrado médio do resíduo obtido ao ajustar o modelo

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \varepsilon;$$

$$\bar{e} = \text{erro médio} = \sum_{i=0}^n ((Y_{ji} - Y_{1i}) / Y_{1i}) / n;$$

$|\bar{e}|$ = módulo do erro médio;

$$s_e = \text{desvio-padrão de } e_i, e_i = \frac{Y_{ji} - Y_{1i}}{Y_{1i}}; \text{ e}$$

$r_{Y_j Y_1}$ = coeficiente de correlação linear entre Y_j e Y_1 .

2.3. Alocação relativa de biomassa da copa e do tronco

A curva de tendência de alocação de biomassa da copa (folha e galho) em relação à biomassa da parte aérea (folha, galho, casca e lenho), por árvore, em função da idade e independente da região, foi obtida ao utilizar o procedimento *distance-weighted least squares* do software Statistica (STATSOFT, 1999), que permite a geração de um gráfico e, ou, um quadro com os resultados do ajuste. Esse algoritmo é útil para identificar padrões de desenvolvimento de modelos quantitativos que contêm informações interpretativas sobre o fenômeno estudado. Ao contrário de outros processos, este não ajusta uma função (polinomial, logarítmica etc.), que pode ser facilmente descrita por uma simples fórmula e plotada independentemente dos dados. O procedimento utiliza algoritmos mais complexos, da seguinte maneira: uma regressão polinomial de segunda ordem é calculada para cada valor da variável X (idade), para determinar o correspondente valor Y (% copa). A influência dos pontos individuais sobre a regressão decresce com sua distância de um valor particular de X ; um algoritmo similar a este foi descrito por MCLAIN (1974). Como a soma das percentagens da copa e do tronco é 100%, conhecendo-se a curva de percentagem da copa, por diferença, tem-se a do tronco.

2.4. Análises químicas do material vegetal

Após a determinação da matéria seca dos componentes das árvores (folha, galho, casca e lenho), as amostras do material vegetal foram moídas, passadas por peneiras e mineralizadas por digestão nítricoperclórica, e as concentrações de fósforo (colorimetria), potássio (fotometria de emissão de chama), cálcio e magnésio (espectrometria de absorção atômica) foram determinadas no extrato. O nitrogênio foi determinado pelo método de Kjeldahl.

As seguintes estatísticas descritivas para a concentração de nutrientes foram avaliadas: a média (\bar{x}), o erro-padrão da média ($s_{\bar{x}}$), os percentis 25 (P_{25}) e 75 (P_{75}) e os valores máximo (Max) e mínimo (Min) das concentrações de N, P, K, Ca e Mg na folha; e a média e o erro-padrão da média para estes

nutrientes no galho, na casca e no lenho, por faixas de idade (de 0,5 a 2; de 2,01 a 4; de 4,01 a 6; de 6,01 a 8; e de 8,01 a 10 anos).

2.5. Modelo para conteúdo de N, P, K, Ca e Mg no tronco, no lenho e na biomassa da parte aérea

O seguinte modelo foi ajustado para o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na biomassa da parte aérea, na biomassa do tronco e na biomassa do lenho, utilizando-se as 1.217 árvores-amostra, adotando-se o procedimento *forward stepwise* do software Statística (STATSOFT, 1999). O modelo empregado (*mod.2*) foi

$$\text{Ln}Y_{i2} = \beta_0 + \beta_1DX_i + \beta_2DX1_i + \beta_3\text{Ln}B_i + \beta_4\text{Ln}(W_i + 41) + \beta_5\text{Ln}T_i + \beta_6\text{Ln}PMS_i / \text{Ln}P_i + \varepsilon_i$$

em que

Y_{i2} = N, P, K, Ca ou Mg, em kg ha⁻¹;

B = biomassa (t ha⁻¹); e

DX e $DX1$ = variáveis *Dummy* ($DX = 0$ e $DX1 = 0$, para a estimativa do conteúdo de nutriente na biomassa da parte aérea; $DX = 1$ e $DX1 = 0$, para a estimativa do conteúdo de nutriente na biomassa do tronco; e $DX = 0$ e $DX1 = 1$, para a estimativa do conteúdo de nutriente na biomassa do lenho).

O número de árvores por região e os dados climáticos utilizados estão relacionados no Quadro 1. A descrição das variáveis climáticas utilizadas no modelo, a avaliação do relacionamento entre as variáveis dependente e independentes e a definição dos *outliers* foram realizadas conforme descrito no item 2.2.

Para validação dos resultados, os valores médios observados de conteúdo de nutrientes na biomassa da parte aérea e conteúdo de nutrientes estimados pelas equações, para cada nutriente, em diferentes faixas de produtividade e em diferentes regiões, foram comparados ao aplicar o procedimento estatístico proposto por LEITE e OLIVEIRA (2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estimativa da biomassa da parte aérea e do tronco

Para todas as regiões, foi obtida uma equação global, capaz de estimar a biomassa da parte aérea e do tronco, utilizando uma variável *Dummy*, a idade e algumas características climáticas de forma individualizada ou em combinação com outras (Quadro 2). As pressuposições estatísticas quanto à linearidade, homocedasticidade da variância, independência dos resíduos e normalidade foram satisfatórias.

A validação dos modelos de regressão é importante para definir se os resultados podem ser extrapolados ou se são específicos ao conjunto de dados utilizados para gerar o modelo (HAIR et al., 1998). Ao comparar os resultados da equação global de produção com as equações obtidas para as subamostras 1 e 2, observou-se um alto nível de similaridade dos resultados em termos de R^2 , \bar{R}^2 , S_{xy} e entre os parâmetros (Quadro 2). Conforme sugerido por HAIR et al. (1998), quando esta similaridade ocorre, conclui-se que os resultados são generalizáveis para a população e não específicos para a amostra utilizada na estimativa da equação, ou seja, pode-se aceitar a equação global de produção para diferentes regiões do Brasil, desde que não sejam extrapoladas as amplitudes dos valores de cada variável independente utilizada.

Quadro 2 – Valores dos coeficientes e estatísticas para a estimativa da biomassa (t/ha) de toda a população de eucalipto utilizada e de duas subamostras

Componente da Equação	Equação Global de Produção (n= 1.926)	Subamostra 1 (n=968)	Subamostra 2 (n=958)
Intercepto	- 3,05053*	-3,00334*	- 3,10932*
Valor “t”	- 10,14	- 6,96	- 7,41
Variáveis independentes			
<i>DX/ID</i>			
Coeficiente da regressão	- 0,48977*	- 0,44987*	- 0,52552*
Coeficiente beta	- 0,0776	- 0,0699	- 0,0847
Valor “t”	- 8,39	- 5,26	- 6,59
<i>LnID</i>			
Coeficiente da regressão	1,36552*	1,37131*	1,36290*
Coeficiente beta	0,7823	0,7799	0,7861
Valor “t”	79,56	55,25	57,30
<i>LnW</i>			
Coeficiente da regressão	0,12029*	0,12744*	0,11285*
Coeficiente beta	0,3111	0,3323	0,2895
Valor “t”	29,41	21,81	19,68
<i>LnT</i>			
Coeficiente da regressão	0,90513*	0,89776*	0,91542*
Coeficiente beta	0,1429	0,1412	0,1451
Valor “t”	14,57	10,04	10,61
<i>LnPMS/LnP</i>			
Coeficiente da regressão	2,43264*	2,33712*	2,52709*
Coeficiente beta	0,1073	0,1027	0,1119
Valor “t”	9,63	6,41	7,22
Modelo ajustado			
R^2	0,845	0,839	0,851
\overline{R}^2	0,844	0,838	0,850
S_{xy}	0,3427	0,3493	0,3362

* $p < 0,0000$; *DX* (variável *Dummy*); *ID* (idade, ano); *W* (disponibilidade potencial de água, mm); *T* (temperatura média anual, °C); *P* (precipitação média anual, mm); e *PMS* (precipitação média acumulada nos seis meses secos, mm).

Trinta equações foram ajustadas com amostras aleatórias do banco de dados, conforme descrito no item 2.2. O alto nível de significância dos coeficientes da equação global de produção foi mantido em todas as 30 equações, e ao comparar a equação global com a média das demais equações verificou-se que as diferenças foram inferiores a 0,5%, para todos os coeficientes (Quadro 3). Tal fato é mais um indicativo da alta estabilidade do modelo e que os resultados são generalizáveis.

Outro teste para validação do modelo foi realizado ao aplicar o método proposto por LEITE e OLIVEIRA (2000) aos dados do Quadro 4. Observou-se a igualdade estatística entre os valores observados e estimados, para seis das oito regiões avaliadas (Quadro 5). Na região de Guanhões e Itapeva, não foram observadas identidades entre os valores observados e os estimados. Por causa do caráter genérico do modelo e pelo fato de este trabalho ter sido realizado em nível de campo, abrangendo cinco Estados brasileiros, a existência de alguns desvios era esperada.

Todas as variáveis independentes utilizadas relacionaram-se positivamente com a biomassa da parte aérea, exceto a variável *Dummy*. Assim, pode-se concluir que a biomassa aumentou com a idade, com a disponibilidade potencial de água, com a temperatura média anual e com o aumento da proporção da quantidade média de água disponível nos meses secos, em relação à precipitação anual. Entretanto, a variável independente que mais influenciou a biomassa foi a idade, o que é observado pelo maior coeficiente beta (Quadro 2). Apesar da menor contribuição das demais variáveis independentes em relação à idade, o uso destas foi de fundamental importância para obter uma estimativa mais precisa da produtividade do eucalipto, para as diferentes regiões. Há ainda cerca de 15% da variação na biomassa de eucalipto que não é explicada pelas variações que compõem o modelo. Além da composição genética, outras características, como as edáficas, podem ser responsáveis por este resultado. Apesar deste fato, o modelo fornece uma estimativa satisfatória da produção de biomassa de eucalipto em diferentes idades no Brasil, bastando para isto ter os dados climáticos constantes no modelo, dados estes que são facilmente obtidos em estações climatológicas.

Quadro 3 – Coeficientes das equações de biomassa obtidas de várias subamostras aleatórias, utilizando o modelo global de produção (mod.1)

Equação	β_0	DX/ID	$LnID$	LnW	LnT	$LnPMS/LnP$	n	\bar{R}^2
1	-2,6109	-0,4950	1,3798	0,1283	0,8172	2,1466	971	0,844
2	-3,7688	-0,5181	1,3851	0,1177	1,0483	2,7450	935	0,838
3	-3,0033	-0,4499	1,3713	0,1274	0,8978	2,3371	968	0,838
4	-2,6875	-0,4886	1,3813	0,1262	0,9036	1,9207	951	0,851
5	-2,9152	-0,5108	1,3825	0,1248	0,9304	2,0935	927	0,850
6	-3,3292	-0,5057	1,3534	0,1239	0,9697	2,5371	959	0,838
7	-2,5165	-0,4720	1,3668	0,1271	0,8454	1,9500	984	0,845
8	-2,9939	-0,4775	1,3543	0,1092	0,8041	2,8315	943	0,850
9	-3,2106	-0,5401	1,3362	0,1163	0,8985	2,7450	938	0,837
10	-3,0692	-0,5186	1,3633	0,1169	0,9272	2,4219	958	0,842
11	-2,7581	-0,4795	1,3913	0,1256	0,8573	2,1774	973	0,845
12	-3,0300	-0,4901	1,3677	0,1177	0,8707	2,5718	1.019	0,845
13	-2,5947	-0,4925	1,3376	0,1162	0,8092	2,3003	948	0,838
14	-2,7650	-0,4893	1,3965	0,1191	0,8670	2,1793	1.001	0,853
15	-3,5071	-0,4894	1,3546	0,1119	0,9940	2,7331	955	0,845
16	-2,4486	-0,4592	1,3484	0,1231	0,7780	2,1953	991	0,850
17	-2,4370	-0,4485	1,3413	0,1304	0,7862	2,1270	927	0,834
18	-3,3543	-0,4896	1,3511	0,1147	0,9111	2,8503	975	0,837
19	-3,1997	-0,4681	1,3455	0,1148	0,8672	2,8508	999	0,838
20	-2,7858	-0,4750	1,3759	0,1162	0,8350	2,3747	967	0,850
21	-3,6402	-0,5094	1,3666	0,1138	0,9749	2,9403	942	0,834
22	-3,1732	-0,5062	1,3806	0,1317	1,0146	2,0757	983	0,839
23	-2,9166	-0,4459	1,3904	0,1241	0,9061	2,1860	988	0,850
24	-3,0245	-0,4620	1,3660	0,1229	0,8806	2,4522	968	0,845
25	-3,3547	-0,5021	1,3391	0,1154	0,9480	2,7213	953	0,844
26	-3,0624	-0,4884	1,3646	0,1230	0,9386	2,2803	907	0,840
27	-3,4973	-0,4911	1,3966	0,1247	0,9973	2,5616	978	0,851
28	-3,3404	-0,4986	1,3291	0,1217	0,9480	2,6851	925	0,834
29	-3,0033	-0,4499	1,3713	0,1274	0,8978	2,3371	968	0,838
30	-3,1093	-0,5255	1,3629	0,1129	0,9154	2,5271	958	0,851
Erro-Padrão	0,0636	0,0044	0,0034	0,0011	0,0125	0,0533	4,641	0,0011
Média	-3,03691	-0,48788	1,36502	0,12083	0,90129	2,42850	962	0,843
Equação Global	-3,05053	-0,48977	1,36552	0,12029	0,90513	2,43264	1.926	0,844

β_0 (intercepto); DX (variável *Dummy*); ID (idade, ano); W (disponibilidade potencial de água, mm); T (temperatura média anual, °C); P (precipitação média anual, mm); PMS (precipitação média acumulada nos seis meses secos); e n (n^0 de dados utilizados em cada equação). Todos os parâmetros das equações, incluindo o intercepto, foram significativos a 1% probabilidade.

Quadro 4 – Biomassa observada e estimada pelo uso da equação global, para eucalipto, em algumas regiões

Biomassa da Parte Aérea (t ha ⁻¹)											
	-----Idade (ano)-----										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Três Marias – MG											
Observada	5,5	22,2	26,5	41,1	47,8	57,4	58,4	-	-	-	-
Estimada	5,3	13,6	23,6	34,9	47,4	60,8	75,0	-	-	-	-
Luiz Antônio – SP											
Observada	7,1	39,2	41,3	57,9	64,5	-	-	-	-	-	-
Estimada	7,8	20,0	34,8	51,5	69,9	-	-	-	-	-	-
Depressão Central – RS											
Observada	-	-	-	-	-	-	157,4	175,4	171,2	210,1	220,7
Estimada	-	-	-	-	-	-	148,5	178,2	209,3	241,6	275,2
Guanhães – MG											
Observada	4,7	28,3	50,5	103,3	-	136,0	196,5	-	-	-	-
Estimada	9,6	24,7	43,0	63,6	-	110,7	136,6	-	-	-	-
Bom Despacho – MG											
Observada	9,6	31,3	47,9	82,3	82,3	85,3	-	-	-	-	-
Estimada	9,0	23,2	40,4	59,8	81,1	104,1	-	-	-	-	-
Itapeva – SP											
Observada	8,7	41,7	77,7	108,1	-	172,4	-	-	-	-	-
Estimada	11,3	29,1	50,6	75,0	-	130,4	-	-	-	-	-
Litoral Norte – ES											
Observada	9,7	23,3	58,0	98,7	129,9	171,4	142,8	207,4	221,8	-	267,5
Estimada	11,2	28,9	50,2	74,4	100,9	129,4	159,7	191,7	225,2	-	296,1
São José dos Campos – SP											
Observada	6,0	-	55,3	144,9	-	109,1	212,1	-	-	-	-
Estimada	12,0	-	53,8	79,7	-	138,6	171,1	-	-	-	-

Quadro 5 – Resultados obtidos ao aplicar o teste de validação¹¹ aos dados observados (Y_j) e estimados (Y_1), em diferentes regiões

Região	$r_{Y_j X_1}$ ²¹	\bar{e} ³¹	F(H ₀) ⁴¹	t_e ⁵¹	$r_{Y_j X_1} \geq (1 - \bar{e})$?	Conclusão
Três Marias – MG	0,964	0,051	1,24 ^{ns}	-0,65 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$
Luiz Antônio – SP	0,927	-0,115	0,59 ^{ns}	-1,07 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$
Depressão Central – RS	0,946	0,116	6,24 ^{ns}	1,96 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$
Guanhães – MG	0,987	-0,019	34,31 ^{**}	-0,09 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} \neq X_{\sim 1}$
Bom Despacho – MG	0,928	-0,091	0,19 ^{ns}	-1,21 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$
Itapeva – SP	0,994	-0,181	55,59 ^{**}	-1,49 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} \neq X_{\sim 1}$
Litoral Norte – ES	0,972	0,029	0,45 ^{ns}	-0,51 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$
São José dos Campos – SP	0,882	0,120	1,30 ^{ns}	0,48 ^{ns}	Sim	$Y_{\sim j} = X_{\sim 1}$

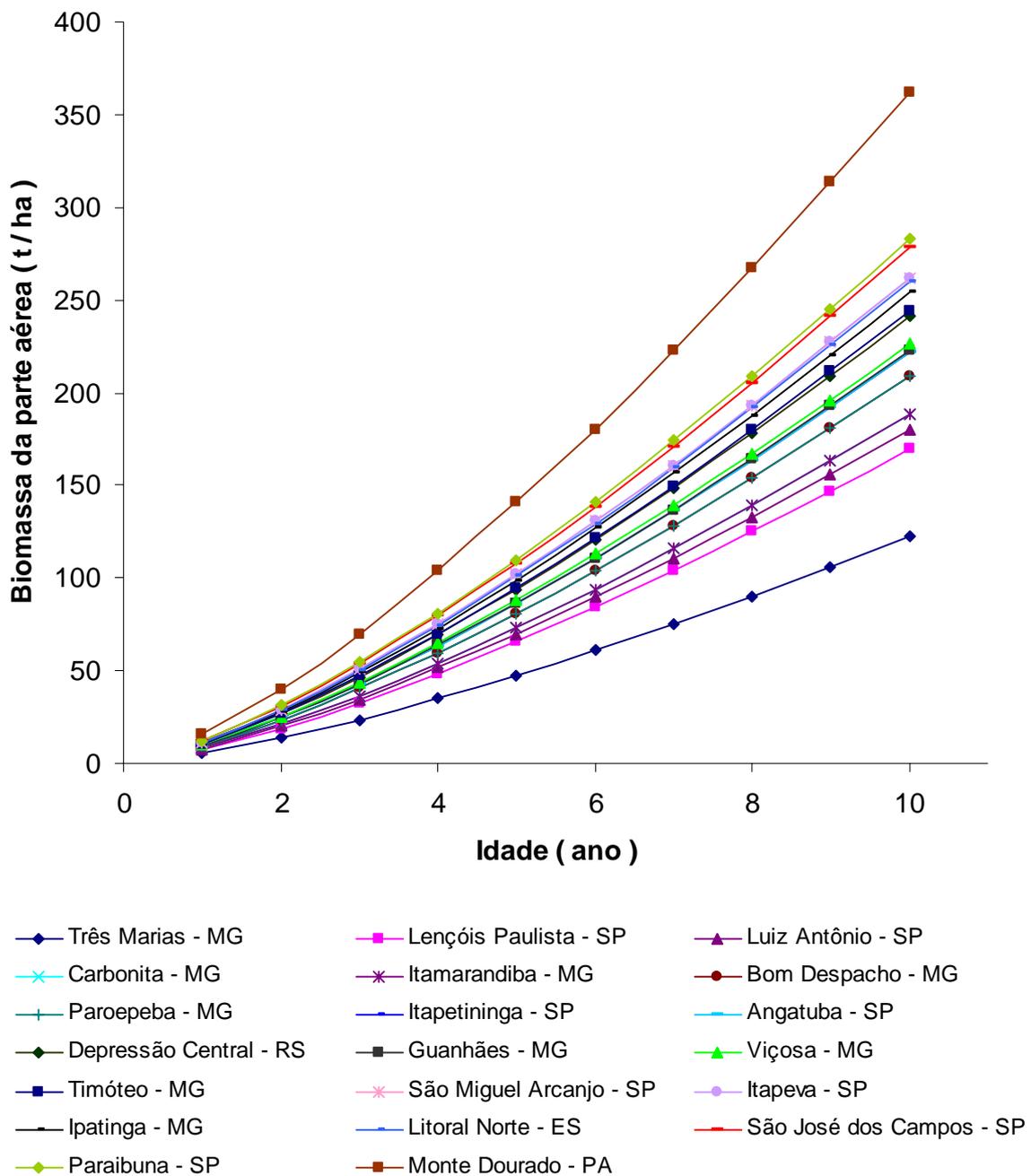
¹¹ Segundo LEITE e OLIVEIRA (2000), aplicados aos dados do Quadro 4; ²¹ coeficiente de correlação; ³¹ erro médio; ⁴¹ F de Graybill; ⁵¹ teste t para o erro médio; e ** e ^{ns}, significativo e não-significativo a 1% de probabilidade, respectivamente.

O R² de 0,85 obtido para a equação de biomassa (Quadro 2) pode ser considerado elevado em um modelo tão amplo. A mesma tendência foi observada por HINGSTON e GALBRAITH (1998), que verificaram que 89 e 85% da variação de crescimento em diâmetro e em altura, respectivamente, de *Eucalyptus globulus*, na Austrália, ocorreram em virtude da idade e da precipitação média anual e encontraram valores de incremento médio anual (IMA) de tronco de 5,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ no sítio menos produtivo, aos seis anos de idade, até 25,9 t ha⁻¹ ano⁻¹ no melhor sítio, aos sete anos. Calculando os IMA's de tronco pelo uso da equação global de produção e considerando essas mesmas idades, foram obtidas 9,3 t ha⁻¹ ano⁻¹ na região de Três Marias – MG e 29,7 t ha⁻¹ ano⁻¹ em Monte Dourado – PA.

Caracteristicamente, a curva de crescimento de uma floresta possui a forma sigmóide, com três fases distintas (juvenil, maturidade e senescência). Embora a forma exata da curva de crescimento varie em função da característica avaliada, a tendência sigmóide expressa adequadamente o crescimento das árvores (HUSCH et al., 1972). Neste trabalho, a equação obtida indica que a tendência de produção de biomassa da parte aérea e do

tronco continua crescente em todas as faixas de idade, ou seja, as florestas de eucalipto ainda não atingiram o ponto de máxima biomassa da parte aérea (Figura 1). Tal fato pode evidenciar que a idade de colheita entre seis e sete anos, normalmente definida em função do volume, pode não estar ecologicamente correta e não contribuir para a sustentabilidade da produção do ecossistema. BELLOTE (1979) e PEREIRA et al. (1984) observaram que o peso de matéria seca de tronco de *E. grandis*, aos sete anos de idade, continuava apresentando taxas elevadas de crescimento, enquanto o crescimento em volume havia estagnado. Decisões relacionadas ao crescimento da floresta podem ser substancialmente modificadas ao alterar o ciclo de corte, como, por exemplo, fertilização, retorno econômico, equipamentos para a colheita etc. Entretanto, a definição do ponto de corte da floresta deve considerar características ecológicas do ecossistema dentro de um contexto econômico. CROMER e WILLIAMS (1982), ao avaliarem a biomassa de tronco de *E. globulus* na Austrália, também observaram que, até a idade de dez anos, a curva de crescimento ainda encontrava-se na fase crescente.

O modelo evidencia a importância da idade, da temperatura e da disponibilidade de água, nas diferentes regiões, na produção de biomassa. Os efeitos da idade sobre o aumento da biomassa são óbvios, embora não necessariamente sempre tão acentuados se um fator de crescimento for fortemente limitante, e não requerem maiores explicações. As respostas às variações de temperatura são muito complexas (TAIZ e ZEIGER, 1998) e difíceis de serem isoladas na interpretação do modelo. Estes autores enfatizam que a temperatura afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese e que o seu valor ótimo para o crescimento vegetal pode variar de acordo com o ambiente em que a planta cresce, o que dificulta a estimativa do efeito da temperatura sobre o crescimento. Como observado no Quadro 1, a temperatura média anual variou de 14 a 26 °C, da Região Sul à Norte do Brasil. Quando se compara a produção de biomassa do eucalipto cultivado na região da Timóteo-MG com a da região da Depressão Central – RS (Figura 1), por exemplo, observa-se similaridade entre elas, apesar de a temperatura média entre ambas diferir em 7 °C, indicando que outros fatores compensam essa diferença.



$Biomassa = e^{(-3,0505 - 0,4898 DX/ID + 1,3655 LnID + 0,1203 Ln(W+41) + 0,9051 LnT + 2,4326 LnPMS/LnP)}$

$R^2 = 0,85$; *Biomassa* = t/ha; *DX* (variável *Dummy*); *ID* (idade, ano); *W* (disponibilidade potencial de água, mm); *T* (temperatura média anual, °C); *P* (precipitação média anual, mm); e *PMS* (precipitação média acumulada nos seis meses secos, mm). Todos os coeficientes da equação foram significativos a 1 % de probabilidade.

Figura 1 – Biomassa (t/ha) da parte aérea de eucalipto, em diferentes regiões do Brasil.

Segundo TAIZ e ZEIGER (1998), as plantas podem fotossintetizar em diferentes faixas de temperatura e, também, passar significativo período de tempo fotossintetizando a temperaturas abaixo ou acima da ótima, o que pode levar à limitação da produtividade. Esses resultados mostram a grande plasticidade de adaptação do eucalipto às diferentes condições de temperatura no Brasil, mantendo elevada produtividade se não houver limitação por outros fatores de crescimento.

A biomassa estimada variou bastante entre regiões. Ao comparar a biomassa da parte aérea entre a região de maior com a de menor produtividade, a diferença foi de 146 t ha^{-1} , ou três vezes, aos sete anos de idade. Conforme esperado, a produtividade foi menor nas regiões de menor disponibilidade de água. A região de Três Marias-MG apresentou a menor disponibilidade de água e a mais alta demanda evaporativa, ocasionando *deficits* hídricos, portanto, a ação combinada desses fatores leva à redução na produtividade da floresta (CARLYLE, 1998). Existem trabalhos na literatura que ilustram a influência do estresse por falta de água, causando redução na produtividade em espécies de rápido crescimento (BRADFORD e HSIAO, 1982). A maioria dos trabalhos compara a produtividade entre áreas com e sem irrigação (PEREIRA e PALLARDY, 1989). Segundo JARVIS e LEVERENZ (1983), a limitação por água reduz a eficiência de conversão de energia solar em biomassa ou reduz a quantidade de luz interceptada pela copa, devido à redução de área foliar, resultando em menor produtividade florestal. Mas o principal mecanismo responsável pelo menor crescimento observado nas regiões com maior restrição hídrica é o fechamento dos estômatos, que contribui para a manutenção da umidade com conseqüente redução na absorção de CO_2 (BLAKE e TSCHAPLINSKI, 1992). Os autores relataram que as árvores possuem vários mecanismos que ajudam a minimizar o efeito do estresse por falta de água e que o *E. grandis* reduz a condutância estomática e apresenta maior redução na transpiração do que na absorção de CO_2 , ou seja, reduz a transpiração mais do que a fotossíntese, aumentando a eficiência de utilização de água. Esta é uma das razões para o eucalipto apresentar boa produtividade em condições onde o estresse por falta de água não é muito pronunciado.

O conhecimento da alocação de biomassa florestal é importante para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes (REIS e BARROS, 1990) e é essencial para definições das estratégias de manejo a serem adotadas, como a aplicação de fertilizantes e a intervenção por meio de desbaste. Observou-se que a distribuição relativa de biomassa da copa foi reduzida com o aumento da idade (Quadro 6) e, conseqüentemente, a do tronco aumentou.

O ponto de interseção entre a proporção de biomassa da copa e do tronco ocorreu à idade de um ano e quatro meses (Quadro 6). De modo geral, nessa idade ainda não se atingiu a fase de fechamento de copa, uma das mais importantes para o crescimento da floresta, pois a área foliar tende para o máximo e a demanda nutricional é elevada. Até essa fase, o ciclo geoquímico é mais importante, a demanda por nutrientes do solo é grande e, ainda, a ciclagem de nutrientes não contribui significativamente para atender à demanda da planta. O *deficit* de água ou nutrientes, nesse período, pode comprometer o crescimento futuro do povoamento. Entre seis meses e três anos e seis meses de idade, observou-se uma forte queda na percentagem de copa. A partir de três anos e seis meses, a proporção de copa reduziu mais lentamente, até os cinco anos, tornando-se ainda mais estável a partir do sexto ano (Quadro 6). Após a fase de fechamento de copas, grande parte da demanda nutricional para os nutrientes considerados móveis pode ser suprida pela ciclagem bioquímica de nutrientes (ATTIWILL, 1980; MILLER, 1995). Assim, espera-se que respostas a intervenções por meio de técnicas de manejo, como a fertilização, sejam maiores em idades mais jovens.

O tronco é o componente da árvore de eucalipto mais utilizado pelas empresas florestais e pelos silvicultores. Considerando a baixa fertilidade da grande parte dos solos cultivados com eucalipto no Brasil, a permanência de máximo resíduo da colheita florestal sobre o solo é importante para minimizar a exportação de nutrientes pela colheita e proteger o solo (COSTA, 1990). MIRANDA et al. (1998) verificaram que o volume de eucalipto que cresceu sob o efeito da galhada da rotação anterior foi 54% superior àquele correspondente a locais sem a galhada, aos 8,5 anos de idade. O acúmulo de nutrientes pelas árvores na primeira situação foi duas a três vezes maior do que na segunda. Ecologicamente, a colheita apenas do lenho é o sistema de manejo mais

desejável, por deixar mais biomassa sobre o solo e por exportar menos nutrientes. A proporção média de biomassa da casca em relação à biomassa da parte aérea foi de 10% e em relação à biomassa do tronco, de 13% (Figura 2). Entretanto, a exportação de nutrientes pela casca, especialmente a de cálcio, é bastante expressiva (BELLOTE et al., 1980; PEREIRA et al., 1984; SANTANA et al., 1999).

Quadro 6 – Alocação relativa de biomassa média para a copa de eucalipto, estimada¹¹ em função da idade

Idade	Copa	Idade	Copa	Idade	Copa	Idade	Copa
ano	%	ano	%	ano	%	ano	%
0,50	73,0	3,00	20,0	5,75	9,2	8,50	7,3
0,75	65,5	3,25	17,7	6,00	9,0	8,75	7,3
1,00	58,0	3,50	15,6	6,25	8,5	9,00	7,3
1,25	52,4	3,75	14,5	6,50	8,3	9,25	7,3
1,34	50,0	4,00	13,0	6,75	8,3	9,50	7,3
1,50	42,2	4,25	12,3	7,00	8,0	9,75	7,3
1,75	40,5	4,50	11,4	7,25	8,0	10,00	7,3
2,00	35,3	4,75	10,8	7,50	7,5	10,25	7,3
2,25	30,3	5,00	10,4	7,75	7,5	10,50	7,5
2,50	26,0	5,25	10,0	8,00	7,5	10,75	7,7
2,75	23,0	5,50	10,0	8,25	7,3	11,00	7,7

¹¹ % de copa estimada conforme o item 2.3.

Os trabalhos que abordam a importância dos resíduos sobre a conservação do solo e da sua umidade não são recentes; como exemplo pode-se citar DULEY e RUSSELL (1939). Para a região de Três Marias-MG e para a de Monte Dourado-PA, 13% da biomassa de tronco, aos 6,5 anos de idade, equivale, respectivamente, a 8 e 24 t ha⁻¹ de casca que não seriam exportadas pela colheita se apenas o lenho fosse retirado. Portanto, adequações nas técnicas de manejo que favoreçam a manutenção de água e nutrientes no sítio irão contribuir para o aumento da produtividade. A manutenção da capacidade produtiva dos solos e a qualidade do ecossistema são os principais objetivos a serem alcançados em um manejo florestal sustentável (NAMBIAR, 1997).

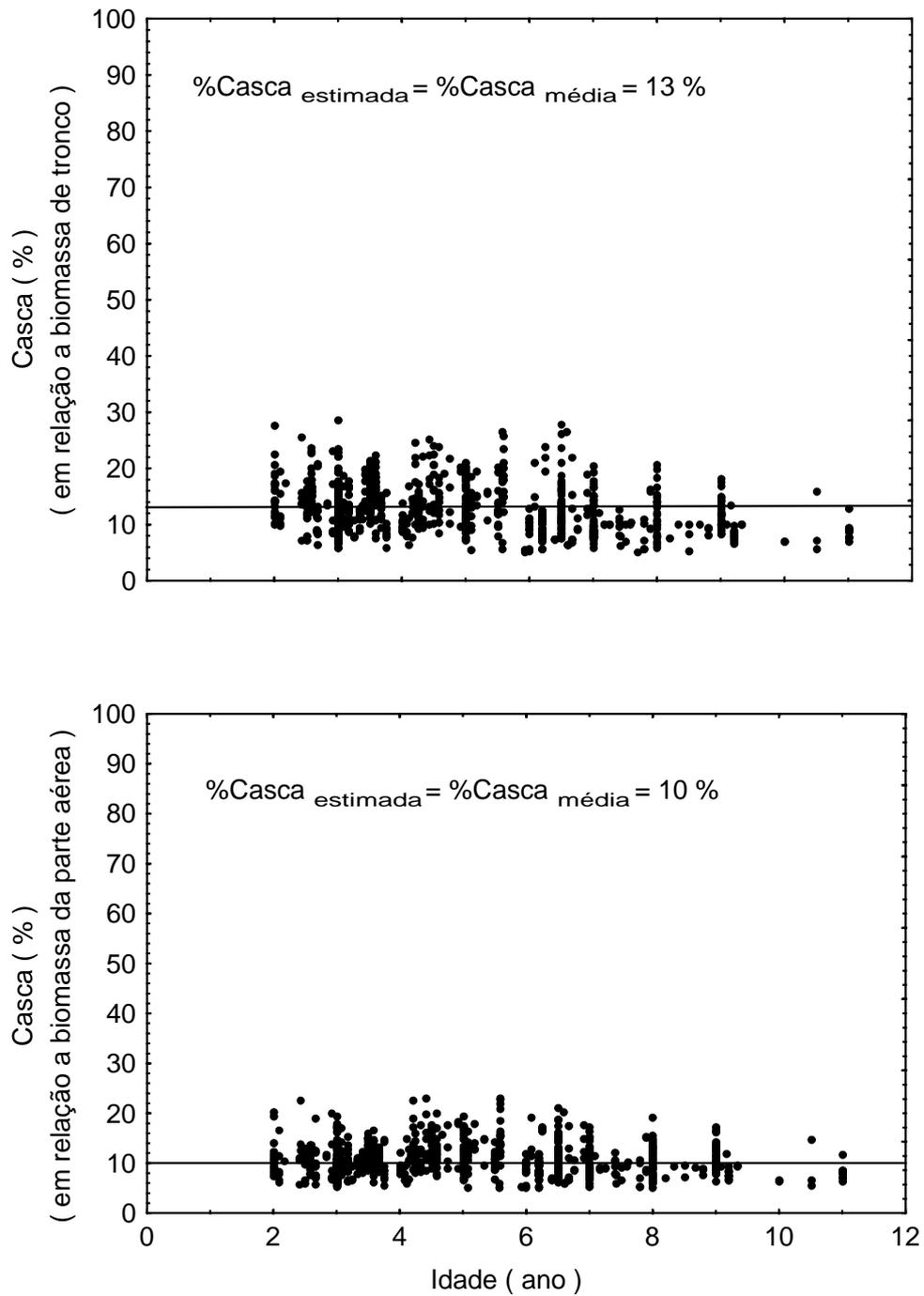


Figura 2 – Alocação de biomassa de casca em relação à biomassa da parte aérea e à biomassa de tronco, em plantios de eucalipto com idade variando entre 2 e 11 anos.

3.2. Concentração de nutrientes nos diferentes componentes da árvore

As concentrações médias de N, P, K e Mg foram mais altas nas folhas do que em outros componentes e menores no lenho, incluindo neste componente o Ca (Quadros 7 e 8). Maiores concentrações de Ca foram observadas na casca, em todas as faixas de idade. A maior concentração de nutrientes nas folhas é um fato comum em plantas, visto ser esse componente o mais ativo fisiológica e metabolicamente (MARSCHNER, 1997). Por outro lado, a maior concentração de Ca na casca de eucalipto tem sido constatada sistematicamente, conforme relatado por vários pesquisadores (BELLOTE et al., 1980; PEREIRA et al., 1984; LACLAU et al., 2000; SANTANA et al., 2000).

A concentração média nas folhas de N, P e Ca foi relativamente elevada em quaisquer das faixas de idade estudadas (Quadro 7), e o P e o Ca estão dentro da faixa de suficiência sugerida por GONÇALVES et al. (1996). Entretanto, as concentrações de K e Mg, em 75% dos casos, tendem a estar mais próximas aos valores inferiores da faixa de suficiência citada por esses autores, o que poderia indicar serem estes nutrientes aqueles para os quais deveria-se, em geral, ter maior preocupação quanto à possível deficiência em plantações de eucalipto no Brasil. Valores de concentração de K nas folhas, inferiores ao P_{25} , indicam uma grande probabilidade de resposta à aplicação do nutriente. Este fato tem, de certa forma, sido confirmado nas freqüentes respostas positivas que se têm obtido com a aplicação desse nutriente, em especial em solos que suportam mais de uma rotação de eucalipto (GAVA, 1997; STAPE e BENEDETTI, 1997; BARROS et al., 2000).

Para todos os nutrientes, à exceção do N, as concentrações nas folhas são mais baixas na faixa de idade de 4,01 a 6 anos e aumentam nas faixas de idade mais velhas (Quadro 7). A tendência de queda até o sexto ano é esperada, pois o efeito da adubação e calagem, em geral feitas próximo à época de plantio, é mais acentuado inicialmente e pode diminuir com o tempo, por sua diluição na biomassa e, também, em razão de as doses de nutrientes serem, em geral, menores do que a demanda das árvores. A tendência de aumento após o sexto ano advém do fato de os dados, nesta faixa de idade, serem provenientes em maior número da região central do Rio Grande do Sul e

do litoral norte do Espírito Santo, onde se obtêm produtividades elevadas (MELO et al., 1995; GRESPLAN, 1997).

O nitrogênio foi o nutriente cuja concentração média nas folhas reduziu com a idade ($r=-0,91$, $p<0,05$), sendo a taxa de decréscimo mais forte (8,9%) após o sexto ano, embora em valores considerados adequados. Este resultado está coerente com o fato de a maior proporção dos dados nessas idades ser proveniente de regiões com maior produtividade. Sabe-se que a demanda de N é maior em condições de alta produtividade, onde não se têm limitações de outros nutrientes. Portanto, nestas condições, a preocupação com a nutrição nitrogenada deve ser maior.

Dentre os dados utilizados neste estudo há uma boa proporção proveniente de condições onde, sabidamente, os solos têm baixa fertilidade e as respostas à adubação têm sido freqüentes. É o caso da região de Três Marias, Bom Despacho, Carbonita e Itamarandiba, no cerrado de Minas Gerais, e Angatuba, no Estado de São Paulo. A questão que se levanta é se as concentrações de nutrientes correspondentes a essas áreas não deveriam estar na faixa de deficiência. Na verdade, a concentração mínima (Quadro 7) de todos os nutrientes, assim como alguns correspondentes ao P_{25} , em todas as faixas de idade, está aquém dos níveis de suficiência. Por outro lado, a concentração, por si só, como indicadora de deficiência mineral nem sempre é perfeitamente confiável, em razão da possibilidade da ocorrência do efeito de diluição (JARREL e BEVERLY, 1981).

Quadro 7 – Estatísticas descritivas da concentração dos nutrientes na folha de eucalipto, com idade variando entre 0,5 e 10 anos

Nutriente	Classe de Idade (ano)									
	de 0,5 a 2,0 (100 dados)		de 2,01 a 4,0 (451 dados)		de 4,01 a 6,0 (201 dados)		de 6,01 a 8,0 (264 dados)		de 8,01 a 10,0 (55 dados)	
-----dag kg ⁻¹ -----										
	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)
N	2,20	0,061	2,20	0,020	2,14	0,033	1,95	0,026	1,96	0,031
P	0,11	0,004	0,11	0,001	0,10	0,003	0,12	0,002	0,12	0,003
K	0,67	0,024	0,66	0,013	0,64	0,020	0,79	0,016	0,83	0,032
Ca	0,66	0,023	0,63	0,010	0,50	0,011	0,70	0,014	0,68	0,022
Mg	0,25	0,008	0,26	0,004	0,25	0,005	0,28	0,004	0,30	0,008
	P_{25}	P_{75}	P_{25}	P_{75}	P_{25}	P_{75}	P_{25}	P_{75}	P_{25}	P_{75}
N	1,84	2,49	1,90	2,47	1,89	2,23	1,66	2,16	1,87	2,08
P	0,09	0,14	0,09	0,13	0,06	0,12	0,09	0,14	0,11	0,14
K	0,51	0,80	0,43	0,85	0,39	0,78	0,62	0,93	0,68	0,92
Ca	0,49	0,78	0,49	0,75	0,40	0,58	0,57	0,83	0,58	0,74
Mg	0,18	0,30	0,20	0,32	0,20	0,30	0,23	0,31	0,26	0,33
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
N	1,05	4,35	1,07	3,82	1,34	4,47	1,13	4,47	1,27	2,58
P	0,05	0,24	0,03	0,24	0,03	0,22	0,03	0,22	0,06	0,16
K	0,30	1,56	0,20	1,48	0,21	1,58	0,25	1,67	0,35	1,67
Ca	0,23	1,25	0,15	1,45	0,16	1,05	0,17	1,40	0,39	1,16
Mg	0,09	0,43	0,07	0,49	0,07	0,47	0,08	0,49	0,14	0,44

\bar{X} = média (%); $s_{\bar{X}}$ = erro-padrão da média; P_{25} = percentil 25; P_{75} = percentil 75; e *Max*, *Min* = concentração máxima e mínima observada.

Faixas de suficiência, dag kg⁻¹: N (1,3 – 1,8), P (0,09 – 0,14), K (0,9-1,3), Ca (0,6 - 1,0) e Mg (0,35 – 0,50) (GONÇALVES et al., 1996).

Quadro 8 – Média e erro-padrão da média da concentração dos nutrientes no galho, na casca e no lenho de eucalipto, com idade variando entre 0,5 e 10 anos

Nutriente	Classe de Idade (ano)									
	de 0,5 a 2,0 (100 dados)		de 2,01 a 4,0 (451 dados)		de 4,01 a 6,0 (201 dados)		de 6,01 a 8,0 (264 dados)		de 8,01 a 10,0 (55 dados)	
-----dag kg ⁻¹ -----										
	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)	(\bar{X})	($s_{\bar{X}}$)
Galhos										
N	0,43	0,015	0,45	0,008	0,41	0,009	0,38	0,007	0,39	0,008
P	0,05	0,002	0,05	0,001	0,03	0,001	0,05	0,001	0,05	0,003
K	0,38	0,014	0,31	0,007	0,28	0,010	0,38	0,012	0,43	0,022
Ca	0,71	0,034	0,44	0,009	0,38	0,016	0,55	0,017	0,69	0,031
Mg	0,09	0,004	0,09	0,002	0,09	0,004	0,12	0,003	0,14	0,007
Casca										
N	0,41	0,011	0,41	0,005	0,37	0,006	0,35	0,005	0,35	0,008
P	0,05	0,002	0,07	0,002	0,06	0,002	0,06	0,003	0,07	0,005
K	0,45	0,017	0,44	0,009	0,36	0,012	0,49	0,015	0,47	0,018
Ca	1,76	0,106	1,24	0,039	1,23	0,088	1,97	0,072	2,80	0,138
Mg	0,28	0,016	0,23	0,006	0,21	0,010	0,26	0,008	0,29	0,016
Lenho										
N	0,23	0,010	0,15	0,003	0,14	0,004	0,13	0,003	0,11	0,007
P	0,02	0,001	0,01	0,000	0,01	0,001	0,01	0,000	0,008	0,001
K	0,18	0,009	0,08	0,002	0,06	0,002	0,10	0,004	0,09	0,007
Ca	0,13	0,008	0,07	0,002	0,06	0,004	0,09	0,003	0,09	0,005
Mg	0,03	0,001	0,008	0,000	0,02	0,001	0,02	0,000	0,02	0,001

\bar{X} = média (%); $s_{\bar{X}}$ = erro-padrão da média.

As concentrações de nutrientes nas folhas são comumente utilizadas para prever a resposta à aplicação de fertilizantes (COMERFORD e FISHER, 1984), e por avaliar, de forma indireta, as variações de disponibilidade de nutrientes no solo, têm sido mais amplamente utilizadas para diagnose do que a concentração em outros órgãos. Em espécies florestais, por sua longevidade e pela altura das árvores, outros órgãos poderiam ser utilizados com vantagens para a determinação indireta dos conteúdos de nutrientes nas folhas para diagnose mineral, o que é uma operação bastante trabalhosa e com custos elevados (BELLOTE e SILVA, 2000). Os dados apresentados no Quadro 8 são incluídos, principalmente, para futura referência, caso outros componentes da árvore venham a ser utilizados para diagnose de deficiência mineral.

O emprego da concentração de nutrientes como método diagnóstico de deficiência nutricional, ou para recomendação de fertilizantes, pressupõe a existência de relação positiva entre concentração de nutrientes e crescimento. Ao relacionar a concentração de nutrientes na folha com a biomassa da parte aérea, observou-se uma grande dispersão dos pontos sem que uma tendência de relação significativa entre elas existisse (Figura 3). Tal fato pode ser decorrente das características dos dados, que foram provenientes de regiões muito distintas, de plantações com diversas idades, espécies envolvidas e época de amostragem das folhas. Por essas razões, objetivando eliminar o possível efeito dessas variáveis na relação concentração de nutrientes e biomassa, selecionaram-se dados de quatro regiões, em plantações entre dois e quatro anos, período em que a taxa de crescimento de eucalipto é elevada e, portanto, há maior demanda nutricional (GONÇALVES et al., 1997). Na região de Três Marias-MG, não foi observada nenhuma correlação significativa entre concentração de nutrientes e biomassa da parte aérea, e na região de Monte Dourado-PA, o Ca correlacionou-se negativamente com a biomassa. Somente para a região de Luiz Antônio-SP e Litoral Norte-ES obteve-se correlação significativa para mais de um nutriente (Quadro 9). Na região de Luiz Antônio-SP, o aumento de biomassa foi positivamente correlacionado com a concentração de K e de Ca nas folhas, seguindo a tendência esperada. Por outro lado, na região do Litoral Norte-ES, a correlação entre aqueles dois atributos foi negativa para todos os nutrientes considerados (Quadro 9).

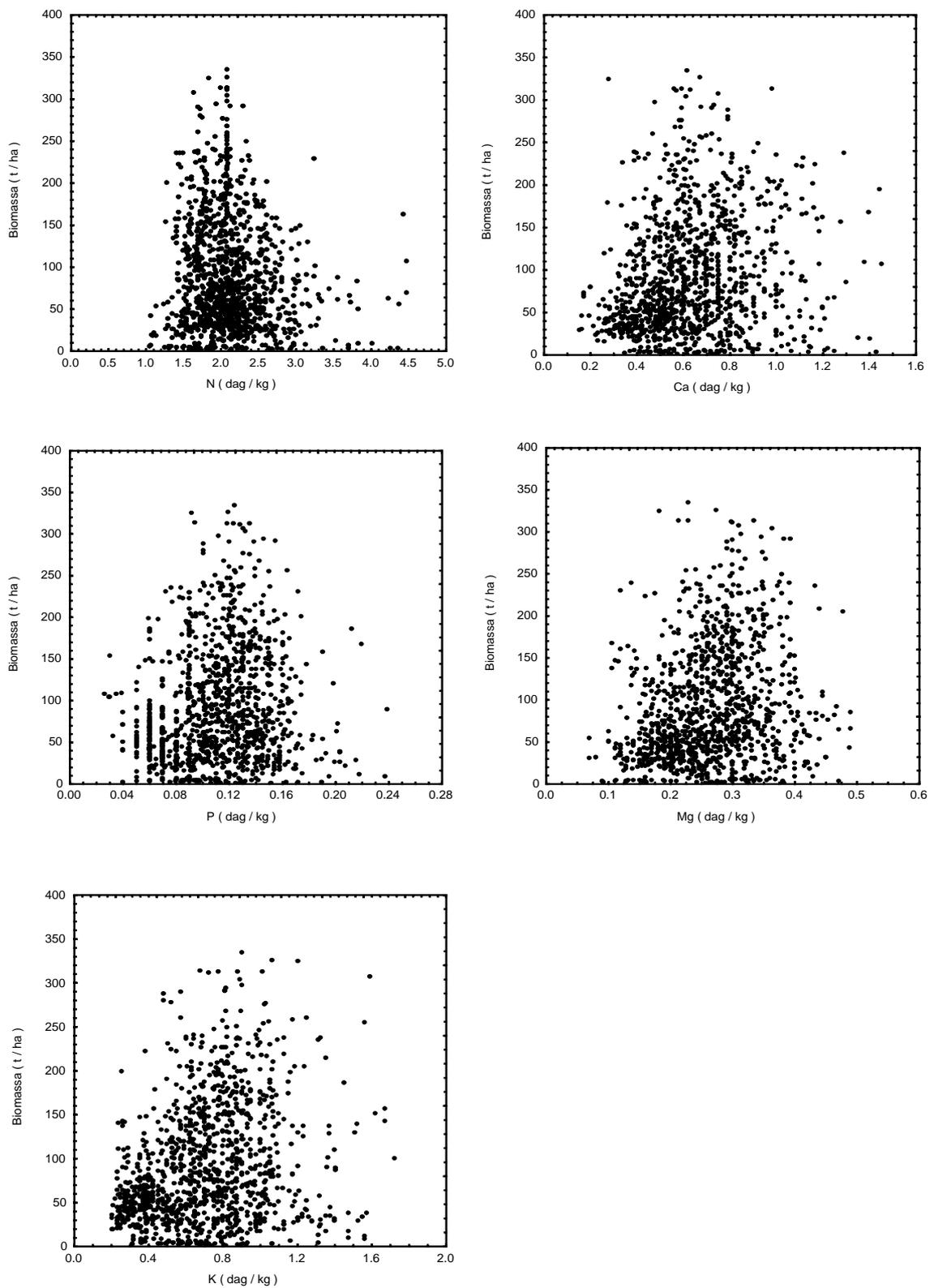


Figura 3 – Relação entre biomassa da parte aérea e concentração de nutrientes nas folhas de eucalipto, com idade variando entre 0,5 e 11 anos.

Neste caso, poderia ser argumentado, para o N, P e K, que, com o aumento do crescimento e o não-total suprimento da demanda desses nutrientes das árvores pelo solo, haveria uma diluição dos nutrientes na biomassa.

Situações como essa inviabilizam uma análise conclusiva sobre o estágio nutricional das árvores, tendo-se a concentração de nutrientes, e requerem informações ou dados adicionais para subsidiar a decisão sobre, por exemplo, aplicar ou não fertilizantes. Apesar de a análise química das folhas ser útil para diagnose de deficiência de nutrientes em outras espécies, a não-relação entre crescimento e concentração de nutrientes nas folhas de eucalipto tem sido registrada na literatura (CROMER, 1996; ARAÚJO et al., 2000), apesar de nessa situação ser possível obter respostas à aplicação de fertilizantes. Provavelmente, as principais razões para essa não-relação podem ser atribuídas às alterações do estágio nutricional da árvore decorrentes da ciclagem de nutrientes, cuja dinâmica é afetada pela idade. Por isto, a concentração dos nutrientes nas folhas representa a condição nutricional no momento da amostragem e a biomassa acumulada é resultante não só da condição nutricional mas, também, de outros fatores de crescimento ao longo dos anos. Procedimentos que consideram o crescimento e o conteúdo de nutrientes, como o descrito por SCATOLINE et al. (1997), ou os níveis foliares de um determinado nutriente e a produtividade (ARAÚJO et al., 2000), podem ser mais efetivos para determinar a quantidade de nutrientes a ser aplicada em plantações de eucalipto com eventual deficiência mineral, visto ser a relação entre conteúdo de nutrientes e produção bastante estreita (SANTANA et al., 1999).

Quadro 9 – Coeficientes de correlação linear entre a biomassa da parte aérea e a concentração de nutrientes nas folhas de eucalipto, entre dois e quatro anos de idade

Região	N	P	K	Ca	Mg	n ^o
Três Marias - MG	0,091	0,135	0,037	-0,117	-0,074	84
Luiz Antônio - SP	0,046	-0,069	0,475*	0,251*	0,168	93
Litoral Norte - ES	-0,461*	-0,532*	-0,348*	-0,498*	-0,092	44
Monte Dourado - PA	0,025	-0,060	0,089	-0,315*	0,082	144

n^o - número de observações e * - significativo a 5% de probabilidade.

3.3. Conteúdo de nutrientes nos diferentes componentes da árvore

As equações para estimar o conteúdo de cada nutriente na biomassa do lenho, do tronco e da parte aérea (Quadro 10), em geral, apresentaram coeficientes significativos a 1% de probabilidade e elevados valores de R^2 . As pressuposições estatísticas quanto à linearidade, homocedasticidade da variância, independência dos resíduos e normalidade foram satisfeitas. Além das pressuposições estatísticas, a validação de modelos de regressão é importante para verificar se os resultados são generalizáveis para a população, ou se são específicos ao conjunto de dados utilizados (HAIR et al., 1998). Assim, os conteúdos de nutrientes estimados pelo uso das equações foram comparados com os conteúdos médios observados (Quadro 11), para uma mesma biomassa da parte aérea. Observou-se igualdade estatística entre os valores observados e estimados para 66% dos casos avaliados (Quadro 12), e não houve nenhum caso indicando a não-validação dos valores estimados simultaneamente pelos três testes.

Quadro 10 – Equações para estimativa do conteúdo de nutrientes (kg/ha) na biomassa da parte aérea, do tronco e do lenho, para o eucalipto, em diferentes regiões do Brasil

	Equação	\bar{R}^2
N	$e^{(-0,62916 DX - 0,88154 DX1 + 0,77518 LnB - 0,02044 Ln(41+W) + 0,4335 LnT + 0,97597 LnPMS/LnP)}$	0,99
P	$e^{(-5,25609 - 0,52522 DX - 1,07605 DX1 + 0,74743 LnB - 0,06894 Ln(41+W) + 0,36925 LnT + 5,13666 LnPMS/LnP)}$	0,89
K	$e^{(-3,2875 - 0,39159 DX - 0,84712 DX1 + 0,79452 LnB - 0,01945 Ln(41+W) + 0,23861 LnT + 5,06753 LnPMS/LnP)}$	0,85
Ca	$e^{(-6,04274 - 0,24224 DX - 1,38063 DX1 + 0,90858 LnB + 0,01512 Ln(41+W) + 0,22817 LnT + 8,32776 LnPMS/LnP)}$	0,89
Mg	$e^{(-3,96257 - 0,4422 DX - 1,41166 DX1 + 0,78123 LnB + 0,03003 Ln(41+W) + 0,07991 LnT + 4,94793 LnPMS/LnP)}$	0,92

B = biomassa (t/ha) da parte aérea ou do tronco ou do lenho; *W* = disponibilidade potencial de água (mm); *T* = temperatura média anual ($^{\circ}$ C); *PMS* = precipitação nos seis meses secos (mm); *P* = precipitação média anual, mm; Para *N*, *P*, *K*, *Ca* ou *Mg* (*DX* = 0 e *DX1* = 0, conteúdo de nutriente na biomassa da parte aérea; *DX* = 1 e *DX1* = 0, conteúdo de nutriente na biomassa do tronco; *DX* = 0 e *DX1* = 1, conteúdo de nutriente na biomassa do lenho. Todos os coeficientes das equações, incluindo *B*₀, foram significativos a 1% de probabilidade, exceto o coeficiente da variável *LnT* na equação de *Mg*, que foi significativo a 8%).

Quadro 11 – Conteúdo médio de nutrientes observado e estimado para eucalipto, em sete diferentes regiões

Biomassa da Parte Aérea	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
t ha ⁻¹	-----kg ha ⁻¹ -----									
	Observado					Estimado ^{II}				
	Três Marias – TM									
5,5	48	4	24	21	6	31	3	15	14	4
24,6	136	10	68	64	18	99	9	49	53	13
43,0	164	14	82	83	23	152	14	76	88	20
66,5	226	17	91	77	27	214	20	108	130	29
83,5	238	18	163	96	38	255	23	129	160	34
103,8	329	23	147	124	44	302	27	154	195	41
	Litoral Norte – ES									
16,9	102	8	54	112	22	71	6	42	61	15
72,2	194	22	119	364	60	218	19	134	227	45
134,4	226	29	179	538	72	353	30	219	398	74
199,3	299	36	281	819	92	479	41	299	570	100
255,5	400	46	509	946	121	581	49	365	714	122
316,1	507	51	666	1177	147	685	57	432	866	144
	Depressão Central – RS									
103,7	160	35	131	249	62	244	30	243	610	95
132,0	200	31	222	414	81	295	36	294	760	114
155,2	252	32	229	716	111	334	40	334	880	130
183,8	299	43	294	852	125	381	46	382	1026	148
208,7	352	45	401	930	152	420	50	423	1152	163
233,1	417	41	515	1484	169	458	54	462	1274	178
	Guanhães – MG									
33,9	147	9	84	90	29	110	8	56	76	20
49,1	185	12	101	122	38	147	11	75	106	27
70,2	237	11	167	285	62	194	14	100	146	35
111,8	220	11	80	117	35	278	19	144	223	51
137,2	402	22	127	191	65	325	23	169	269	59
163,2	429	20	176	254	55	372	26	195	315	68
	Itapeva – SP									
8,8	66	3	36	80	14	40	4	28	43	11
41,9	149	5	53	134	29	133	13	97	179	36
80,8	219	9	90	187	36	221	22	163	326	60
117,0	394	8	134	275	64	294	28	219	456	80
150,6	418	10	201	351	73	358	34	268	574	97
183,3	450	11	244	490	92	417	40	313	686	113
	São José dos Campos – SP									
7,1	100	5	55	47	8	32	3	20	29	8
55,3	211	12	135	81	24	156	13	102	186	40
135,8	358	18	365	278	66	312	25	209	421	81
187,8	457	22	389	428	65	402	32	271	565	104
232,2	385	19	410	522	49	473	38	320	685	123
	Luiz Antônio – SP									
8,4	44	3	16	30	8	36	3	17	19	6
42,4	120	8	52	84	22	127	9	62	81	22
73,3	170	11	74	136	41	194	14	96	133	33
105,5	196	14	77	182	35	258	18	129	185	44
179,9	325	19	233	525	79	390	27	197	300	67

^{II} Pelo uso das equações apresentadas no Quadro 10.

Quadro 12 – Resultados obtidos ao aplicar o teste de validação¹¹ aos dados observados (Y_j) e estimados (Y_1), em sete diferentes regiões

Nutriente	$r_{Y_j X_1}$ ²¹	\bar{e} ³¹	F(H ₀) ⁴¹	t _e ⁵¹	$r_{Y_j X_1} \geq (1 - \bar{e})$?	Conclusão
Três Marias – MG						
N	0,984	-0,127	1,16 ^{ns}	-1,98 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,988	0,046	8,99 ^{ns}	0,57 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
K	0,938	-0,117	0,45 ^{ns}	-1,36 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Ca	0,938	0,247	6,82 ^{ns}	1,34 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Mg	0,984	-0,140	2,56 ^{ns}	-2,33 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Litoral Norte – ES						
N	0,977	0,298	16,83 ^{ns}	2,14 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,995	-0,005	7,74 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
K	0,950	-0,074	12,89 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Ca	0,998	-0,318	268,20 ^{**}	-9,44 ^{**}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
Mg	0,988	-0,078	0,61 ^{ns}	-1,15 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Depressão Central – RS						
N	0,994	0,315	72,20 ^{**}	4,72 ^{**}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
P	0,757	0,128	1,66 ^{ns}	1,95 ^{ns}	Não	$Y_j \neq X_{-1}$
K	0,967	0,315	35,05 ^{**}	2,32 ^{ns}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
Ca	0,962	0,469	32,59 ^{**}	2,00 ^{ns}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
Mg	0,996	0,237	152,98 ^{**}	3,02 ^{ns}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
Guanhães – MG						
N	0,918	-0,117	2,04 ^{ns}	-1,51 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,852	0,192	1,31 ^{ns}	1,50 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
K	0,505	0,041	0,17 ^{ns}	0,22 ^{ns}	Não	$Y_j \neq X_{-1}$
Ca	0,489	0,130	0,39 ^{ns}	0,64 ^{ns}	Não	$Y_j \neq X_{-1}$
Mg	0,575	-0,072	0,32 ^{ns}	-0,57 ^{ns}	Não	$Y_j \neq X_{-1}$
Itapeva – SP						
N	0,979	-0,161	5,30 ^{ns}	-2,72 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,962	1,189	59,00 ^{**}	5,07 ^{**}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
K	0,969	0,445	11,64 ^{ns}	2,72 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Ca	0,975	0,385	17,69 ^{ns}	2,12 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Mg	0,981	0,250	11,65 ^{ns}	2,18 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
São José dos Campos – SP						
N	0,944	-0,192	0,67 ^{ns}	-1,31 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,937	0,305	6,33 ^{ns}	1,33 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
K	0,971	-0,366	19,77 ^{ns}	-4,78 ^{**}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
Ca	0,986	0,412	12,89 ^{ns}	1,53 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Mg	0,843	0,601	2,89 ^{ns}	2,33 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Luiz Antônio – SP						
N	0,995	0,107	14,98 ^{ns}	1,31 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
P	0,997	0,221	57,19 ^{**}	3,05 ^{ns}	Sim	$Y_j \neq X_{-1}$
K	0,930	0,215	1,24 ^{ns}	1,56 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Ca	0,950	-0,167	15,56 ^{ns}	-1,76 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$
Mg	0,958	-0,068	1,04 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	Sim	$Y_j = X_{-1}$

¹¹ Proposto por LEITE e OLIVEIRA (2000), aplicados aos dados do Quadro 11, ²¹ coeficiente de correlação; ³¹ erro médio; ⁴¹ F de Graybill; ⁵¹ teste t para o erro médio; e ** e ^{ns}, significativo e não-significativo a 1%, respectivamente.

A biomassa apresentou relação positiva com a estimativa do conteúdo de nutriente, sendo a variável de maior peso para estimar o conteúdo destes, uma vez que apresentou o maior coeficiente beta entre as variáveis independentes. Relação positiva entre biomassa e conteúdo de nutrientes foi também obtida por vários pesquisadores (BARROS e NOVAIS, 1990; GONÇALVES, 1997; NOVAIS e BARROS, 1997; SANTANA et al., 1999). Entretanto, apesar da maior contribuição da biomassa para estimar o conteúdo de nutrientes, quando se têm, ao mesmo tempo, várias regiões em estudo, o seu uso isolado não foi suficiente para discriminar corretamente as variações do conteúdo de nutrientes das árvores, entre regiões. Por conseqüência, utilizaram-se outras variáveis independentes juntamente com a biomassa, para se ter uma melhor discriminação do conteúdo de nutrientes entre locais.

O modelo possui duas variáveis independentes relacionadas com a disponibilidade de água. A variável *PMS/P* avalia o efeito da precipitação dos seis meses de maior restrição hídrica e a variável *W* avalia a disponibilidade potencial de água nos 12 meses do ano. A variável *PMS/P* apresentou relação positiva com o conteúdo dos nutrientes estudados (Quadro 10), o que pode estar evidenciando que a maior disponibilidade de água implica em maior conteúdo de tais nutrientes, nas árvores de eucalipto. A variável *W* apresentou menor contribuição para a estimativa do conteúdo de todos os nutrientes, quando comparada com *PMS/P*. Observou-se comportamento diferenciado da estimativa do conteúdo de nutrientes em função da variável *W*. O Ca e o Mg apresentaram relação positiva e N, P e K apresentaram relação negativa com *W* (Quadro 10); esta relação negativa é biologicamente inesperada. Ressalta-se que a interpretação isolada de uma das variáveis independentes utilizadas para estimar o conteúdo de nutrientes em um modelo de regressão linear múltiplo pode, por si só, não fazer sentido biológico, mas ao apresentar significância estatística o seu poder preditivo, associado com as demais variáveis, leva a uma melhor estimativa do conteúdo de nutrientes.

Dentre as regiões estudadas, a maior discrepância entre o conteúdo de nutrientes estimado e observado foi constatada na região da Depressão Central-RS, onde, para todos os nutrientes, a relação foi de desigualdade (Quadro 12). Talvez esse efeito possa ser atribuído ao fato de, no Rio Grande do Sul, a maioria dos povoamentos de eucalipto estar estabelecida em solos

com maior reserva mineral (MELO et al., 1995) e com maior disponibilidade de nutrientes para as árvores.

O conteúdo de nutrientes na biomassa da parte aérea (B) foi diretamente proporcional à produção ($r_{NB} = 0,74$, $r_{PB} = 0,75$, $r_{KB} = 0,81$, $r_{CaB} = 0,84$, $r_{MgB} = 0,85$, $p < 0,01$), independentemente de material genético, região e idade. Os conteúdos de nutrientes estimados variaram entre regiões, o que reflete a capacidade produtiva das mesmas. Por exemplo, ao comparar o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea, entre a região de maior com a de menor conteúdo, aos 6,5 anos de idade, as diferenças foram de 266, 20, 192, 639 e 87 kg ha⁻¹, ou 2,2, 2,2, 2,8, 5,8 e 4,0 vezes superiores, respectivamente (Quadros de 13 a 15). De modo geral, o conteúdo de nutrientes das plantas foi menor nas regiões de menor disponibilidade de água. Nessas regiões, a menor disponibilidade de água, associada à alta demanda evaporativa, ocasiona *deficits* hídricos periódicos. A ação combinada desses fatores reduz a absorção e, conseqüentemente, o conteúdo de nutrientes e a biomassa. Resultados semelhantes foram obtidos por NAMBIAR (1990) e TURNER et al. (1996), em estudos desenvolvidos na Austrália.

As quantidades demandadas de nutrientes para suportar uma mesma biomassa em plantações de eucalipto permitem verificar se variações nas quantidades de nutrientes imobilizados na biomassa, entre regiões, dependem mais da produção de biomassa ou das condições de clima e solo de cada região. Assim, ao fixar a biomassa da parte aérea em 100 t ha⁻¹, para as diferentes regiões, observaram-se variações na quantidade de nutrientes nela imobilizados (Quadro 16). As maiores variações entre as quantidades de nutrientes foram observadas para o Ca e Mg. Por outro lado, o N foi o nutriente que menos variou, apresentando um coeficiente de variação, entre regiões, de apenas 5,3%. Apesar das diferentes condições ambientais entre regiões, a variação dos conteúdos de nutrientes na biomassa não foi ampla. Para N, P e K o coeficiente de variação foi inferior a 20%, entre regiões, sendo o maior coeficiente de variação observado de 38,2% para Ca.

Quadro 13 – Estimativas de biomassa¹ e de conteúdo² de nitrogênio em plantios de eucalipto com diferentes idades, para diferentes regiões

Região	Idade (ano)								
	4,5			6,5			8,5		
	Parte Aérea	Tronco	Lenho	Parte Aérea	Tronco	Lenho	Parte Aérea	Tronco	Lenho
	-----Biomassa (t ha ⁻¹)-----								
Três Marias – MG	41	37	32	68	63	55	98	92	80
Lençóis Paulista – SP	57	51	44	94	87	76	136	128	112
Luiz Antônio – SP	61	54	47	100	93	81	144	136	119
Carbonita – MG	63	57	49	105	97	85	151	143	124
Itamarandiba – MG	63	57	49	105	97	85	151	143	124
Bom Despacho – MG	70	63	55	116	108	94	168	158	138
Paraopeba – MG	70	63	55	116	108	94	168	158	138
Itapetininga – SP	75	67	58	123	114	100	178	168	146
Angatuba – SP	75	67	58	123	114	100	178	168	146
Depressão Central – RS	81	73	63	134	124	108	194	183	159
Guanhães – MG	75	67	58	124	115	100	178	168	146
Viçosa – MG	76	68	59	126	117	102	182	171	149
Timóteo – MG	82	74	64	135	126	109	195	184	160
São Miguel Arcanjo – SP	88	79	69	146	135	117	210	198	172
Itapeva – SP	88	79	69	146	135	117	210	198	172
Ipatinga – MG	86	77	67	141	131	114	204	192	167
Litoral Norte – ES	87	78	68	144	134	117	208	197	171
São José dos Campos – SP	94	84	73	155	143	125	223	211	183
Paraibuna – SP	95	85	74	157	146	127	227	214	186
Monte Dourado – PA	122	109	95	201	187	162	290	274	238
	-----Nitrogênio (kg ha ⁻¹)-----								
Três Marias – MG	147	72	50	217	109	76	288	147	103
Lençóis Paulista – SP	166	81	57	245	123	86	325	166	116
Luiz Antônio – SP	167	82	57	247	124	87	328	167	117
Carbonita – MG	184	90	63	271	137	95	361	184	128
Itamarandiba – MG	184	90	63	271	137	95	361	184	128
Bom Despacho – MG	190	93	65	280	141	98	372	190	132
Paraopeba – MG	190	93	65	280	141	98	372	190	132
Itapetininga – SP	202	99	69	297	150	104	395	201	140
Angatuba – SP	202	99	69	297	150	104	395	201	140
Depressão Central – RS	202	99	69	298	150	105	396	202	141
Guanhães – MG	203	100	69	300	151	105	399	203	142
Viçosa – MG	197	96	67	291	146	102	386	197	137
Timóteo – MG	215	106	74	318	160	111	422	215	150
São Miguel Arcanjo – SP	236	116	81	349	175	122	463	236	165
Itapeva – SP	236	116	81	349	175	122	463	236	165
Ipatinga – MG	227	111	78	335	169	118	445	227	158
Litoral Norte – ES	253	124	86	373	188	131	496	253	176
São José dos Campos – SP	234	115	80	346	174	121	459	234	163
Paraibuna – SP	238	117	81	352	177	123	467	238	166
Monte Dourado – PA	327	160	112	483	243	169	642	327	228

¹ e ² Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas na Figura 1 e no Quadro 10, respectivamente. Para biomassa, considerou-se que o lenho corresponde a 87% da biomassa de tronco; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

Quadro 14 – Estimativas do conteúdo¹¹ de fósforo e potássio em plantios de eucalipto com diferentes idades, para diferentes regiões

Região	Idade (ano)								
	Parte Aérea	4,5 Tronco	Lenho	Parte Aérea	6,5 Tronco	Lenho	Parte Aérea	8,5 Tronco	Lenho
----- kg ha ⁻¹ -----									
Fósforo									
Três Marias – MG	14	8	4	20	11	6	26	15	8
Lençóis Paulista – SP	13	7	4	19	11	6	25	14	8
Luiz Antônio – SP	12	6	3	17	10	5	23	13	7
Carbonita – MG	14	8	4	20	11	6	27	15	8
Itamarandiba – MG	14	8	4	20	11	6	27	15	8
Bom Despacho – MG	13	7	4	19	10	5	25	14	7
Paraopeba – MG	13	7	4	19	10	5	25	14	7
Itapetininga – SP	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Angatuba – SP	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Depressão Central – RS	25	14	7	36	20	10	47	27	14
Guanhães – MG	14	8	4	21	12	6	27	16	8
Viçosa – MG	13	7	4	19	11	6	25	14	7
Timóteo – MG	16	9	5	23	13	7	31	17	9
São Miguel Arcanjo – SP	23	13	7	34	19	10	44	25	13
Itapeva – SP	23	13	7	34	19	10	44	25	13
Ipatinga – MG	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Litoral Norte – ES	22	12	6	32	18	9	42	24	12
São José dos Campos – SP	19	11	5	28	16	8	37	21	11
Paraibuna – SP	20	11	6	28	16	8	37	21	11
Monte Dourado – PA	26	14	7	37	21	11	49	28	14
Potássio									
Três Marias – MG	73	46	26	109	70	40	146	95	54
Lençóis Paulista – SP	89	55	31	132	84	48	177	114	65
Luiz Antônio – SP	83	51	29	123	79	45	165	107	61
Carbonita – MG	94	58	33	140	89	51	188	121	69
Itamarandiba – MG	94	58	33	140	89	51	188	121	69
Bom Despacho – MG	93	58	33	139	88	50	186	120	68
Paraopeba – MG	93	58	33	139	88	50	186	120	68
Itapetininga – SP	125	77	44	186	119	67	249	161	91
Angatuba – SP	125	77	44	186	119	67	249	161	91
Depressão Central – RS	200	124	70	298	190	108	398	257	146
Guanhães – MG	105	65	37	156	99	56	209	135	76
Viçosa – MG	100	62	35	149	95	54	199	129	73
Timóteo – MG	122	76	43	182	116	66	244	158	89
São Miguel Arcanjo – SP	175	109	62	261	166	94	349	225	128
Itapeva – SP	175	109	62	261	166	94	349	225	128
Ipatinga – MG	128	79	45	191	121	69	255	165	94
Litoral Norte – ES	156	96	55	232	148	84	310	200	114
São José dos Campos – SP	156	96	55	232	148	84	310	200	114
Paraibuna – SP	158	98	56	236	150	85	315	203	116
Monte Dourado – PA	202	125	71	301	192	109	403	260	148

¹¹ Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no Quadro 10; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

Quadro 15 – Estimativas do conteúdo¹¹ de cálcio e magnésio em plantios de eucalipto com diferentes idades, para diferentes regiões

Região	Idade (ano)								
	Parte Aérea	4,5		Parte Aérea	6,5		Parte Aérea	8,5	
		Tronco	Lenho		Tronco	Lenho		Tronco	Lenho
----- kg ha ⁻¹ -----									
Cálcio									
Três Marias – MG	84	60	17	132	97	27	185	138	39
Lençóis Paulista – SP	122	87	25	193	142	40	269	201	57
Luiz Antônio – SP	112	79	22	176	129	36	246	183	52
Carbonita – MG	130	93	26	206	151	43	287	214	60
Itamarandiba – MG	130	93	26	206	151	43	287	214	60
Bom Despacho – MG	131	93	26	207	152	43	289	215	61
Paraopeba – MG	131	93	26	207	152	43	289	215	61
Itapetininga – SP	211	150	42	333	244	69	464	346	98
Angatuba – SP	211	150	42	333	244	69	464	346	98
Depressão Central – RS	489	347	98	771	565	160	1076	801	226
Guanhães – MG	155	110	31	244	179	51	341	254	72
Viçosa – MG	149	106	30	235	172	49	328	244	69
Timóteo – MG	201	143	40	317	232	66	442	329	93
São Miguel Arcanjo – SP	352	250	71	556	407	115	775	577	163
Itapeva – SP	352	250	71	556	407	115	775	577	163
Ipatinga – MG	211	150	42	333	244	69	465	346	98
Litoral Norte – ES	269	192	54	425	312	88	593	442	125
São José dos Campos – SP	300	213	60	473	347	98	660	492	139
Paraibuna – SP	306	217	61	482	354	100	673	501	142
Monte Dourado – PA	393	279	79	620	455	128	865	645	182
Magnésio									
Três Marias – MG	20	12	4	29	18	6	39	24	8
Lençóis Paulista – SP	29	17	6	43	26	9	57	35	12
Luiz Antônio – SP	29	17	6	42	26	9	56	35	12
Carbonita – MG	31	18	6	46	28	10	61	38	13
Itamarandiba – MG	31	18	6	46	28	10	61	38	13
Bom Despacho – MG	33	19	7	49	30	10	65	40	14
Paraopeba – MG	33	19	7	49	30	10	65	40	14
Itapetininga – SP	45	26	9	66	40	14	88	54	18
Angatuba – SP	45	26	9	66	40	14	88	54	18
Depressão Central – RS	78	46	16	116	70	24	154	95	32
Guanhães – MG	37	22	7	55	33	11	73	45	15
Viçosa – MG	37	22	7	55	33	11	73	45	15
Timóteo – MG	45	27	9	66	40	14	88	54	19
São Miguel Arcanjo – SP	64	38	13	94	57	19	126	77	26
Itapeva – SP	64	38	13	94	57	19	126	77	26
Ipatinga – MG	47	28	9	69	42	14	92	56	19
Litoral Norte – ES	53	31	11	78	47	16	104	64	22
São José dos Campos – SP	60	36	12	89	54	18	119	73	25
Paraibuna – SP	61	36	12	91	55	19	121	74	25
Monte Dourado – PA	74	44	15	110	66	23	146	90	31

¹¹ Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no Quadro 10; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

Quadro 16 – Estimativa do conteúdo¹¹ de N, P, K, Ca e Mg na biomassa da parte aérea de eucalipto, para a produção de 100 t ha⁻¹, para diferentes regiões

Região	N	P	K	Ca	Mg
	-----kg 100t ⁻¹ ha ⁻¹ -----				
Três Marias – MG	293	27	149	188	40
Lençóis Paulista – SP	256	20	139	204	45
Luiz Antônio – SP	247	17	123	176	42
Carbonita – MG	262	20	135	197	44
Itamarandiba – MG	262	20	135	197	44
Bom Despacho – MG	250	17	123	181	43
Paraopeba – MG	250	17	123	181	43
Itapetininga – SP	253	21	157	275	56
Angatuba – SP	253	21	157	275	56
Depressão Central – RS	238	29	236	590	92
Guanhães – MG	255	18	132	202	46
Viçosa – MG	243	16	124	191	46
Timóteo – MG	251	19	143	241	52
São Miguel Arcanjo – SP	261	25	194	395	70
Itapeva – SP	261	25	194	395	70
Ipatinga – MG	256	19	145	243	53
Litoral Norte – ES	281	24	173	304	58
São José dos Campos – SP	246	20	164	319	63
Paraibuna – SP	248	20	164	320	64
Monte Dourado – PA	281	22	173	329	63
Média	257,3	21,8	154,2	270,2	54,5
CV (%)	5,3	16,9	19,0	38,2	23,9

¹¹ Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no Quadro 10; parte aérea = folha + galho + casca + lenho.

A determinação de nutrientes absorvidos ao longo dos anos é importante para definir a fase de maior demanda e, eventualmente, decidir-se pela fase mais crítica da fertilização. Observa-se que a distribuição relativa de todos os nutrientes na parte aérea aumentou linearmente e, praticamente, não houve alteração em função da idade, seguindo a mesma tendência da distribuição de biomassa (Figura 4), e que, aproximadamente, 70% da demanda de todos os nutrientes já estava acumulada até a idade de 4,5 anos, quando foi considerado um ciclo de corte de 6,5 anos. De modo geral, em eucalipto a ciclagem bioquímica torna-se mais expressiva a partir de, aproximadamente, 4,5 anos de idade, pois nesta idade as copas estão totalmente desenvolvidas e a ciclagem de nutrientes contribui expressivamente para a demanda nutricional (GONÇALVES et al., 2000), reduzindo, assim, a pressão sobre as reservas do solo. Segundo MILLER (1995), após o estabelecimento da ciclagem bioquímica, até 66% da demanda nutricional dos nutrientes considerados móveis pode ser suprida pela retranslocação, o que reduz a probabilidade de resposta à fertilização.

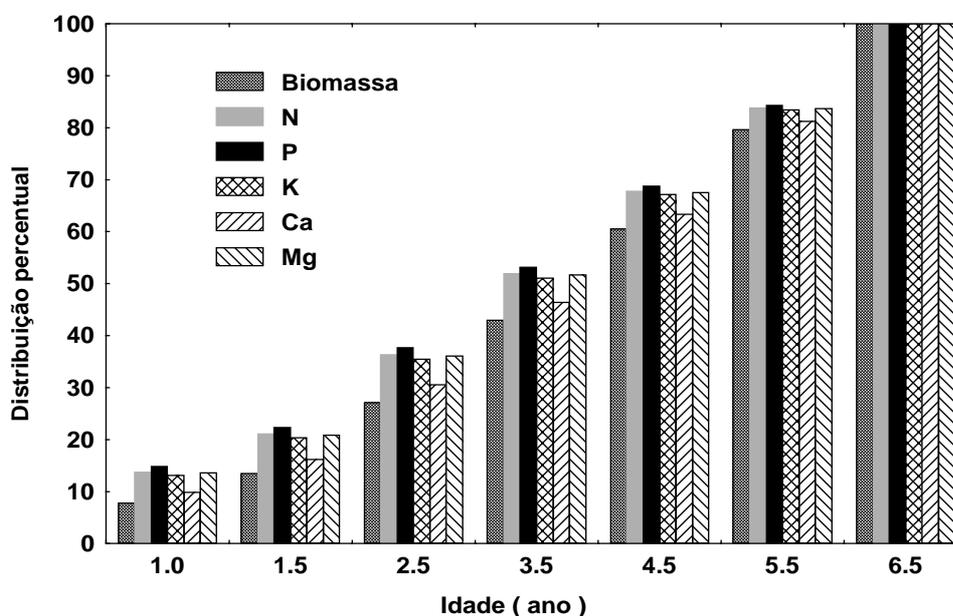


Figura 4 – Distribuição relativa de biomassa e de nutrientes na parte aérea de eucalipto no Brasil, em função da idade, assumindo 6,5 anos como idade de corte.

Transformando o conteúdo de nutrientes da planta em unidade de análise de solo, observa-se que a fertilidade do solo deveria ter sido mais elevada nas regiões mais produtivas (Quadro 17). Os teores de K, Ca e Mg observados para a região de Três Marias-MG, com produtividade de $19,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, estão abaixo dos valores de níveis críticos considerados adequados para uma produtividade de $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para a camada de 0 a 20 cm de solo, num ciclo de corte de dez anos, sugeridos por NOVAIS et al. (1986). Este comportamento foi observado nas sete regiões de menor produtividade. Ao considerar apenas o K e Ca, observou-se que 13 das 20 regiões possuem teores inferiores ao do nível crítico de manutenção. Por conseguinte, o nível crítico de manutenção, ou seja, o teor de nutrientes no solo abaixo do qual há possibilidade de média à alta resposta à fertilização de manutenção, indica que os plantios de eucalipto dessas regiões, provavelmente, responderão à aplicação de tais nutrientes. Ressalta-se que neste trabalho foi considerado que todo o nutriente na planta, transformado em unidade de análise de solo, pode ser absorvido. No outro extremo, na região de Monte Dourado-PA, com produtividade de $57,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, os teores de nutrientes estão acima dos níveis críticos de manutenção, o que pode estar evidenciando baixa resposta à aplicação desses nutrientes. Em 16 das 20 regiões, os teores observados para o K são inferiores ao do nível crítico de manutenção, o que é coerente com as concentrações de K nas folhas, que tendem a estar em valores mais próximos aos valores inferiores das faixas de suficiência (Quadro 7). Portanto, para manutenção de elevadas taxas de crescimento de eucalipto, especialmente em solos que suportam mais de uma rotação, resposta à fertilização potássica deverá ocorrer.

O conhecimento da alocação de nutrientes nos componentes das plantas permite ao manejador florestal optar por técnicas de colheita que reduzam a exportação de nutrientes do sítio. Neste estudo, a alocação diferiu entre os componentes e entre os nutrientes. O conteúdo de nutrientes na copa variou de 108 a 240 kg ha^{-1} para N, de 7 a 16 para P, de 39 a 109 para K, de 35 a 206 para Ca e de 11 a 46 para Mg, considerando um ciclo de corte de 6,5 anos (Quadros de 13 a 15). Em média, a alocação de N, P, K, Ca e Mg na copa foi de 50, 44, 36, 27 e 39%, respectivamente, em relação à quantidade da biomassa da parte aérea (Quadro 18). Com o aumento da idade, nota-se

tendência de redução da proporção de cada nutriente alocado na copa e aumento dos nutrientes alocados no tronco. Este resultado mostra a sensibilidade do modelo adotado a uma variação biológica conhecida, pois com o aumento da idade a proporção de copa reduz e a de tronco, aumenta.

Quadro 17 – Biomassa e volume do tronco de eucalipto e concentração de P, K, Ca e Mg no solo, aos 6,5 anos de idade, de acordo com a região de cultivo

Região	IMA		Nutriente ²¹			
	Biomassa	Volume ²¹	P	K	Ca	Mg
	t ha ⁻¹ ano ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³	
Três Marias – MG	9,7	19,4	5,6	35	0,24	0,07
Lençóis Paulista – SP	13,4	26,8	5,4	42	0,35	0,11
Luiz Antônio – SP	14,3	28,6	4,8	39	0,32	0,11
Carbonita – MG	14,9	29,8	5,7	45	0,38	0,11
Itamarandiba – MG	14,9	29,8	5,7	45	0,38	0,11
Bom Despacho – MG	16,6	33,2	5,2	44	0,38	0,12
Paraopeba – MG	16,6	33,2	5,2	44	0,38	0,12
Itapetininga – SP	17,5	35,1	6,9	59	0,61	0,16
Angatuba – SP	17,5	35,1	6,9	59	0,61	0,16
Depressão Central – RS	19,1	38,2	10,0	95	1,41	0,29
Guanhães – MG	17,7	35,4	5,8	50	0,45	0,14
Viçosa – MG	18,0	36,0	5,3	47	0,43	0,14
Timóteo – MG	19,4	38,8	6,5	58	0,58	0,17
São Miguel Arcanjo – SP	20,8	41,5	9,4	83	1,02	0,24
Itapeva – SP	20,8	41,5	9,4	83	1,02	0,24
Ipatinga – MG	20,2	40,3	6,9	61	0,61	0,17
Litoral Norte – ES	20,6	41,2	8,9	74	0,78	0,19
São José dos Campos – SP	22,0	44,0	7,8	74	0,87	0,22
Paraibuna – SP	22,5	44,9	7,9	75	0,88	0,23
Monte Dourado – PA	28,8	57,5	10,4	96	1,13	0,27

²¹ Relação matéria seca volume = 0,5; ²² nutrientes na biomassa do tronco, transformados em unidade de análise de solo, considerando a profundidade de solo de 0 a 20 cm, densidade igual a 1 e uma recuperação de 100% do nutriente pelas árvores; os valores em negrito estão abaixo do nível crítico de manutenção sugeridos por NOVAIS et al. (1986).

Quadro 18 – Alocação percentual média de biomassa da parte aérea e de nutrientes nos diferentes componentes da árvore em plantios de eucalipto no Brasil, de acordo com a idade do povoamento

	Idade	Copa ¹	Tronco ¹	Lenho ¹	Casca ²
	ano	-----%-----			
Biomassa	4,5	10	90	78	13
	6,5	7	93	81	13
	8,5	6	94	82	13
Nitrogênio	4,5	51	49	34	31
	6,5	50	50	35	30
	8,5	49	51	36	30
Fósforo	4,5	45	55	29	47
	6,5	44	56	29	48
	8,5	43	57	30	47
Potássio	4,5	38	62	35	43
	6,5	36	64	36	43
	8,5	35	65	37	43
Cálcio	4,5	29	71	20	72
	6,5	27	73	21	72
	8,5	26	74	21	72
Magnésio	4,5	41	59	20	66
	6,5	39	61	21	66
	8,5	38	62	21	66

Biomassa da parte aérea = folha + galho + casca + lenho; tronco = casca + lenho; e copa = folha + galho.
¹ percentagem em relação à biomassa da parte aérea e ² percentagem em relação à biomassa de tronco.

A biomassa da casca representa, em média, 13% da biomassa do tronco. Entretanto, contém 72% de Ca, 66% de Mg, 47% de P, 43% de K e 30% de N do total de nutrientes exportados do sítio pela colheita do tronco (Quadro 18). Considerando um ciclo de corte de 6,5 anos (Quadros de 13 a 15), a amplitude de variação do conteúdo de nutrientes na casca foi, em kg ha⁻¹, de 70 a 405 (Ca), de 12 a 46 (Mg), de 5 a 10 (P), de 30 a 83 (K) e de 33 a 74 (N). A casca do eucalipto desempenha importante papel no ciclo biogeoquímico, por ser forte dreno de nutrientes e por ser normalmente retirada do sítio pela colheita florestal. O valor máximo de Ca na casca, anteriormente citado, equivale a 1 cmol_c dm⁻³ de Ca no solo, considerando um solo com profundidade de 0 a 20 cm. Estudos em vários ecossistemas têm demonstrado expressiva redução no cálcio trocável do solo, em virtude de sua absorção pelas florestas (ALBAN, 1982; BINKLEY, 1989; FEDERER et al., 1989; JOHNSON, 1994; MIRANDA et al., 1998). Para condições de clima tropical com solos altamente intemperizados, a exportação de nutrientes pode

comprometer a produtividade futura em sítios pobres neste nutriente, se um correto manejo florestal e do solo não for adotado.

A imobilização de maior proporção de nutrientes na biomassa pode ser considerada como um mecanismo de conservação de nutrientes em florestas tropicais (JORDAN, 1985). Esta imobilização pode evitar a perda por erosão e lixiviação (CUEVAS e LUGO, 1998) e contribui para aumentar o teor de nutrientes das camadas superficiais do solo, visto que o sistema radicular do eucalipto explora camadas profundas do perfil e pode realocar os nutrientes para as camadas superficiais. A intensidade da colheita florestal adotada determina a quantidade de nutrientes exportados do sítio. Admitindo-se um ciclo de 6,5 anos, no tronco estão contidos 50% de N, 56% de P, 64% de K, 73% de Ca e 61% de Mg da biomassa aérea. Estes percentuais podem ser sensivelmente reduzidos se ocorrer o descascamento no campo (Quadro 18). A colheita apenas do lenho é ecologicamente mais correta para as condições tropicais de solos altamente intemperizados; quanto mais pobre for o solo mais relevante será a permanência da casca, o que contribuirá para manter a qualidade e a capacidade produtiva dos solos.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivos construir um modelo para estimar a biomassa de plantações de eucalipto com diferentes idades e em diferentes regiões; construir um modelo para estimar o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na biomassa do tronco, do lenho e da parte aérea de eucalipto, em diferentes regiões, e avaliar o efeito de algumas características climáticas (disponibilidade potencial de água, temperatura média anual e proporção da quantidade de água disponível nos meses secos em relação à precipitação anual), sobre tal estimativa; e avaliar o impacto da intensidade de colheita na exportação desses nutrientes. Utilizou-se o banco de dados do Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, que reúne informações sobre biomassa e nutrientes em plantações de eucalipto em várias condições edáficas e climáticas brasileiras. Utilizaram-se 1.217 árvores-amostra, provenientes de 20 regiões dos Estados do Pará, Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul.

Foram construídos dois modelos, um para produção de biomassa e outro para o conteúdo de nutrientes. As equações geradas forneceram estimativas satisfatórias da produção e do conteúdo de nutrientes para o eucalipto no Brasil.

A inclusão das características climáticas nos modelos foi fundamental para distinguir o acúmulo de biomassa e de nutrientes entre as diferentes regiões. De modo geral, as variáveis climáticas utilizadas relacionaram-se

positivamente com a produção de biomassa e com o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg nela contidos.

Não houve relação entre a concentração de nutrientes nas folhas e a produção de biomassa da parte aérea.

A maior proporção de todos os nutrientes (de 63 a 69 %) na biomassa acumulou-se até a idade de 4,5 anos, quando foi considerado um ciclo de corte de 6,5 anos.

Cerca de 75 % de N, P, K, Ca e Mg estão em outros componentes da parte aérea da árvore, e não no lenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAN, D.H. Effects of nutrient accumulation by aspen, spruce, and pine on soil properties. **Soil Science of America Journal**, v.46, p.853-861, 1982.
- ARAÚJO, E.F., SOUZA, A.J., SILVEIRA, R.L.V.A. Método da matriz de avaliação nutricional para monitoramento de clones de *Eucalyptus* na região Sul da Bahia. In: Fertibio 2000, 2000, Santa Maria, RS: **Anais...** (CD – ROM).
- ATTIWILL, P.M. Nutrient cycling in a *Eucalyptus obliqua* (L'Hérit.) forest. IV nutrient uptake and nutrient return. **Australian Journal of Botany**, v.28, p.199-222, 1980.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. 330p.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M., ADAMS, M.A. (Eds.). **Nutrition of eucalyptus**. Collingwood, VIC: CISRO, 1996. p.335-356.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., NEVES, J.C.L. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M., BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.269-286.
- BELLOTE, A.F.J. **Concentração, acúmulo e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill (ex-Maiden) em função da idade**. Piracicaba: ESALQ, 1979. 129p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 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. **Revista IPEF**, v.20, p.1-23, 1980.

- BELLOTE, A.F.J., SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J.L.M., BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.105-134.
- BINKLEY, D. Contributing to 20-yr decrease in soil ph in an old-field plantation of loblolly pine. **Biogeochemistry**, v.8, p.39-54, 1989.
- BLAKE, T.J., TSCHAPLINSKI, T.J. Water relations. In: MITCHELL, J.B., ROBERTSON, F., HINCKLEY, T., FORSSE, L.S. (Eds.). **Ecophysiology of short rotation forest crops**. New York: Elsevier Applied Science, 1992. p.66-94.
- BRADFORD, K.J., HSIAO, T.C. Physiological responses to moderate water stress. In: LANGE, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.B., ZIEGLER, H. (Eds.). **Physiological plant ecology: II water relations and carbon assimilation**. Berlin: Springer-Verlag, 1982. p.263-324.
- CARLYLE, J.C. Relationships between nitrogen uptake, leaf area, water status and growth in an 11-year-old *Pinus radiata* plantation in response to thinning, thinning residue, and nitrogen fertilizer. **Forest Ecology and Management**, v.108, p.41-55, 1998.
- COMERFORD, N.B., FISHER, R.F. Using foliar analysis to classify nitrogen-deficient sites. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.910-913, 1984.
- COSTA, L.M. Manejo de solos em áreas reflorestadas. In: BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. (Ed.) **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG, Editora Folha de Viçosa, 1990. p.237-264.
- CROMER, R.N. Silviculture of eucalypt plantations in Austrália. In: ATTIWILL, P.M., ADAMS, M.A. (Eds.). **Nutrition of eucalyptus**. Collingwood, VIC: CISRO, 1996. p.259-273.
- CROMER, R.N., WILLIAMS, E.R. Biomass and nutrient accumulation in a planted *E. globulus* (Labill.) fertilizer trial. **Australian Journal of Botany**, v.30, p.265-278, 1982.
- CUEVAS, E., LUGO, A.E. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. **Forest Ecology and Management**, v.112, p.263-279. 1998.
- DULEY, F.L., RUSSELL, J.C. The use of crop residues for soil and moisture conservation. **Journal American Society of Agronomy**, v.31, p.703-709, 1939.
- ELDRIDGE, K., DAVIDSON, J., HARWOOD, C., WYK, G.V. **Eucalypt domestication and breeding**. New York: Oxford University, 1994. 288p.

- ESSER, G. The significance of biospheric carbon pools and fluxes for the atmospheric CO₂: a proposed model structure. **Progress in Biometeorology**, v.3, p.253-294, 1984.
- EVANS, J. **Sustainability of forest plantations: the evidence**. London, UK: Department for International Development, 1999. 64p.
- FEDERER, C.A., HORNBECK, J.W., TRITTON, L.M., MARTIN, C.W., PIERCE, R.S., SMITH, C.T. Long-term depletion of calcium and other nutrients in eastern U.S. forests. **Environmental Management**, v.13, p.593-601, 1989.
- GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Serie Técnica IPEF**, v.11, n.30, p.84-94, 1997.
- GONÇALVES, J.L.M., RAIJ, B.V., GONÇALVES, J.C. Florestais. In: RAIJ, B.V., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Piracicaba, SP: IAC, 1996. p.147-259 (Boletim técnico, n.100).
- GONÇALVES, J.L.M., BARROS, N.F., NAMBIAR, E.K.S., NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, E.D.S., BROWN, A.G. (Eds.) **Management of soil nutrients and water in tropical plantations forest**. Canberra, Austrália: ACIAR, 1997. p.379-418. (Monograph n.43).
- GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., BENEDETTI, V., FESSEL, V.A.G., GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M., BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.1-49.
- GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model**. Massachusetts: Ouxburg Press, 1976. 704 p.
- GRESPLAN, S. L. **Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características dos solos**. Viçosa, MG, 1987. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- HAIR, J.J.F., ANDERSON, R.E., TATHAN, R.L., WILLIAM, C.B. **Multivariate data analysis**. 5th ed. New Jersey: A Simon & Schuster Company Prentice-Hall, 1998. 730p.
- HINGSTON F.J., GALBRAITH J.H. Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* plantations on ex-farmland in southwestern Australia II. Stemwood production and seasonal growth **Forest Ecology and Management**, v.106, p.157–168, 1998.
- HUSCH B., MILLER, C.I., BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 2nd ed. Wiley, NY: The Ronald Press, 1972. 402p.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Anuário estatístico do Brasil**. Brasília: 1998. v.58.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Climatologia, mapas climatológicos**. [10/10/1999]. (<http://www.inmet.gov.br/index.html>).
- JARVIS, P. G. Increasing productivity and value of temperate coniferous forest by manipulating site water balance. In: BALLARD, R., FARNUM, P., RITCHIE, G.A., WINJUM, J.K. (Eds.). **Forest potentials-productivity and value**. Tacoma (USA): Proceedings Weyerhaeuser Sci. Symp, 1985. p.39-74.
- JARVIS, P.G., LEVERENZ, J.W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. **Encyclopedia of Plant Physiology** (New Series), v.12, p.233-280, 1983.
- JARREL, W.M., BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, v.34, p.197-224, 1981.
- JOHNSTON, D.R., GRAYSON, A.J., BRADLEY, R.T. **Forest planning**. London: Faber and Faber, 1967. 541p.
- JOHNSON, D.W. Reasons for concern over impacts of harvesting. In: COLE, D.W., COMERFORD, N.B., DYCK, W.J. (Eds.) **Impacts of forest harvesting on long-term site productivity**. Portland, OR: Champman & Hall, 1994. p.1-12.
- JORDAN, C.F. **Nutrient cycling in tropical forest ecosystems: principles and their application in management and conservation**. Chichester: John Willey Sons, 1985. 179p.
- 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**, v.128, p.181-196, 2000.
- LEITE, H.G., OLIVEIRA, F.H.T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communication Soil Science Analysis**, 2000. (submetido à publicação)
- LIETH, H., BOX, E.O. Evapotranspiration and primary productivity. **Publications in Climatology**. v.25, p.37-47, 1972.
- LINDER, S., MCMURTRIE, R.E., LANDSBERG, J.J. Global change impacts on managed forests. In: WALKER, B., STEFFEN, W. (Eds.), **Global change and terrestrial ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p.275-290. (IGBP Book Series, 2).

- MARION, G.M. Biomass and nutrient removal in long-rotation stands. In: **IMPACT OF INTENSIVE HARVESTING ON FOREST NUTRIENT CYCLING**, 1979, Syracuse. **Proceedings...** Syracuse: SUNY, 1979. p.98-110.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1997. 889p.
- MCLAIN, D. H. Drawing contours from arbitrary data points. **The Computer Journal**, v.17, p.318-324, 1974.
- MCMURTRIE, R.E., GHOLZ, H.L., LINDER, S., GOWER, S.T. Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a model-based analysis. **Ecological Bulletin**, v. 43z, p.173-188, 1994.
- 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**, v.19, p.165-171, 1995.
- MILLER, H. G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. **Plant and Soil**, v.168/169, p.225-232, 1995.
- MIRANDA, G.A., BARROS, N.F., LEITE, H.G., COUTO, L., TEIXEIRA, J.L. Produção de povoamentos de eucalipto em regime de talhadia, em função da adubação e da distribuição da galhada na rotação anterior, no vale do Jequitinhonha MG. **Revista Árvore**, v.22, n.3, p.307-314, 1998.
- MOREIRA, I.P.S. **Classificação ecológica do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 39° 51' longitude oeste**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 157p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- NAMBIAR, E.K.S. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. **Forest Ecology and Management**, v.30, p.213-232, 1990.
- NAMBIAR, E.K.S. Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1629-1642, 1997.
- NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. Sustainable agriculture and forestry production systems on acid soils: Phosphorus as a case-study. In: MONIZ, A.C., FURLANI, A.M.C., SCHAFFERT, R.E., FAGERIA, N.K., ROSOLEM, C.A., CANTRELLA, H. (Eds.) **Plant-soil interactions as low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Campinas, Viçosa: Brazilian Soil Science Society, 1997. p.39-51.

- NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. **Revista Árvore**, v.10, n.1, p.105-111, 1986.
- O'CONNELL, A.M., GROVE, T.S. Nutrient cycling in forests of south-western Australia. In: ATTIWILL, P.M., ADAMS, M.A. (Eds.). **Nutrition of eucalyptus**. Collingwood, VIC: CISRO, 1996. p.155-190.
- PEREIRA, J.S., MADEIRA, M.V., LINDER, S., ERICSSON, T., TOMEÂ, M., ARAUÁ J.M.C. Biomass production with optimised nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. In: PEREIRA, J.S., PEREIRA, H. (Eds.). **Eucalyptus for biomass production**. Brussels: Commission of the European Communities, 1994, p.13-30.
- PEREIRA, A.R., BARROS, N.F., ANDRADE, D.C., CAMPOS, P.T.A. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, v.59, p.27-37, 1984.
- PEREIRA, J.S., PALLARDY, S. Water stress limitations to tree productivity. In: PEREIRA, J.S., LANDSBERG, J.J. (Eds.) **Biomass production by fast-growing trees**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1989, p.37-56.
- POGGIANI, F. Nutrient cycling in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations ecosystems. Silvicultural implications. **Revista IPEF**, v.31, p.33-40, 1985.
- RAISON, R.J., MYERS, B.J., BENSON, M.L. Dynamics of *Pinus radiata* foliage in relation to water and nitrogen stress I. Needle production and properties. **Forest Ecology and Management**, v.2, p.139-158, 1992.
- RANGER, J., TURPAULT, M.P. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, v.122, p.139-154, 1999.
- REIS, M.G.F., BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. (Eds.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p.265-302.
- SANTANA, R.C., BARROS, N.F., NEVES, J.C.L. Produção de biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, n.56, p.155-169, 1999.
- SANTANA, R.C., BARROS, N.F., COMERFORD, N.B. Aboveground biomass, nutrient content, and nutrient use efficiency of eucalypt plantations growing in different sites in Brazil. **New Zealand Journal of Forest Science**, v.30, n.1/2, p.225-236, 2000.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Estatísticas**. [17/10/2000]. (<http://www.ipef.br/sbs/estatisticas>)

SCATOLINI, F.M., CORRADINE, L. BARROS, N.F., VALLE, C.F. Nutritional monitoring as a strategy for recommending fertilization for yield maintenance in *Eucalyptus* stands at Votorantim Celulose e Papel S.A. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS. 1997, Salvador, Ba. **Proceedings...** Colombo, EMBRAPA, 1997. v.4, p.181-183.

SPANGENBERG, A., GRIMM, U., SILVA, J.R.S., FÖLSTER, H. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). **Forest Ecology and Management**, v.80, p.225-234, 1996.

STAPE, J.L., BENEDETTI, V. Decréscimo de produtividade e resposta da brotação do *Eucalyptus grandis* à fertilização com macronutrientes em areia quartzosa no estado de São Paulo, Brasil. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS. 1997, Salvador, Ba. **Proceedings...** Colombo, EMBRAPA, 1997. v.3, p.112-117.

STATSOFT. **Statistica for Windows: computer program manual**. Tulsa, OK: StatSoft, 1999. (Manual eletrônico).

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

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2nd ed. Massachusetts: Publishers Sunderland; Sinauer Associates. 1998. 792p.

TURNER, J., KNOTT, J., LAMBERT, M.J. Fertilization of *Pinus radiata* after thinning: I. Productivity gains. **Australian Forestry**, v.59, p.7-12, 1996.

VANCLAY, J.K. **Modelling forest growth and yield – applications to mixed tropical forests**. Wallingford, UK: CAB International, 1994. 310p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

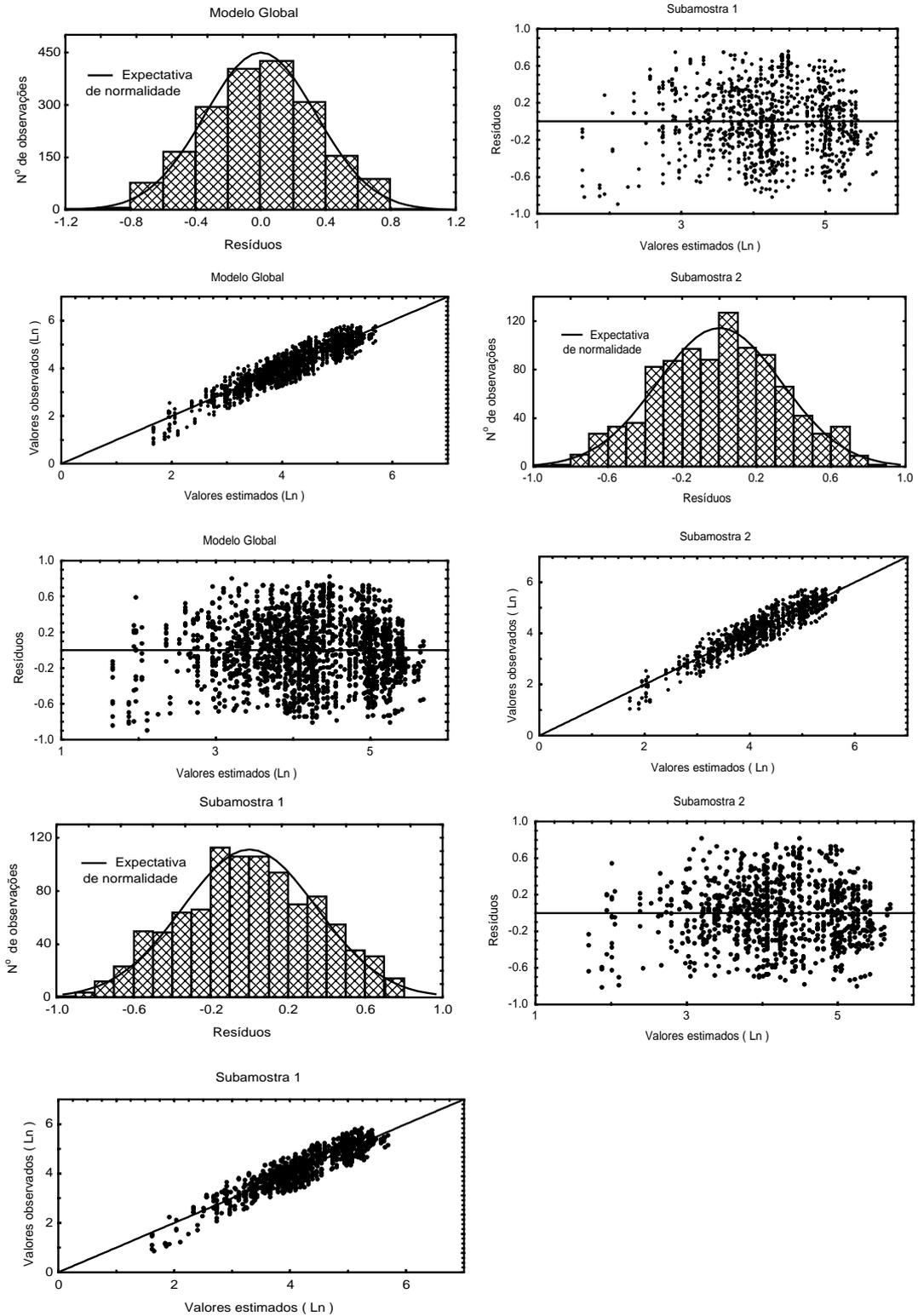


Figura 1A – Análise de resíduos para a equação de biomassa.

APÊNDICE B

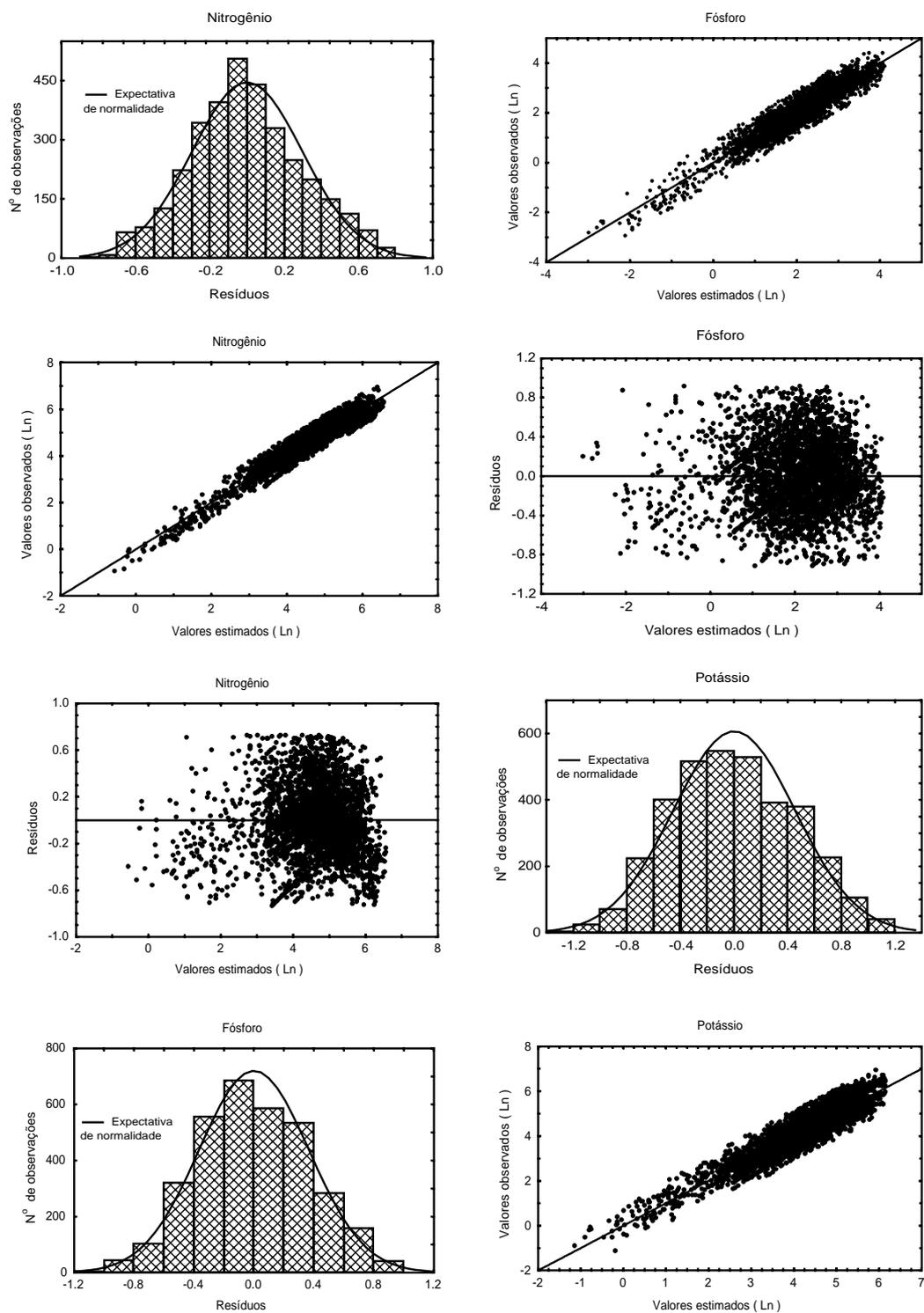


Figura 1B – Análise de resíduos para as equações de N, P e K.

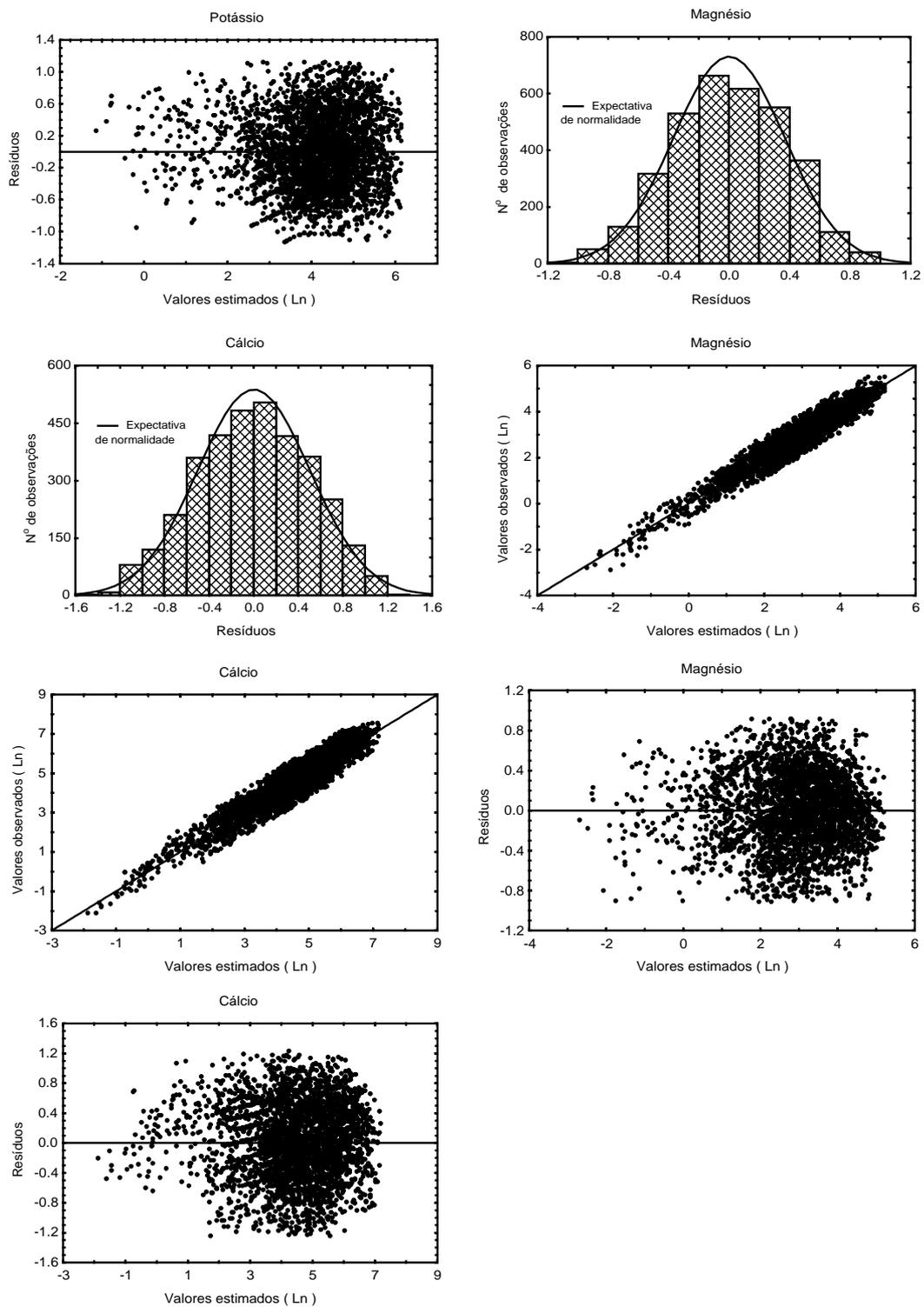


Figura 2B – Análise de resíduos para as equações de K, Ca e Mg.

APÊNDICE C

Quadro 1C – Estatísticas das equações para os macronutrientes

Regressão para a variável dependente: LnMg						
F(6,3370)=6210,0 p<0,0000 $S_{\bar{X}}$: 0,36959			R= 0,956 R ² = 0,917 $\bar{R}^2 = 0,917$			
	BETA	$S_{\bar{X}}$ BETA	B	$S_{\bar{X}}$ B	t(3370)	p-level
<i>Intercpto</i>			-3,96257	0,23281	-17,02	0,00000
<i>DX</i>	-0,16203	0,00571	-0,44220	0,01557	-28,40	0,00000
<i>DX1</i>	-0,51689	0,00575	-1,41166	0,01570	-89,89	0,00000
<i>LnB</i>	0,70753	0,00547	0,78123	0,00604	129,39	0,00000
<i>LnW</i>	0,05163	0,00613	0,03003	0,00356	8,43	0,00000
<i>LnT</i>	0,00913	0,00510	0,07991	0,04463	1,79	0,07344
<i>LnPMS/LnP</i>	0,14071	0,00614	4,94793	0,21588	22,92	0,00000
Regressão para a variável dependente: LnCa						
F(6,3392)=4350,8 p<0,0000 $S_{\bar{X}}$: 0,50500			R= 0,941 R ² = 0,885 $\bar{R}^2 = 0,885$			
	BETA	$S_{\bar{X}}$ BETA	B	St, Err, of B	t(3370)	p-level
<i>Intercpto</i>			-6,04274	0,31473	-19,20	0,00000
<i>DX</i>	-0,07678	0,00670	-0,24224	0,02113	-11,46	0,00000
<i>DX1</i>	-0,43379	0,00675	-1,38063	0,02149	-64,23	0,00000
<i>LnB</i>	0,71624	0,00644	0,90858	0,00817	111,19	0,00000
<i>LnW</i>	0,02197	0,00721	0,01512	0,00496	3,05	0,00232
<i>LnT</i>	0,02239	0,00597	0,22817	0,06086	3,75	0,00018
<i>LnPMS/LnP</i>	0,20405	0,00714	8,32776	0,29159	28,56	0,00000
Regressão para a variável dependente: LnK						
F(6,3458)=3206,3 p<0,0000 $S_{\bar{X}}$: 0,45659			R= 0,921 R ² = 0,848 $\bar{R}^2 = 0,847$			
	BETA	$S_{\bar{X}}$ BETA	B	$S_{\bar{X}}$ B	t(3370)	p-level
<i>Intercpto</i>			-3,28750	0,28437	-11,56	0,00000
<i>DX</i>	-0,15837	0,00767	-0,39159	0,01896	-20,65	0,00000
<i>DX1</i>	-0,33968	0,00773	-0,84712	0,01927	-43,96	0,00000
<i>LnB</i>	0,79102	0,00732	0,79452	0,00736	107,99	0,00000
<i>LnW</i>	-0,03775	0,00822	-0,01945	0,00424	-4,59	0,00000
<i>LnT</i>	0,02948	0,00681	0,23861	0,05510	4,33	0,00002
<i>LnPMS/LnP</i>	0,15747	0,00818	5,06753	0,26313	19,26	0,00000
Regressão para a variável dependente: LnP						
F(6,3308)=4328,5 p<0,0000 $S_{\bar{X}}$: 0,36781			R= 0,942 R ² = 0,887 $\bar{R}^2 = 0,887$			
	BETA	$S_{\bar{X}}$ BETA	B	$S_{\bar{X}}$ B	t(3370)	p-level
<i>Intercpto</i>			-5,25609	0,23368	-22,49	0,00000
<i>DX</i>	-0,22660	0,00673	-0,52522	0,01559	-33,69	0,00000
<i>DX1</i>	-0,46058	0,00677	-1,07605	0,01582	-68,03	0,00000
<i>LnB</i>	0,79472	0,00647	0,74743	0,00608	122,91	0,00000
<i>LnW</i>	-0,14502	0,00727	-0,06894	0,00346	-19,94	0,00000
<i>LnT</i>	0,04837	0,00596	0,36925	0,04550	8,11	0,00000
<i>LnPMS/LnP</i>	0,16727	0,00719	5,13666	0,22091	23,25	0,00000
Regressão para a variável dependente: LnN						
F(6,3320)=138400, p<0,0000 $S_{\bar{X}}$: 0,29818			R= 0,998 R ² = 0,996 $\bar{R}^2 = 0,996$			
	BETA	$S_{\bar{X}}$ BETA	B	$S_{\bar{X}}$ B	t(3320)	p-level
<i>DX</i>	-0,07730	0,00155	-0,62916	0,01264	-49,78	0,00000
<i>DX1</i>	-0,10635	0,00155	-0,88154	0,01289	-68,40	0,00000
<i>LnB</i>	0,67966	0,00442	0,77518	0,00504	153,86	0,00000
<i>LnW</i>	-0,02316	0,00303	-0,02044	0,00267	-7,64	0,00000
<i>LnT</i>	0,28416	0,01644	0,43351	0,02507	17,29	0,00000
<i>LnPMS/LnP</i>	0,16471	0,01833	0,97597	0,10863	8,98	0,00000