

JOÃO PEDRO DE BARROS REICAO CORDIDO

**EFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS MÁXIMAS E MÍNIMAS EM POVOAMENTOS DE  
EUCALIPTO**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C795e  
2019

Cordido, João Pedro de Barros Reicao, 1984-  
Eficiências nutricionais máximas e mínimas em  
povoamentos de eucalipto / João Pedro de Barros Reicao  
Cordido. – Viçosa, MG, 2019.  
86 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 78-86.

1. Eucalipto - Nutrição. 2. Clones. 3. Biomassa. 4. Modelos matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

JOÃO PEDRO DE BARROS REICAO CORDIDO

**EFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS MÁXIMAS E MÍNIMAS EM POVOAMENTOS  
DE EUCALIPTO**

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

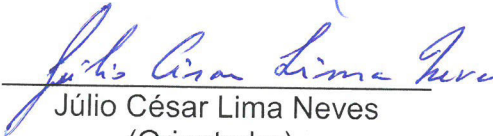
APROVADA: 30 de abril 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Elpídio I. Fernandes Filho

  
\_\_\_\_\_  
Reynaldo Campos Santana

  
\_\_\_\_\_  
Hélio Garcia Leite  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Lafayette G. Campelo Martins

  
\_\_\_\_\_  
Júlio César Lima Neves  
(Orientador)

*DEDICO*

A todos que vivem no Brasil e que mantêm esta Universidade e a todos que  
construíram a UFV.

O trabalho aqui realizado é para bem servir ao mundo todo, porém embora  
todo o povo mantenha a UFV não são todos que aqui podem estudar me sinto  
grato de ter tido a chance de viver aqui e espero que o meu trabalho possa  
contribuir para melhorar a vida de todos.

## AGRADECIMENTOS

Espero não ser injusto em esquecer alguém nos agradecimentos, foram muitas pessoas que me auxiliaram a finalizar este trabalho

Agradeço ao trabalho sério de todos que um dia passaram pela UFV e construíram toda a estrutura que ela possui, é um privilégio ter em nosso país uma instituição séria, dedicada e bem estruturada.

A todos os professores do DPS principalmente aos que me ministraram disciplinas por terem sido atenciosos, exigentes e amigos.

Ao Professor Júlio César por toda a atenção, por me fazer acreditar e dar suporte em prosseguir com o curso, poder ser seu aluno é um privilégio.

À Loane Vaz Fernandes por todo o apoio na discussão deste trabalho

Ao Professor Hélio Garcia Leite por compartilhar seu conhecimento e amizade.

À Professora Hermínia pelo apoio no entendimento das questões da qualificação

À Graduanda Aylene Ramos e o Professor Aristides Ribeiro pelos dados de clima.

À Professora Lais Santos do Departamento de Matemática.

Aos Professores e empresas que disponibilizaram seus dados em especial a Guilherme e Fernando e aos Professores Lafayete e Júlio.

À minha esposa Karoll Andrea pelo apoio para a realização e estar ao meu lado.

Aos professores da banca pelas sugestões de correção.

Aos amigos de curso em Viçosa, e a todos da realização do IV SMCS, os de viagens de campo: Devin e Thales, e à Gabriela Silva pelo auxílio com os dados.

À Pafuncia, Kika e a Frida pela alegria de todos os dias.

Aos Amigos de Italva e a Professora Luciana e família pelo apoio.

Aos meus pais Tereza e Fernando, irmãos Luis e Ruth, meu sobrinho Fernando, meus tios Paulo e Solange meus sobrinhos Sofía, Mateo e toda a minha família na Colômbia e Canadá.

## **Saber Viver**

Não sei...  
Se a vida é curta ou longa demais para nós.  
Mas sei que nada do que vivemos  
Tem sentido,  
Se não tocarmos o coração das pessoas

Muitas vezes basta ser:  
colo que acolhe,  
braço que envolve,  
palavra que conforta,  
silêncio que respeita,  
alegria que contagia,  
lágrima que corre,  
olhar que sacia,  
amor que promove.

E isso não é coisa de outro mundo:  
É o que dá sentido à vida.

É o que faz com que ela  
não seja nem curta,  
nem longa demais,  
mas que seja intensa,  
verdadeira e pura...  
enquanto durar.

Cora Coralina

## RESUMO

CORDIDO, João Pedro de Barros Reicao, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2019. **Eficiências Nutricionais Máximas e Mínimas em Povoamentos de Eucalipto**. Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Hélio Garcia Leite.

A caracterização do dreno-planta, e sua dinâmica, são necessários para embasar a fertilização e o seu manejo. Assim, os objetivos deste trabalho foram determinar as curvas de acumulação de biomassa e de nutrientes, bem como as eficiências máximas e mínimas de uso de radiação solar, precipitação e nutrientes para povoamentos clonais de eucalipto no Brasil, ao longo da rotação. Para tanto, foi confeccionado banco de dados com dados de produção de biomassa, teores e conteúdos de nutrientes em componentes da parte aérea de 2223 povoamentos clonais comerciais de eucalipto no Brasil com ampla variação nas condições de sítio. Foram obtidos gráficos de dispersão para relacionamentos envolvendo a produção de biomassa da parte aérea, do tronco e do lenho e de seus conteúdos de N, P, K, Ca e Mg em função da idade dos povoamentos e, também, desses conteúdos em função da área basal. Nas nuvens de pontos obtidas foram identificados os pares de dados que se alinharam às regiões de fronteira superior e inferior, aos quais foram ajustados modelos de regressão. Foram obtidas curvas de acumulação máximas e mínimas de biomassa e de nutrientes ao longo da rotação, descritas por modelos sigmóides, úteis para caracterizar o dreno-planta e sua dinâmica. Foram obtidas as eficiências máximas e mínimas de uso de radiação solar global (EURAD), e de precipitação (EUPREC) que foram em média  $0,596 \text{ g MJ}^{-1}$  e de  $24,41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , valores 2,24 e 2,54 vezes maiores, respectivamente, nos povoamentos em que houve a acumulação máxima de biomassa de parte aérea. A eficiência de utilização de nutrientes cresceu em geral com a idade e com a área basal. A acumulação desses nutrientes para uma mesma área basal produzida foi 69,5%, 74,6% e 82,9% menor nos povoamentos de máxima eficiência de uso em relação aos de povoamentos menos eficientes, em termos da média desses nutrientes e ao longo da rotação. As partições de nutrientes para o tronco aumentaram com a área basal, sendo menores na região de fronteira inferior, implicando em menor exportação absoluta e relativa de nutrientes pelas colheitas.

## ABSTRACT

CORDIDO, João Pedro de Barros Reicao, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2019. **Nutricional Efficiency Maximum and Minimum in Eucalyptus Settlement.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Hélio Garcia Leite.

The characterization of the plant-drain, and its dynamics, are necessary to support fertilization and its management. Thus, the objectives of this work was determine the biomass and nutrient accumulation curves, as well as the maximum and minimum efficiency of use of solar radiation, water and nutrients for clonal eucalypt stands in Brazil, along the rotation. To do so, a database with biomass production data, contents and nutrient contents was compiled on the aerial parts of 2223 commercial clonal eucalypt stands in Brazil with wide variation in site conditions. Scatter plots were obtained for relationships involving the biomass production of shoot, trunk and wood and their contents of N, P, K, Ca and Mg as a function of the age of stands and also of these contents as a function of basal area. In the cloud of points obtained, pairs of data were identified that aligned to the upper and lower border regions, to which mathematical models were fitted. Maximum and minimum accumulation curves of biomass and nutrients were obtained along the rotation, described by sigmoid models, useful to characterize the drain-plant and its dynamics. The maximum and minimum efficiency of the use of global solar radiation (EURAD) and water (EUPREC) averaging  $0.596 \text{ g MJ}^{-1}$  and  $24.41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , values 2,24 and 2,54 times greater, respectively, in the stands where there was the maximum accumulation of aerial part of biomass. The efficiency of use of nutrients increased generally with age and basal area. The accumulation of these nutrients for the same basal area was 69.5%, 74.6% and 82.9% lower in stands of maximum efficiency of use in relation to those of less efficient stands, in terms of the average of these nutrients and over of rotation. The nutrient partitions for the trunk increase with the basal area, being smaller for the lower border region, implying a lower absolute and relative export of nutrients by the harvests.

## SUMÁRIO

1 – Introdução .....	9
2 – Material e Métodos .....	15
3 – Resultados e Discussão.....	23
3.1 – Acumulação de biomassa .....	23
3.2 – Acumulação de nutrientes minerais.....	30
3.3 – Eficiência de uso dos fatores de produção .....	45
3.3.1 – Radiação solar e precipitação.....	45
3.3.2 – Nutrientes minerais .....	56
3.3.2.1 – Em função da idade do povoamento.....	56
3.3.2.2 – Em função da área basal .....	61
4 - Conclusões .....	77
5 - Literatura Citada .....	78

## 1. Introdução

O setor florestal é importante para a economia brasileira e representa 1,2 % do PIB nacional, com faturamento de R\$ 69,1 bilhões no ano de 2015 e geração de R\$ 11,3 bilhões em tributos o que corresponde a 0,9 % da arrecadação do país (Ibá, 2018).

As florestas plantadas no país, em sua maioria com os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, são as mais produtivas do mundo. A elevada produtividade obtida é fruto de investimentos sólidos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico que permitiram grande elevação da produtividade florestal de 15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na década de 70 para em torno de 36-39 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nos anos recentes, em termos de produtividade média da cultura do eucalipto, e que conferem ao Brasil a liderança mundial quanto à produtividade dessa cultura (Ibá, 2018).

Essa importante elevação de produtividade da cultura resultou do aprimoramento do manejo do solo e da fertilização (Barros & Novais, 2010), de modo não limitar o potencial genético de crescimento e produção da cultura. Portanto, genética e silvicultura são os grandes responsáveis pelos altos rendimentos florestais obtidos atualmente, devendo ser considerada também a maior uniformidade da estrutura dos povoamentos, alcançados especialmente em povoamentos clonais (Boyden et al., 2008). Uma vez que é alcançada a máxima produtividade que deve ser combinada com a maior eficiência de uso dos recursos, os custos operacionais diminuem, principalmente os de colheita.

A disponibilidade e a eficiência de uso dos fatores de produção CO<sub>2</sub>, radiação solar, água e nutrientes minerais (Cannell, 1989; Binkley et al., 2004), juntamente ao material genético e ao manejo, definem a produtividade florestal. A disponibilidade dos fatores de produção nos plantios florestais influencia na área foliar, responsável pela interceptação de luz, interferindo assim, na produção da floresta (Landsberg e Sands, 2011). De acordo com Binkley (2011), tem sido observado que com o aumento da disponibilidade de água e luz tem havido manutenção ou aumento da eficiência de uso.

No Brasil, e em outras regiões de clima tropical, os fluxos de água e de nutrientes minerais são considerados os fatores abióticos que mais influenciam

a produção florestal (Barros e Comerford, 2002; Stape, 2002). Contudo, dentre os elementos do clima, a radiação solar foi o segundo fator mais importante, vindo após a precipitação, para a produtividade da cultura do eucalipto clonal no Brasil, com base nos resultados obtidos pelo modelo ecofisiológico 3 PG (Borges, 2012).

Radiação solar e precipitação, no contexto da produção comercial de povoamentos florestais, são fatores não diretamente manejáveis, porém podem ter suas disponibilidades e eficiências de uso influenciadas por práticas de manejo, a exemplo da adoção de diferentes espaçamentos e arranjos espaciais das árvores, e de esquemas de desramas e desbastes, além, da escolha de materiais genéticos com distintas exigências e eficiências de uso desses recursos.

A eficiência do uso da água precipitada define a capacidade de produzir biomassa, podendo ser medida em escala temporal e espacial (Binkley et al., 2004; Seibt et al., 2008). Em escala de povoamentos, a eficiência do uso da água para a produção de madeira é definida como a relação entre o incremento da biomassa de tronco e a aquisição e uso de água no mesmo período (Law et al., 2002). A disponibilidade e a eficiência de uso de água variam com as condições ambientais e impactam, de modo importante, a produção e a partição de fotoassimilados (Beer et al., 2009; White et al., 2014; Battie-Laclau, 2016).

A eficiência de uso da luz apresenta interação com outros fatores de produção, como relatado por Stape et al. (2008), que encontraram maior eficiência em plantios com maior disponibilidade hídrica, seja natural (ano com maior precipitação) ou irrigados, porém não observaram efeito da fertilização aplicada nos plantios.

Em relação ao fator nutricional, considerando a baixa fertilidade natural de expressivas áreas utilizadas para o cultivo de povoamentos florestais no Brasil, o fornecimento de nutrientes por meio da fertilização é necessário para alcançar uma produtividade florestal elevada. Para a obtenção das doses adequadas de fertilizantes as técnicas de modelagens, por exemplo, os modelos de balanço nutricional para recomendação de fertilização, têm se mostrado mais adequadas

do que as técnicas “clássicas” de experimento de fertilização, em razão de esses experimentos necessitarem de áreas relativamente grandes e do longo tempo para a obtenção de resultados, além de os resultados serem válidos para as condições específicas de sítio e material genético utilizadas (Tomé Jr., 2004).

Nos modelos de balanço nutricional, as doses de nutrientes a aplicar resultam do balanço entre as quantidades de nutrientes demandadas para a obtenção de definida meta de produtividade florestal (sub-modelo planta ou requerimento) e as quantidades de nutrientes que o solo é capaz de suprir (sub-modelo suprimento).

Para a parametrização do sub-modelo planta, há a necessidade de se conhecer a eficiência nutricional, para o que, do ponto de vista clássico, faz-se necessário abater as plantas ao longo da rotação, ou pelo menos por ocasião da idade de corte, de modo a que se possa quantificar a produção de biomassa dos componentes das árvores e as quantidades de nutrientes neles acumuladas, etapa esta que demanda tempo, é cara e trabalhosa. A eficiência nutricional varia entre espécies (Bündchen et al., 2013) e dentro de uma mesma espécie, ou variedade, varia com a idade (Leite et al., 2011), com o ambiente (Wood et al., 2011), com o espaçamento, e com a disponibilidade de nutrientes no solo (Shujauddin & Kumar, 2003).

No Brasil, há adequada disponibilidade de dados de biomassa e conteúdos de nutrientes da cultura do eucalipto, obtidos dos trabalhos realizados em nível de empresas florestais, em plantios comerciais, em condições amplamente distintas de sítio florestal e de material genético, que permitem a modelagem da acumulação de nutrientes.

Nesse sentido, foram obtidos modelos matemáticos preditivos da acumulação, da eficiência de utilização e da alocação de nutrientes ao longo da rotação, para diferentes sítios no Brasil (Santana et al, 2002) e modelos preditivos da eficiência de utilização e da alocação de nutrientes com base em variáveis do sítio: uma variável do clima (a precipitação pluviométrica anual), uma variável do solo (o teor de argila) e uma variável do povoamento (a área útil por árvore) (Valadares, 2015). No trabalho de Valadares (2015), os modelos

obtidos resultaram do uso de técnicas de regressão não linear e mediante o uso de redes neurais (RNA), e são de grande utilidade para a estimação da curva média de demanda e de partição dos nutrientes nas árvores dos plantios.

Contudo, o estudo do relacionamento da acumulação de macronutrientes em função do volume de madeira de tronco de plantios comerciais seminais de eucalipto na região do Vale do Rio Doce, MG permitiu verificar a existência de duas populações extremas: uma população com a máxima acumulação de nutrientes e outra população com a mínima acumulação de nutrientes, ambas em relação ao volume de madeira de tronco produzido (Lima Neto, 2018).

No trabalho de Lima Neto (2018) foi também observado que há influência da acumulação de um nutriente sobre a acumulação dos demais macronutrientes; as plantas da população com acumulação máxima de um dado nutriente na parte aérea em relação ao volume de tronco produzido apresentaram importantes decréscimos nas acumulações dos demais nutrientes e vice-versa. Esses resultados, que necessitam ser avaliados para outras condições de sítio e de material genético, indicam haver efeito da eficiência com que um dado nutriente é utilizado sobre a eficiência de utilização dos demais nutrientes, e assim sobre o equilíbrio nutricional da árvore.

Assim, há a necessidade, e é altamente oportuno, de desenvolver modelos visando prever as curvas máximas e mínimas, e não apenas a curva média, de produção dos componentes de povoamentos clonais, bem como de suas eficiências nutricionais e de uso de luz e precipitação ao longo da rotação, de modo a que possa prever as curvas máximas e mínimas da acumulação de nutrientes nos componentes das árvores. Ainda, cabe obter modelos que relacionem as acumulações máximas e mínimas de nutrientes com variáveis dendrométricas que refletem a produção do povoamento, como a área basal.

Equações alométricas que permitem prever a produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes em componentes da parte aérea de árvores em função do dap, com elevada capacidade preditiva, têm sido obtidas para plantios de teca no estado de Mato Grosso (Santos, 2015), para Pinus e eucalipto na província de Corrientes - Argentina (Stahinger, 2017), dentre outros trabalhos. Essas

equações são úteis para a predição de demanda nutricional, e assim para parametrizar o módulo-planta de modelos de balanço nutricional. Espera-se que a utilização de variável, como preditora, que reflete a produção do povoamento (no caso, a área basal) nessas equações, deve conferir alto grau de universalidade às equações, permitindo utilizá-las para distintas condições de sítio florestal.

Ainda, a utilização da área basal, nessas equações, como variável preditora, possibilita, mediante a integração dessas equações com modelos de distribuição diamétrica, a obtenção de estimativas da produção de biomassa e da acumulação de nutrientes em nível de árvores individuais, além de possibilitar a integração com modelos ecofisiológicos, a exemplo do modelo 3-PG, acrônimo de Physiological Principles in Predicting Growth (Landsberg & Waring, 1997), como feito por Stahring (2017) para Pinus e Eucalyptus na Argentina e por Pontes (2011) para teca.

No trabalho de Lima Neto (2018), acima mencionado, bem como em vários outros trabalhos na área de nutrição, com dados obtidos em plantios comerciais, foi utilizada a técnica da linha de fronteira, a exemplo dos trabalhos com eucalipto de Fernandes (2010), Borges (2012) e Galdino (2015), com teca (Carvalho, 2016), e com árvores adultas de florestas naturais (Vizcayno-Soto & Côté, 2004), além de vários trabalhos com plantios comerciais de outras culturas, a exemplo da cultura do café (Mendonça, 2016, Sousa et al., 2018), soja (Evanlyo & Sumner, 1987), milho (Walworth, 1986), seringueira (Njukeng et al., 2013), pitaia (Almeida et al., 2016) e melão (Maia & Moraes, 2016).

A técnica da linha de fronteira possibilita trabalhar com dados obtidos em condições não controladas, situação dos plantios comerciais, e consiste em detectar na nuvem de pontos a linha de melhor performance do relacionamento que se obtém de uma dada variável tomada como dependente em função de outra variável considerada como variável independente (Sousa et al., 2018) ou, ainda, de modo mais amplo, detectar as linhas-limite superior e inferior na referida nuvem de pontos, como feito por Borges (2012), Galdino (2015) e Lima Neto (2018) para dados obtidos em plantios comerciais de eucalipto no Brasil.

As linhas de fronteira do relacionamento entre o conteúdo do nutriente em função do volume ou biomassa de tronco produzidos expressam, em essência, as eficiências nutricionais mínima (correspondendo à linha de fronteira superior) e máxima (correspondendo à linha de fronteira inferior), esta última determinada pelo genótipo e muito estável, pouco variando com o sítio florestal segundo afirmado por Martins<sup>1</sup> (comunicação pessoal).

Outra técnica de análise numérica capaz de considerar a complexidade das relações e interações envolvidas na dinâmica nutricional em plantas é a de Redes Neurais Artificiais, RNA (Valadares, 2015). As RNAs são uma ferramenta para análise de dados, que procura simular o funcionamento do cérebro humano, e possuem a capacidade de aprendizagem, sendo uma análise multivariada que identifica padrões e que possibilita a obtenção de relacionamentos entre as variáveis sem a necessidade de conhecimento das relações funcionais entre as mesmas, sendo utilizadas de modo exitoso na área de solos e na área florestal, inclusive na área de nutrição florestal, a exemplo dos trabalhos de Cunha (2010), Lafetá et al (2014), Valadares (2015) e Lafetá et al., (2018).

Os objetivos deste trabalho foram determinar as curvas de acumulação de biomassa e de nutrientes, bem como as eficiências máximas e mínimas de uso de radiação solar, precipitação e nutrientes minerais para povoamentos clonais de eucalipto no Brasil, ao longo da rotação.

---

<sup>1</sup> Prof. Lafayete Gonçalves Campelo Martins, FEAD – MG, comunicação pessoal

## 2. Material e Métodos

Foi confeccionado um banco de dados com informações de 2223 plantios clonais comerciais de eucalipto no Brasil de diferentes idades, abrangendo ampla variação das condições de sítio, representativos de importantes regiões de plantio da cultura, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Relação de municípios e suas coordenadas geográficas latitude (lat) e longitude (long), média de idade (id.) em anos, biomassa da parte aérea (BPA) em t ha<sup>-1</sup> e do somatório dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg ( $\Sigma$ macro) em kg ha<sup>-1</sup> e a precipitação média anual durante o período de cultivo (prec.) mm período<sup>-1</sup>, radiação solar global média diária durante o período de cultivo (rad.) MJ m<sup>-2</sup> período<sup>-1</sup> e a área basal média no momento do abate da árvore (abas) m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>.

Cidade	lat.	long.	id.	prec	rad.	$\Sigma$ macro	BPA	abas
Teixeira de								
Freitas – BA	-17,514	-39,741	3,1	1431	18,2	658,0	83,8	17,8
Aracruz – ES	-19,782	-40,202	4,5	1242	17,3	1033,4	129,7	20,5
São Mateus – ES	-18,745	-39,871	7,7	1133	17,3	1812,7	234,3	27,7
Belo Oriente – MG	-19,212	-42,462	6,1	1163	16,9	707,8	125,2	22,1
Carbonita – MG	-17,542	-42,992	1,4	1330	18,2	270,1	24,7	4,6
Cocais – MG	-19,861	-43,459	5,2	1527	17,2	644,1	136,1	19,7
Dionísio – MG	-19,841	-42,730	1,9	1360	17,7	576,5	49,4	11,6
Ganhães – MG	-18,824	-42,863	5,5	1230	16,1	1056,9	186,1	25,1
Ipaba – MG	-19,382	-42,387	2,6	1152	16,6	676,5	76,7	11,8
Martinho Campos								
– MG	-19,345	-45,259	2,4	1333	18,0	331,0	29,0	8,1
Monte Carmelo –								
MG	-18,730	-47,471	3,6	1398	17,4	759,0	93,3	19,1
Santa Bárbara –								
MG	-19,944	-43,353	5,2	1460	17,7	762,1	135,4	21,1
Três Lagoas – MG	-20,840	-51,717	3,5	1302	18,1	631,6	92,5	18,9
Uberlândia – MG	-18,851	-48,307	1,9	1038	17,1	308,1	27,9	8,0
Agudos – SP	-22,457	-48,900	3,3	1557	17,6	979,6	117,6	27,4
Botucatu – SP	-22,775	-48,312	3,3	1530	17,5	975,4	106,2	21,8
Capão Bonito – SP	-23,984	-48,371	1,9	1283	15,3	280,3	25,3	6,8
Itapetininga – SP	-23,632	-48,004	4,1	1391	17,5	1279,7	149,3	32,2
Jacareí – SP	-23,223	-46,035	2,1	1818	18,3	398,0	35,6	8,6
Lençóis Paulista								
– SP	-22,577	-48,801	3,3	1510	17,8	980,5	117,4	24,0
Luiz Antônio – SP	-21,538	-47,710	2,0	1492	17,5	302,1	25,5	6,4



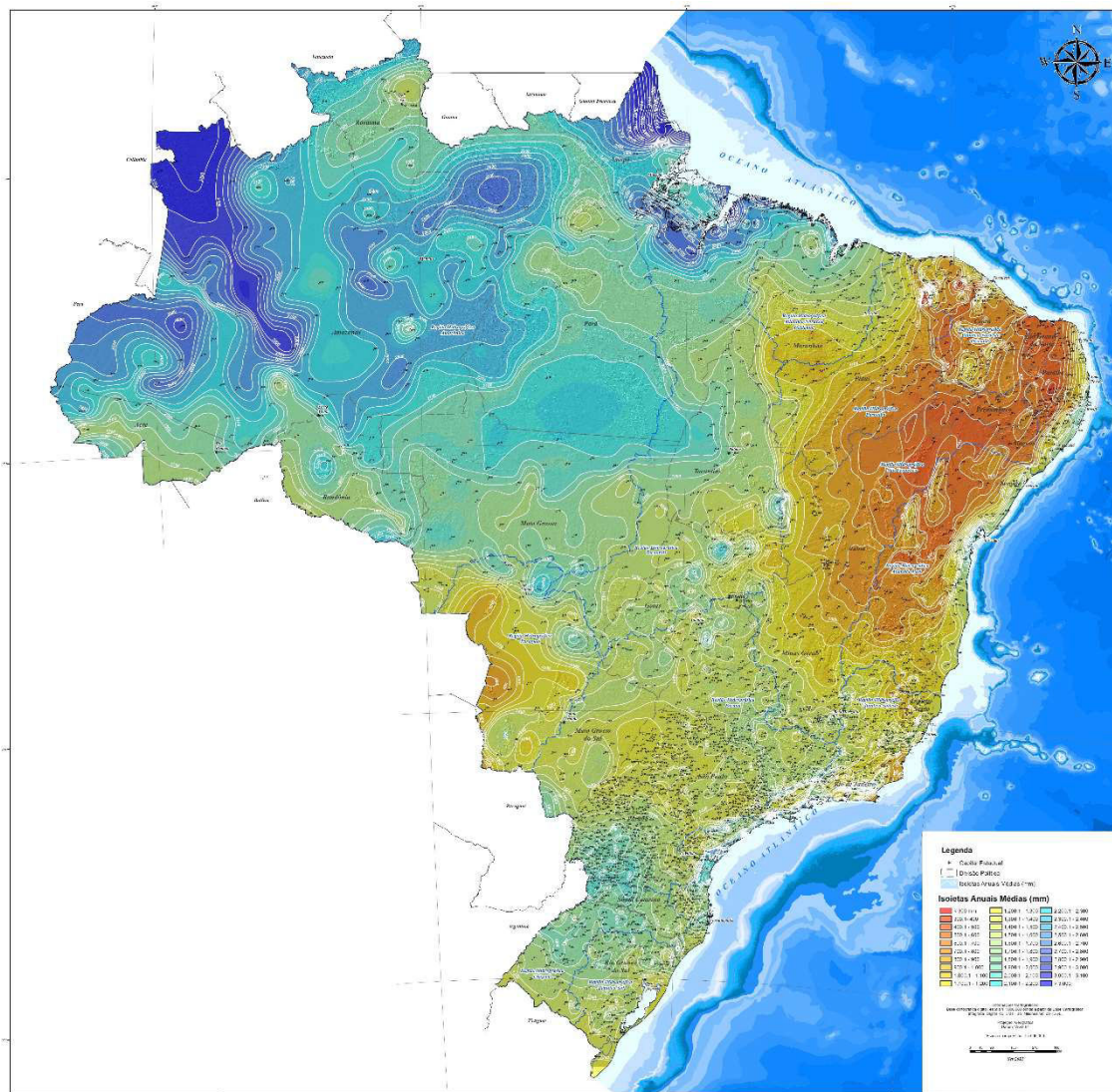


Figura 2: Mapa com as precipitações médias anuais em mm, adaptado do CPRM (2011)

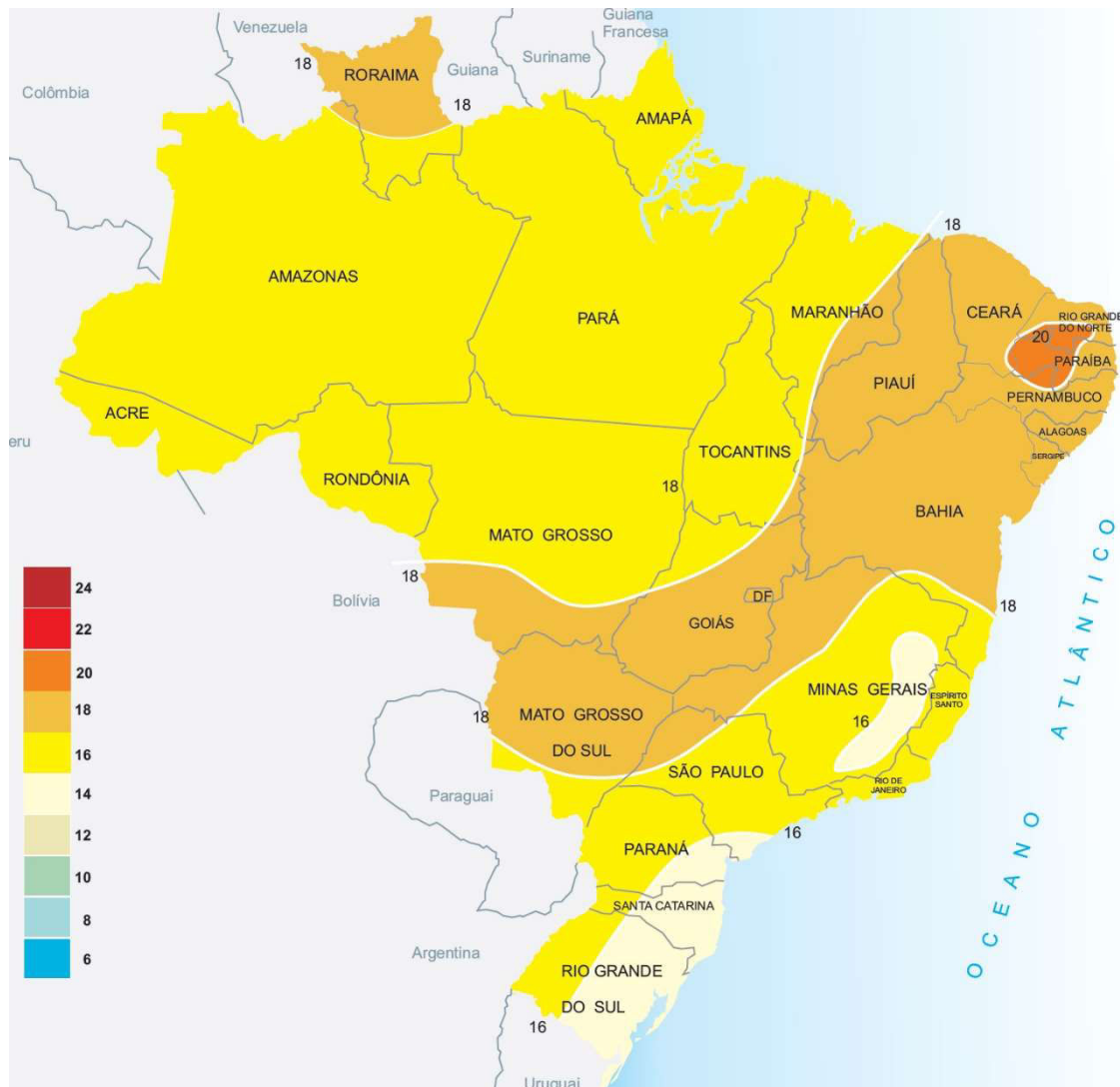


Figura 3: Mapa ilustrativo da média anual da radiação solar global diária no Brasil em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-2}$ , adaptado de Tiba & Fraidenraich (2000)

O banco de dados elaborado conteve as seguintes informações:

- localização geográfica,
- precipitação acumulada por período de cultivo  $\text{mm período}^{-1}$ ,
- radiação solar global acumulada por período de cultivo  $\text{MJ m}^{-2} \text{ período}^{-1}$ ,
- data de plantio e de amostragem, idade das árvores em anos,
- espaçamento, população de plantas por hectare,
- altura em m, dap em cm, área basal em  $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$  e volume de tronco  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ,
- biomassa  $\text{t ha}^{-1}$  (nos componentes folhas, galhos, lenho e casca, tronco, copa e parte aérea),
- teores de macronutrientes N, P, K, Ca e Mg nos componentes em  $\text{g kg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ,

- conteúdos de macronutrientes por hectare dos componentes em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Após análise de consistência, realizada visando detectar valores claramente anômalos, foram obtidos gráficos de dispersão que relacionaram a produção de biomassa por hectare de parte aérea, tronco e lenho, bem como os respectivos conteúdos de nutrientes N, P, K, Ca e Mg, com a idade e com a área basal dos povoamentos, obtendo-se pares de dados de cada relação. Cada relação foi realizada de maneira independente das demais, ou seja, cada par de dados foi obtido a partir da população total do banco de dados de origem

Posteriormente, com o auxílio do software Boundary Fit, na nuvem de pontos de cada gráfico de dispersão, foram selecionadas as populações da região de Fronteira Superior (LFS) e da região de Fronteira Inferior (LFI), sendo ajustados modelos de regressão aos pares de dados de cada uma dessas populações através dos softwares CurveExpert 1.4 e Excel 2019, e foram escolhidos, para descrever os relacionamentos, os modelos com significado biológico e melhor ajuste.

Para a seleção das populações LFS e LFI, dos pares de dados das relações de biomassa de parte aérea, tronco e lenho em função da idade foi feito um aprimoramento da técnica. Após a seleção das populações LFS e LFI, o banco com os dados restantes foi novamente submetido à análise pelo software Boundary fit para uma nova seleção de regiões LFS e LFI, havendo agora duas populações de região de fronteira superior e duas populações de região de fronteira inferior. As duas populações dentro de cada região de fronteira foram somadas para formar uma única população da região LFS e outra LFI. Desses dois grupos, com populações mais robustas, foram excluídos os *outliers* e foi dado prosseguimento às análises a seguir.

Para cada uma destas populações foram ajustados modelos sigmoidais logísticos através do software estatístico CurveExpert 1.4.

Foram também selecionadas as populações de região de fronteira superior e inferior para os conteúdos nutricionais de N, P, K, Ca e Mg em função da idade, cada qual obtida de maneira independente utilizando todos os indivíduos do banco de dados com relação às demais populações. Para estas populações foram ajustados modelos sigmoidais logísticos através do software estatístico CurveExpert 1.4.

Foram também obtidos modelos gaussianos, através do software estatístico CurveExpert 1.4, para relacionar, nos povoamentos das regiões de fronteira, a produção de biomassa da parte aérea em função da radiação solar global e da precipitação pluviométrica, ambos em termos de valores acumulados no período desde o plantio à amostragem da árvore.

Nos modelos ajustados em função da idade do povoamento, de natureza sigmoidal, procedeu-se à obtenção das idades correspondentes aos pontos da curva de crescimento para a delimitação das fases entre os pontos que correspondem às idades limites, conforme mostrado na Figura 4.

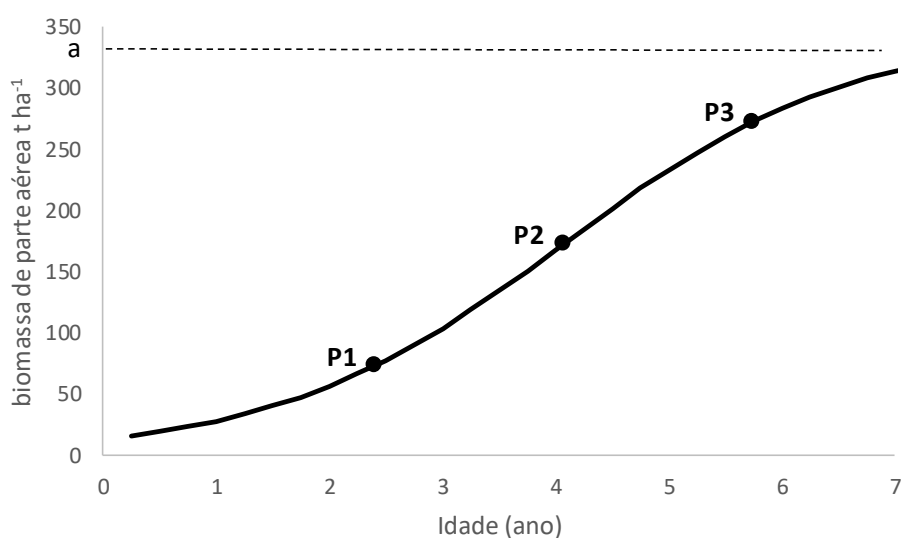


Figura 4: Curva de produção de biomassa da parte aérea em função da idade, sendo indicados o P1 idade que ocorre ponto máximo de inflexão da curva com concavidade voltada para cima (obtida pela derivada terceira da função,  $d^3y/dx^3$ ), P2 idade que ocorre o ponto de intersecção entre as duas concavidades (obtida pela  $d^2y/dx^2$ ), e o P3 idade que ocorre o ponto máximo de inflexão da curva com concavidade voltada para baixo (obtida pela  $d^3y/dx^3$ ).

Das populações selecionadas das relações em função da idade foram obtidos os parâmetros a, b, c do modelo sigmoidal logístico:

$$y = \frac{a}{1 + b * e^{(-cx)}}$$

Cada um dos pontos indicados na Figura 1, P1, P2 e P3 corresponderam às idades do povoamento que delimitaram as mudanças de fases e que

possuíram explicação biológica. A primeira fase, da origem a até o P1, representa a fase de menor crescimento da planta (a de menor acumulação de carbono). A segunda fase ocorre entre os pontos P1 e P3 e corresponde a fase de maior crescimento. Porém no ponto P2, entre os pontos P1 e P3, representa o momento, na fase de maior crescimento, em que começa haver uma diminuição da taxa de crescimento que culmina no P3. A última fase ocorre a partir do P3 e embora ainda haja crescimento, este não é significativo. A máxima produção que pode ser atingida é obtida pelo valor  $a$  dos parâmetros do modelo sigmoidal logístico.

Para a separação das duas primeiras fases, a inicial e a de rápido crescimento, é necessário obter a idade que ocorre o P1, que delimita as duas fases, e para obter esta idade, que acontece na máxima inflexão da concavidade virada para cima, usou-se a terceira derivada:

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{-1}{c} \times \ln \frac{(2 + \sqrt{3})}{b}$$

Para obter a idade que corresponde ao P2, que é quando começa haver uma diminuição da taxa de crescimento e também o ponto de inflexão onde a curva deixa de ter concavidade para cima e passa a ter concavidade para baixo, ou seja o P2, usou-se a segunda derivada:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-1}{c} \times \ln \frac{1}{b}$$

Para a delimitação das idades de máximo crescimento, correspondente à segunda fase, que começa no P1, já anteriormente calculado, e culmina na idade que acontece na máxima inflexão da concavidade virada para baixo, chamado de P3, usou-se a terceira derivada:

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{-1}{c} \times \ln \frac{(2 - \sqrt{3})}{b}$$

A terceira e última fase, a de estabilização da produção, começa a partir da idade correspondente ao P3.

Cabe lembrar que para a obtenção dos dados utilizou-se método destrutivo e para cada seleção de populações foram utilizados todos os indivíduos de diversas regiões do Brasil e com diferentes manejos. O que implica que a análise de seleção das idades para delimitar os pontos de separação das

fases não foi feita para cada floresta e sim para o Brasil todo, considerando-se o país como um único sítio florestal.

A partir dos modelos gerados de biomassa da parte aérea ( $t\ ha^{-1}$ ) em função da idade (BPA) e dos modelos de biomassa produzido em função da radiação solar acumulada ( $MJ\ m^{-2}\ período^{-1}$ ) e da precipitação acumulada ( $mm\ período^{-1}$ ), foi obtida a eficiência de uso de radiação solar global (EURAD) em  $g\ MJ^{-1}$  pela razão entre o BPA e o valor estimado da biomassa da parte aérea em função da radiação solar acumulada, ao longo da rotação. Através da razão do valor estimado de BPA pelo valor estimado de pela razão da biomassa em função da água precipitada foi obtida a eficiência de uso de precipitação (EUPREC) em  $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ , ao longo da rotação.

Para a estimativa dos coeficientes nutricionais (coeficiente de utilização biológica CUB) foram utilizados os dados das populações concordantes, e que consistiu em utilizar somente os dados dos indivíduos que existiam simultaneamente nas populações utilizadas para gerar os valores de CUB. Para exemplificar foram selecionados no caso do CUB de N as árvores que se encontravam ao mesmo tempo na região de fronteira de BPA em função da idade como também na região de fronteira de conteúdo de N em função da idade. Estas seleções e cálculo de CUB foram feitas para todos os nutrientes estudados neste trabalho N, P, K, Ca e Mg.

Para os relacionamentos das regiões de fronteira de BPA em função da idade foi configurada e treinada uma rede neuronal artificial (RNA) utilizando a ferramenta IPS (*inteligente problem solver*) disponível no software Statistica 12 (StatSoft, 2002). As variáveis de entrada para esta rede foram: precipitação, radiação solar global, idade, biomassa de folhas e os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg e a variável de saída foi o tipo de fronteira (1 – LFS ou 2 - LFI). Foram treinadas redes MLP, a rede foi avaliada em função de sua eficiência na separação das fronteiras.

Foram também ajustados modelos exponencial e potência para descrever a acumulação do nutriente, na parte aérea, no tronco e no lenho em função da área basal do povoamento, para as populações de fronteira superior e inferior desses relacionamentos.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 - Acumulação de biomassa

No relacionamento da biomassa da parte aérea em função da idade, que reflete a acumulação de carbono, 98 povoamentos se alinharam na região de fronteira superior (LFS, as que mais produziram parte aérea ao longo da rotação) e 93 na região de fronteira inferior (LFI), correspondendo a 4,41 e 4,18%, respectivamente, do total de povoamentos do banco de dados.

Os povoamentos da LFS e da LFI ocorrem em diversas regiões tal qual demonstrado na Tabela 2, é possível observar que os povoamentos selecionados em ambas as fronteiras se localizam em condições de sítio e de manejo amplamente distintas, e por vezes ambas as populações possuem ocorrência na mesma região.

Tabela 2: Regiões em que ocorrem os cultivos das populações de linha de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) para os relacionamentos de biomassa de parte aérea em função da idade.

Estado	Região LFS	Estado	Região LFI
BA	Região Sul	BA	Região Sul
ES	Litoral Norte	ES	Litoral Norte
MG	Vale do Rio Doce	MG	Vale do Rio Doce
	Triângulo Mineiro		Triângulo Mineiro
	Carbonita		Martinho Campos
	Dionísio	SP	Capão Bonito
SP	Capão Bonito		Luiz Antônio
	Itapetininga	MS	Selvíria
	Vale do Paraíba		Água Clara
	Botucatu		Aparecida do Taboado
	Lençóis Paulista		Inocência
	Agudos		Três Lagoas
	Luiz Antônio		
MS	Selvíria		

A produção de biomassa da parte aérea, de tronco e de lenho dos povoamentos clonais de eucalipto estudados cresceu com a idade, conforme bem descrito por equações logísticas (Tabela 3 e Figura 5). Mas, o ritmo de crescimento variou conforme a população se alinhava à região de fronteira superior (LFS, as que mais produziram ao longo da rotação) ou inferior (LFI),

como indicado pelos pontos de P1, P2 e P3 obtidos pela derivação dos modelos respectivos (Tabela 3). O P1 correspondeu à idade até a qual a floresta cresceu em menor taxa; do P1 até o P2, a floresta cresceu na maior taxa; e do P2 até o P3 houve uma desaceleração da taxa de crescimento até sua estabilização que ocorreu na idade correspondente ao P3.

Tabela 3. Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustados para biomassa ( $y^*$ , t ha<sup>-1</sup>) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade ( $x$ , ano), considerando as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

Fronteira	Biomassa <sup>4</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>				Idades (anos) <sup>2</sup>		
		a <sup>3</sup>	b	c	ry <sup>1</sup>	P1	P2	P3
LFS	MSL	237,198928	32,872943	0,892590	0,9439	2,44	3,91	5,39
LFI		157,788369	348,031255	1,187021	0,9829	3,82	4,93	6,04
LFS	MSTr	271,061263	27,129505	0,822482	0,9417	2,41	4,01	5,61
LFI		166,154653	317,259854	1,202577	0,9808	3,69	4,79	5,88
LFS	MSPA	345,062964	24,867437	0,789712	0,9734	2,40	4,07	5,74
LFI		173,214116	105,388972	0,973308	0,9847	3,43	4,79	6,14

$$^1/y = a/(1 + b * e^{(-cx)})$$

<sup>2/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>3/</sup> O valor do parâmetro a corresponde a máxima produção do componente atingível, que ocorre após a idade observada no P3

<sup>4/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

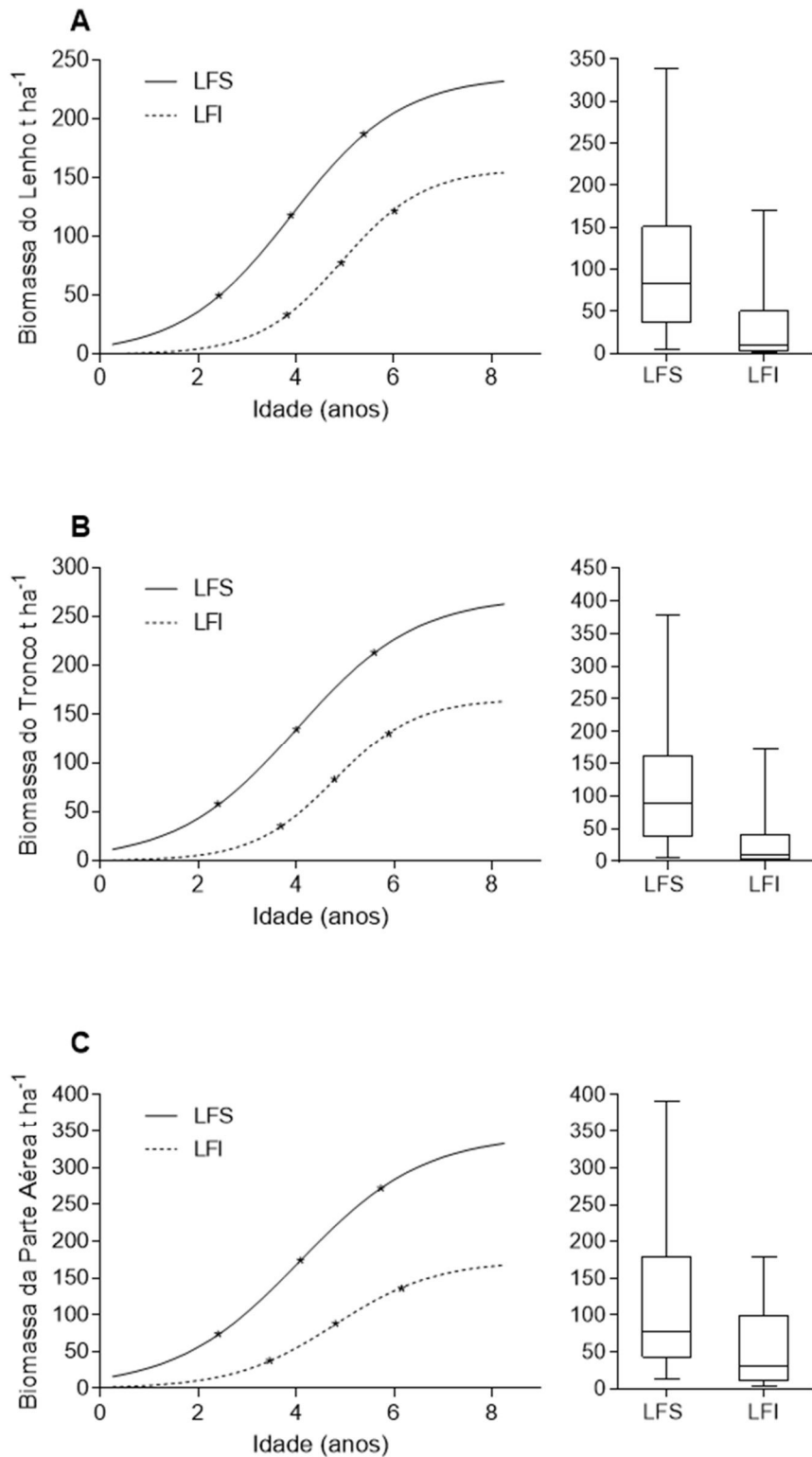


Figura 5. Curvas de acumulação estimadas de biomassa em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente na biomassa de lenho – A aos 2,44; 3,91 e 5,39 na LFS e na LFI 3,82; 4,93 e 6,04, na biomassa de tronco – B aos 2,41; 4,01 e 5,61 na LFS e na LFI 3,69; 4,79 e 5,88, na biomassa de parte aérea – C aos 2,40; 4,07 e 5,74 na LFS e na LFI 3,43; 4,79 e 6,14, de povoamentos clonais de eucalipto.

Os modelos das relações biomassa produzida de tronco em função da razão biomassa de tronco pela biomassa de parte aérea e a relação biomassa de tronco em função da razão biomassa de copa pela biomassa de tronco são apresentadas na Figura 6 e as equações na Tabela 4. Os dados obtidos tiveram um alto coeficiente de correlação e foram apresentados os valores relativos a toda a população e para as relações de fronteira superior e inferior, das populações selecionadas pela produção de biomassa de parte aérea em função da idade.

Tabela 4: Equações ajustadas para as relações de biomassa copa / tronco e tronco / parte aérea em função da biomassa de tronco, da população total e das linhas de fronteira (LF) das relações de produção de biomassa de parte aérea em função da idade

Relação	População	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>				
		a	b	c	d	ry <sup>2</sup>
	LFS	1,595637	1240,178233	0,118504	2,4558812	0,6786
Copa/Tronco	Geral	-0,077658	158,760387	786,111952	-0,708921	0,9173
	LFI	7,032275	0,960771	0,003280	0,965988	0,9627
	LFS	0,307644	71,329317	0,932154	1,406253	0,9270
Tronco/Parte Aérea	Geral	0,107972	8,297883	1,021458	0,862437	0,9463
	LFI	0,122543	7,199113	0,996324	0,951541	0,9825

<sup>1/</sup> Para a Parte Aérea população LFI o modelo utilizado foi o sigmoidal MMF

$$y = (a * b + c * x^d) / (b + x^d)$$

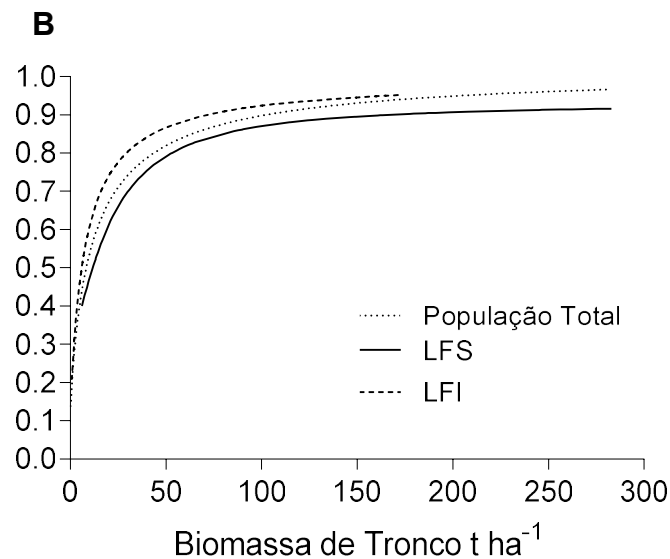
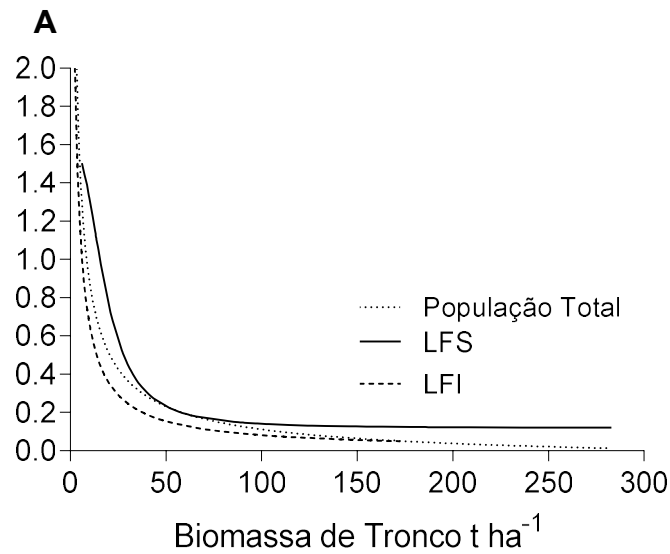


Figura 6: Parâmetros de copa, A – relação biomassa de copa/ biomassa de tronco em função da biomassa de tronco e B – relação de biomassa de tronco/ biomassa de parte aérea em função da biomassa de tronco. Ambas as relações representam a população total (do banco de dados) A linha de fronteira superior (LFS) e linha de fronteira inferior (LFI) e as populações de linha de fronteira (LF) foram das populações selecionadas de produção de biomassa de parte aérea em função da idade.

Para a produção de parte aérea, os povoamentos da LFS atingiram o P1 aos 2,4 anos, ou seja, aproximadamente um ano mais cedo do que os da LFI (aos 3,43 anos), sendo os valores de biomassa produzida de 72,85 e 36,54 t ha<sup>-1</sup> para essas duas populações, respectivamente. Essa maior precocidade também ocorreu na fase seguinte, em que os da LFS atingiram o P2 aos 4,07 anos (com biomassa de 172,58 t ha<sup>-1</sup>), ou seja, 8,64 meses antes dos povoamentos da LFI (biomassa de 86,80 t ha<sup>-1</sup>). A idade em que ocorreu a estabilização da produção foi também menor para os povoamentos da LFS (biomassa de 272,28 t ha<sup>-1</sup>) do que para os da LFI (136,65 t ha<sup>-1</sup>). Assim, a biomassa produzida ao final foi 50% menor nos povoamentos da LFI. Os povoamentos da LFS além de iniciarem a segunda fase de produção, a de maior crescimento, mais precocemente, esta teve uma duração de tempo maior do que os povoamentos da LFI que foram mais tardias e menos produtivas.

As idades que delimitam as fases de produção permitem aprimorar o manejo da adubação, uma vez que o nutriente deve estar disponível na planta antes da mudança de fase e a quantidade deste vai indicar como será a produção. Caso o nutriente seja disponibilizado após a mudança de fase a produção já estará comprometida. Cabe lembrar que a disponibilização do nutriente não acontecerá somente em função da adubação, já que fatores de manejo que desfavoreçam a absorção de nutrientes interferem negativamente na produção.

Em plantios florestais, num primeiro momento há um forte crescimento da parte aérea da planta, principalmente no que diz respeito a área foliar, para a formação da copa. Com o passar dos anos do plantio e após o fechamento da copa, os fotoassimilados passam a ser direcionados, em maior proporção, para o tronco, aumentando a sua biomassa (Schumacher et al., 2011).

Neste trabalho, também se pode observar, nas árvores da LFS, uma forte aceleração da produção em função da idade pouco acima de 2 anos, como também observado em outras condições de sítio, que possuem idade de corte por volta de 8 anos Du et al (2015). Já na população da LFI essa aceleração mais intensa da produção só ocorreu por volta de 3,5 anos, indicando atraso de

aproximadamente um ano da produção de biomassa de parte aérea devido ao manejo ou fertilização menor, que pode ter interferido na absorção de nutrientes.

Para a produção de tronco, os povoamentos da LFS atingiram o P1 aos 2,41 anos, ou seja, 1,28 ano antes do que os da LFI (aos 3,69 anos), sendo os valores de biomassa produzida de 57,22 e 34,97 t ha<sup>-1</sup> para essas duas populações, respectivamente. Na fase seguinte, os da LFS atingiram o P2 aos 4,01 anos (com biomassa de 135,36 t ha<sup>-1</sup>), ou seja, 9,36 meses antes dos povoamentos da LFI (biomassa de 83,10 t ha<sup>-1</sup>). A idade em que ocorreu a estabilização da produção foi também menor para os povoamentos da LFS, ou seja, 5,61 anos (com biomassa de 213,62 t ha<sup>-1</sup>) versus 5,88 anos (130,89 t ha<sup>-1</sup>) para os da LFI. O retardamento da produção de biomassa de tronco da LFI foi mais pronunciado do que o da biomassa da parte aérea.

Com base no quociente entre a biomassa de tronco e de parte aérea produzidas no P3, viu-se que a partição de biomassa, foi de 78% para os povoamentos da LFS e de 96% para os da LFI. Ao final da rotação os plantios mais produtivos, os da LFS, mantinham mais proporção de copa. Em plantios de eucalipto com idades variando de 6,5 a 10 anos, essa percentagem variou de 88 a 94 %, em diferentes sítios (Viera et al. 2013; Santana et al., 1999).

Para a produção de lenho, o P1 nos povoamentos da LFS foi atingido aos 2,44 anos (com biomassa de 50,21 t ha<sup>-1</sup>, ou seja, 1,38 ano antes do que os da LFI (aos 3,82 anos, com biomassa de 33,32 t ha<sup>-1</sup>). Na fase seguinte, os da LFS atingiram o P2 aos 3,91 anos (com biomassa de 118,44 t ha<sup>-1</sup>), ou seja, 1,02 ano mais cedo do que os povoamentos da LFI (biomassa de 78,88 t ha<sup>-1</sup>). A idade em que ocorreu a estabilização da produção é no P3 aos 5,39 anos (biomassa de 187,13 t ha<sup>-1</sup>) para os povoamentos da LFS e de 6,04 anos (com biomassa de 124,45 t ha<sup>-1</sup>) para os da LFI.

### **3.2 – Acumulação de nutrientes minerais**

As curvas de acumulação de nutrientes na parte aérea, no tronco e no lenho em função da idade, descritas por modelo logístico (exceto para o Ca na parte aérea na população da LFI), são mostradas nas Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 e nas Figuras 7, 8, 9, 10 e 11 para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, para os povoamentos da LFS e da LFI, que foram distintos entre si quanto às quantidades de nutrientes acumuladas e ao ritmo de acumulação, maiores para os da LFS.

Os pontos P1 e P2 aqui descritos indicaram as idades limites de fornecimento de nutrientes aos cultivos, e os maiores coeficientes de correlação encontrados nas populações de LFI em comparação às populações de LFS indicaram maior acurácia na seleção desta população. O anterior pode ter uma explicação biológica, esta população foi limite, por não ser possível o cultivo se desenvolver com menor absorção de nutrientes, estes estiveram no limite necessário para sobreviver. Na situação oposta, nos cultivos da LFS não houve problemas na sobrevivência com excesso de absorção de nutrientes, e estes cultivos puderam se encontrar com consumo de luxo, o que por outro lado, do ponto de vista da sustentabilidade, após a colheita, a manutenção dos resíduos culturais destes cultivos, que foram mais ricos em nutrientes, geraram matéria orgânica de melhor qualidade.

Tabela 5. Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustado para conteúdo de N ( $y$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade ( $x$ , ano), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI).

Fronteira	Biomassa <sup>4</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>				Idades (anos) <sup>2</sup>		
		a <sup>3</sup>	b	c	ry $\hat{y}$	P1	P2	P3
LFS	MSL	253,829496	36,550491	1,301047	0,6504	1,75	2,77	3,78
LFI		146,737460	3008,806832	1,778765	0,8964	3,76	4,50	5,24
LFS	MSTr	317,335912	25,524557	1,150411	0,6845	1,67	2,82	3,96
LFI		198,289087	3629,577800	1,885451	0,9100	3,65	4,35	5,05
LFS	MSPA	437,064837	3,715833	0,814928	0,5579	-0,01	1,61	3,23
LFI		278,546575	35,917900	0,948946	0,8590	2,39	3,77	5,16

$$^1/y = a / (1 + b * e^{(-cx)})$$

<sup>2/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>3/</sup> O valor do parâmetro a corresponde ao máximo conteúdo de N nos componentes atingíveis, que ocorre após a idade observada no P3

<sup>4/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

Tabela 6. Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustado para conteúdo de P ( $y^*$ , kg ha<sup>-1</sup>) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade (x, ano), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI).

Fronteira	Biomassa <sup>4</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>				Idades (anos) <sup>2</sup>		
		a <sup>3</sup>	b	c	ry $\hat{y}$	P1	P2	P3
LFS	MSL	29,099503	8,997197	0,643153	0,4931	1,37	3,42	5,46
LFI		13,674276	238,910179	0,924124	0,6874	4,50	5,93	7,35
LFS	MSTr	45,280824	10,367897	0,568482	0,5535	1,80	4,11	6,43
LFI		23,007445	171,051678	0,944636	0,6741	4,05	5,44	6,84
LFS	MSPA	51,98994	3,821996	0,475227	0,4844	0,05	2,82	5,59
LFI		27,375442	16,297470	0,512968	0,7771	2,87	5,44	8,01

$$^1/y = a/(1 + b * e^{(-cx)})$$

<sup>2/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>3/</sup> O valor do parâmetro a corresponde ao máximo conteúdo de P nos componentes atingíveis, que ocorre após a idade observada no P3

<sup>4/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

Tabela 7. Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustado para conteúdo de K ( $y^*$ , kg ha<sup>-1</sup>) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade (x, ano), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI).

Fronteira	Biomassa <sup>4</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>			ry $\hat{y}$	Idades (anos) <sup>2</sup>		
		a <sup>3</sup>	b	c		P1	P2	P3
LFS	MSL	151,448483	6,936690	0,950239	0,4511	0,65	2,04	3,42
LFI		88,455491	106,257484	1,033577	0,7549	3,24	4,51	5,79
LFS	MSTr	296,934495	5,214025	0,536813	0,6162	0,61	3,08	5,53
LFI		168,232623	89,423395	0,968193	0,7937	3,28	4,64	6,00
LFS	MSPA	302,476570	3,200775	0,934720	0,4482	-0,16	1,24	2,65
LFI		217,391376	13,630699	0,609589	0,7589	2,12	4,29	6,45

$$^1/y = a/(1 + b * e^{(-cx)})$$

<sup>2/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>3/</sup> O valor do parâmetro a corresponde ao máximo conteúdo de K nos componentes atingíveis, que ocorre após a idade observada no P3

<sup>4/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

Tabela 8. Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustado para conteúdo de Ca ( $y$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade ( $x$ , ano), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI).

Região	Tecido <sup>5</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1,2</sup>				Idades (anos) <sup>3</sup>			
		$a^4$	$b$	$c$	$d$	$ry\hat{y}$	P1	P2	P3
LFS	MSL	333,737850	17,514241	0,589352	--	0,5144	2,62	4,86	7,09
LFI		185,890718	1076,868103	1,057211	--	0,8112	5,36	6,60	7,85
LFS	MSTr	1296,110289	30,341442	0,556790	--	0,8045	3,76	6,13	8,49
LFI		790,421884	411,568311	0,883666	--	0,8502	5,32	6,81	8,30
LFS	MSPA	1805,708720	17,642317	0,395868	--	0,7701	3,92	7,25	10,6
LFI		34,708754	7393,321341	581,738040	4,858651	0,9553	--	--	--

<sup>1/</sup> $y = a/(1 + b * e^{(-cx)});$

<sup>2/</sup> Para a Parte Aérea população LFI o modelo que se ajustou corretamente foi o sigmoidal MMF  $y = (a \times b + c * x^d)/b + x^d$

<sup>3/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>4/</sup> O valor do parâmetro  $a$  corresponde ao máximo conteúdo de Ca nos componentes atingíveis, que ocorre após a idade observada no P3, exceto na para a Parte Aérea população LFI que foi ajustado o modelo sigmoidal MMF.

<sup>5/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

Tabela 9: Estimativas dos povoamentos dos modelos logísticos ajustado para conteúdo de Mg ( $y$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de componentes de árvores de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade ( $x$ , ano), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI).

Fronteira	Biomassa <sup>4</sup>	Parâmetros do modelo <sup>1</sup>			ry $\hat{y}$	Idades (anos) <sup>2</sup>		
		a <sup>3</sup>	b	c		P1	P2	P3
LFS	MSL	32,531900	9,471528	0,997799	0,6301	0,93	2,25	3,57
LFI		15,262222	15,782862	0,510368	0,9248	2,83	5,41	7,99
LFS	MSTr	113,612544	7,891339	0,520911	0,6408	1,44	3,97	6,49
LFI		59,294041	151,870744	1,002039	0,8401	3,70	5,01	6,33
LFS	MSPA	119,911334	3,926796	0,583685	0,5948	0,09	2,34	4,60
LFI		73,957935	40,259520	0,818703	0,8141	2,91	4,51	6,12

$$^1/y = a/(1 + b * e^{(-cx)})$$

<sup>2/</sup> P1, P2 e P3 correspondem às idades de mudanças de fases de produção

<sup>3/</sup> O valor do parâmetro a corresponde ao máximo conteúdo de Mg nos componentes atingíveis, que ocorre após a idade observada no P3

<sup>4/</sup> Componentes da árvore MSL, biomassa de lenho; MSTr, biomassa de tronco; MSPA, biomassa de parte aérea

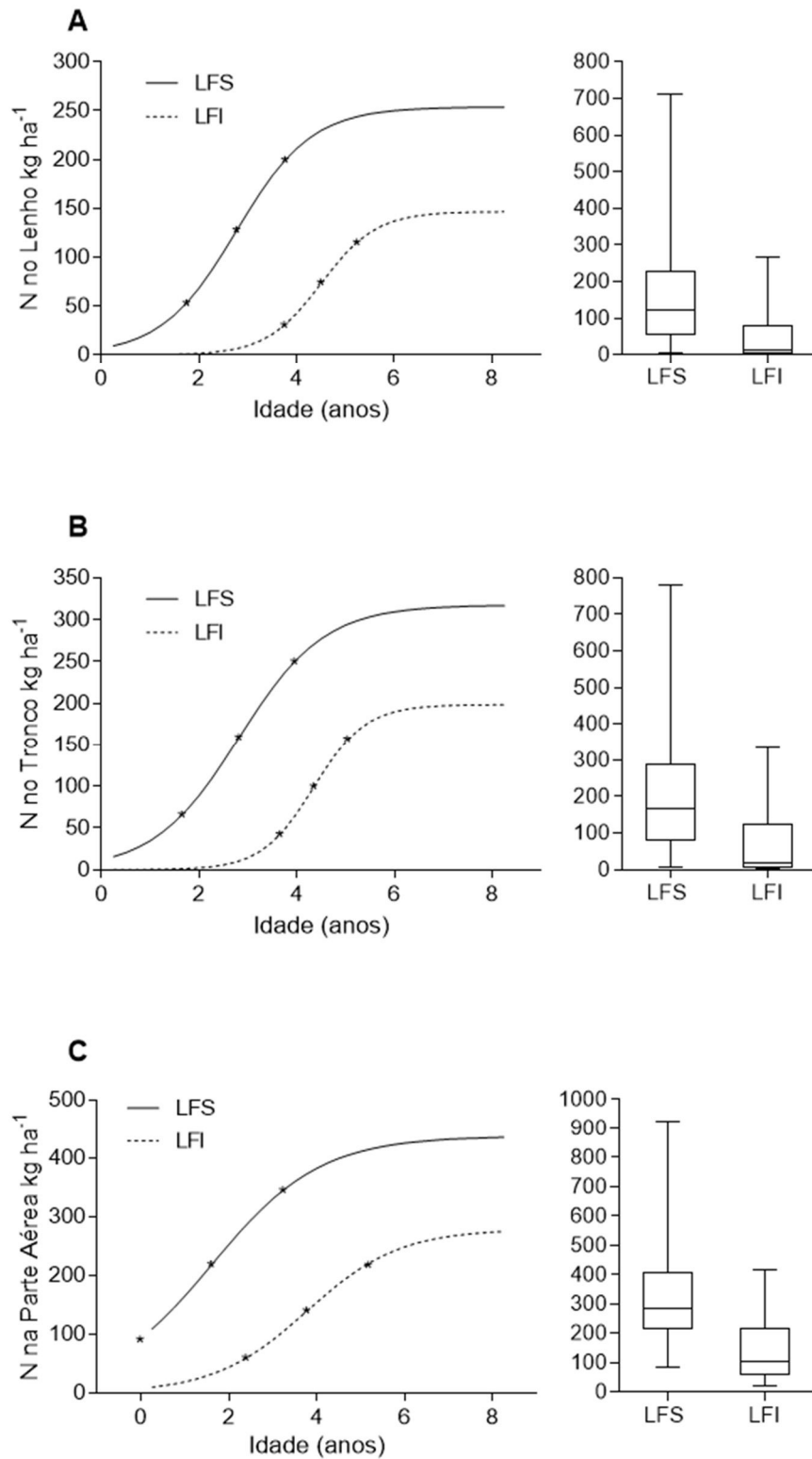


Figura 7: Curvas de acumulação estimadas de conteúdo de N nos tecidos em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente no lenho – A aos 1,75; 2,77 e 3,78 na LFS e na LFI 3,76; 4,50 e 5,24, no tronco – B aos 1,67, 2,82 e 3,96 na LFS e na LFI 3,65; 4,35 e 5,05, na parte aérea – C aos -0,01; 1,61 e 3,23 na LFS e na LFI 2,39; 3,79 e 5,16, de povoamentos clonais de eucalipto.

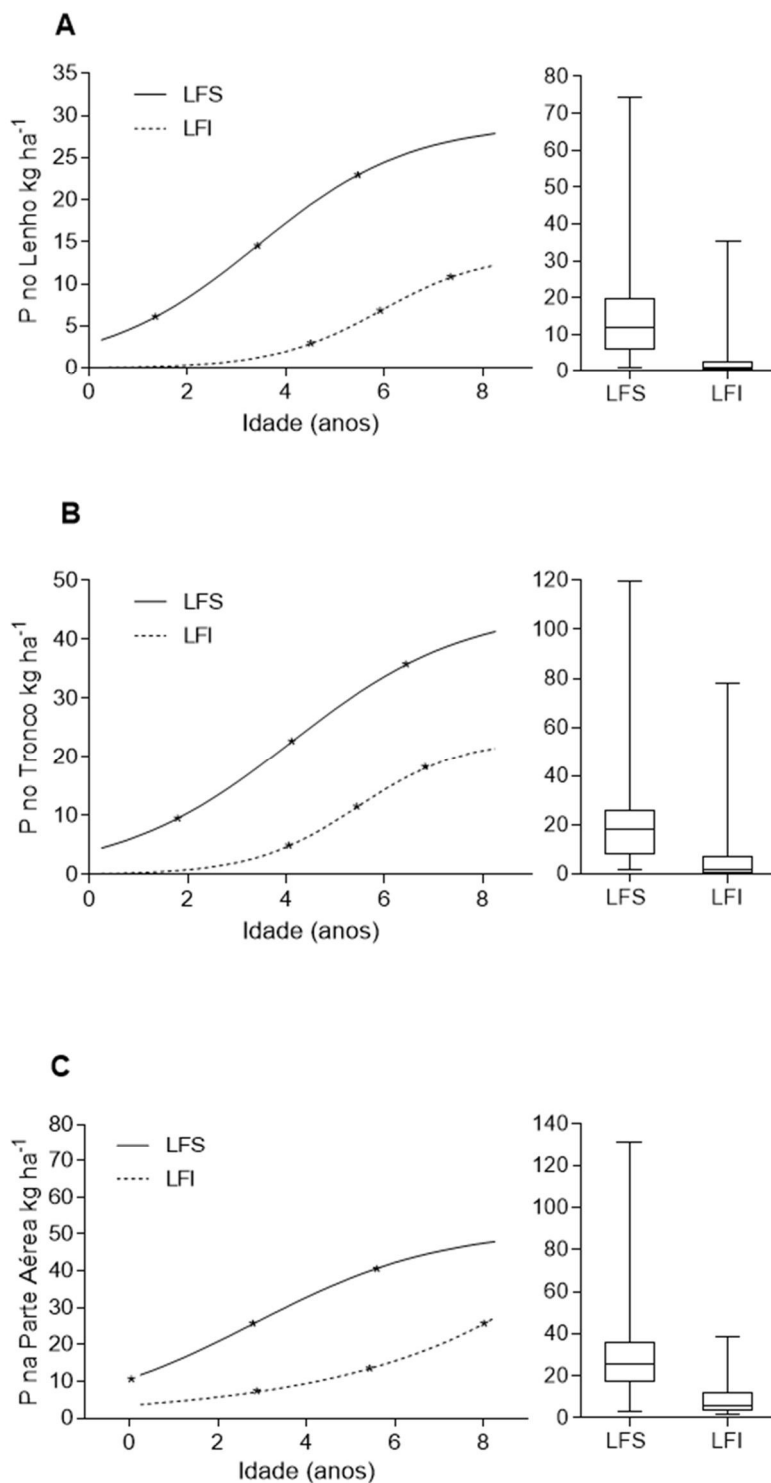


Figura 8: Curvas de acumulação estimadas de conteúdo de P nos tecidos em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente no lenho – A aos 1,37; 3,42 e 5,46 na LFS e na LFI 4,50; 5,93 e 7,35, no tronco – B aos na LFS 1,80; 4,11 e 6,43 e na LFI 4,05; 5,44 e 6,84, na parte aérea – C aos na LFS 0,05; 2,82 e 5,59 e na LFI 2,87; 5,44 e 8,01, de povoamentos clonais de eucalipto.

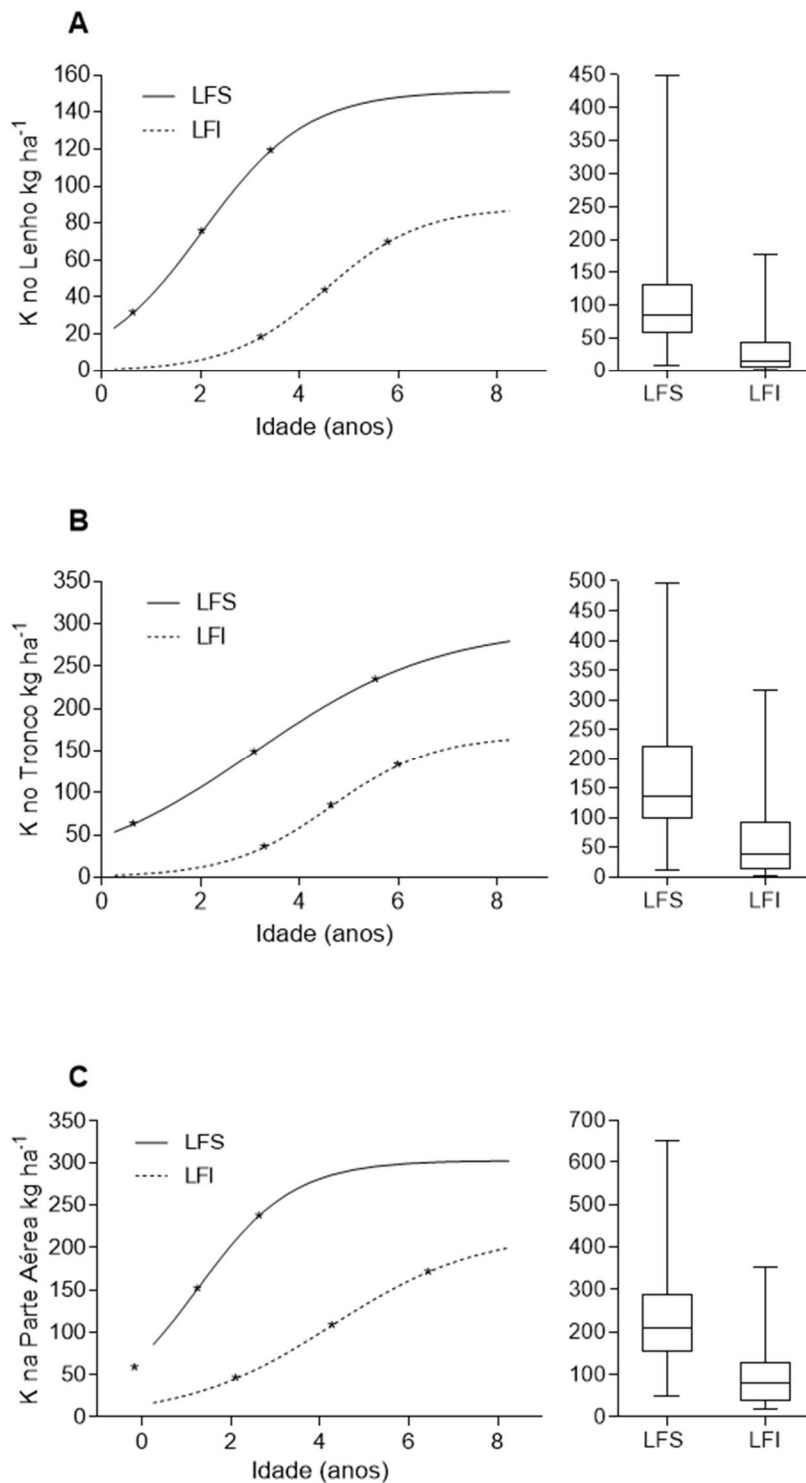


Figura 9: Curvas de acumulação estimadas de conteúdo de K nos tecidos em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente no lenho – A aos 0,65; 2,04 e 3,42 na LFS e na LFI 3,24; 4,51 e 5,79, no tronco – B aos na LFS 0,62; 3,08 e 5,53 e na LFI 3,28; 4,64 e 6,00, na parte aérea – C aos na LFS -0,16; 1,24 e 2,65 e na LFI 2,12; 4,29 e 6,45, de povoamentos clonais de eucalipto.

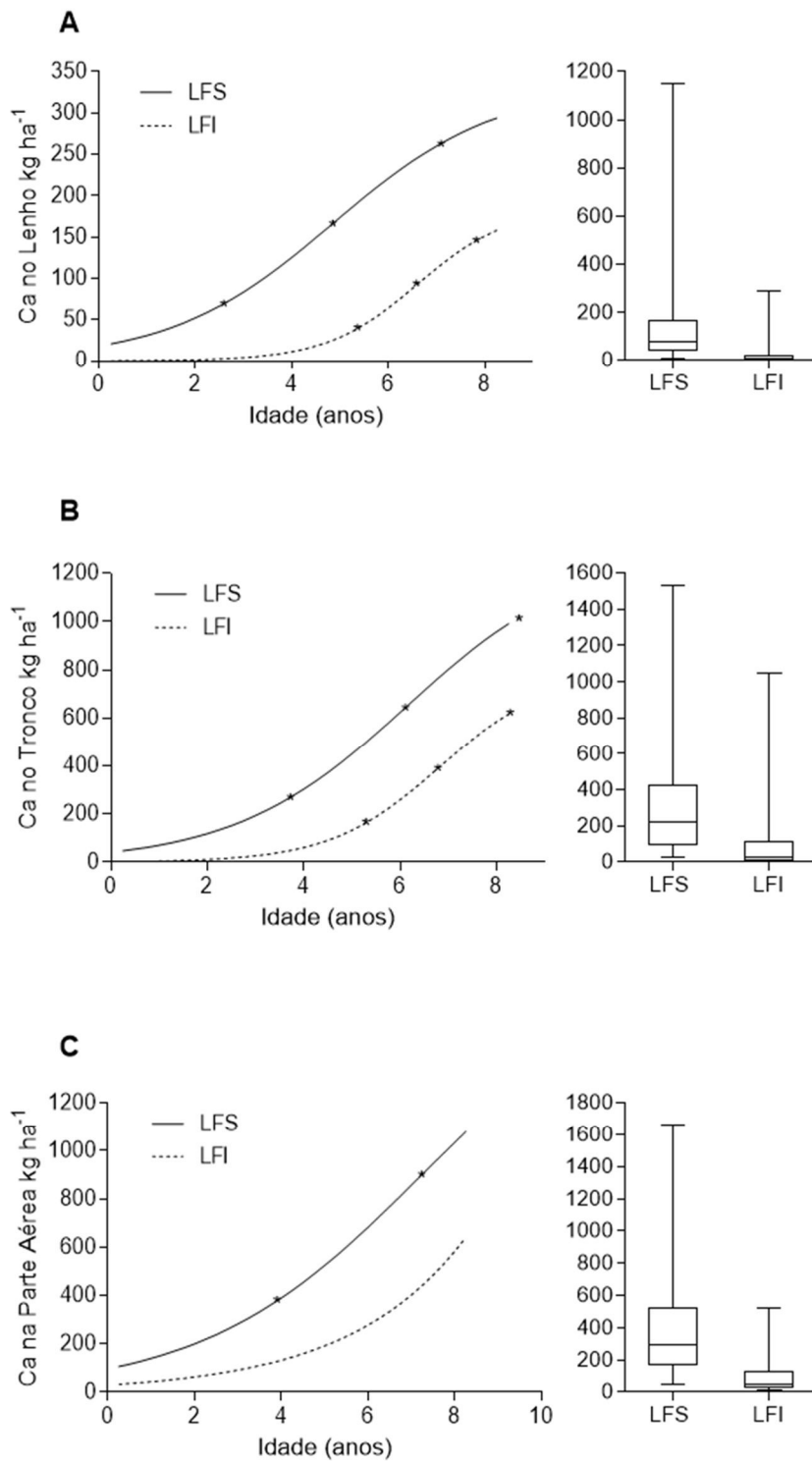


Figura 10: Curvas de acumulação estimadas de conteúdo de Ca nos tecidos em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente no lenho – A aos 2,62; 4,86 e 7,09 na LFS e na LFI 5,36; 6,60 e 7,85, no tronco – B aos na LFS 3,76; 6,13 e 8,49 e na LFI 5,32; 6,81 e 8,30, na parte aérea – C aos na LFS 3,92; 7,25 e 10,60, de povoamentos clonais de eucalipto.

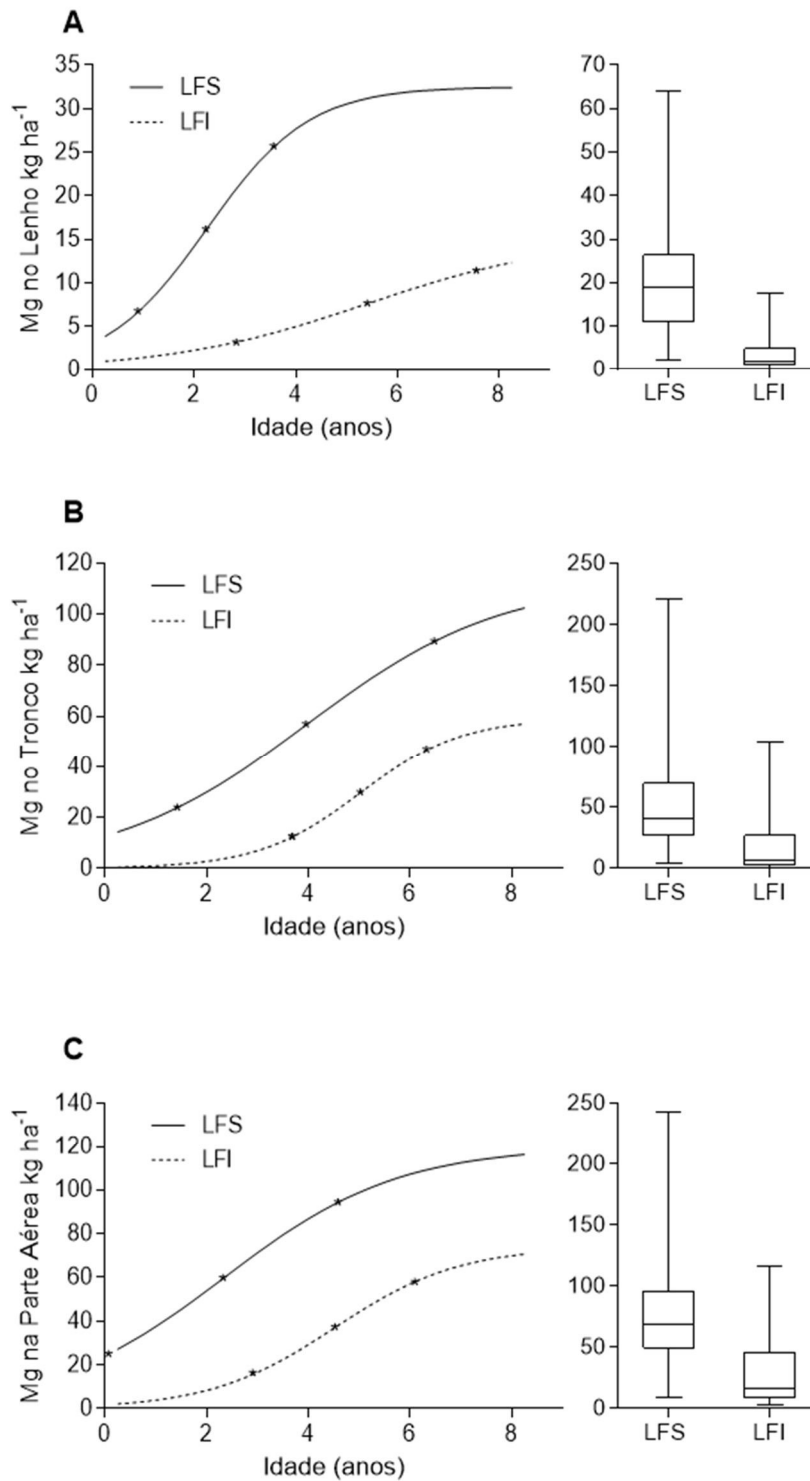


Figura 11: Curvas de acumulação estimadas de conteúdo de Mg nos tecidos em função da idade e a representação dos pontos P1, P2 e P3 respectivamente no lenho – A aos 0,93; 2,25 e 3,57 na LFS e na LFI 2,83; 5,41 e 7,99, no tronco – B aos na LFS 1,44; 3,97 e 6,49 e na LFI, 3,70; 5,01 e 6,33 na parte aérea – C aos na LFS 0,09; 2,34 e 4,60 e na LFI 2,91; 4,51 e 6,12, de povoamentos clonais de eucalipto.

Para exemplificar esses distintos padrões de acumulação, a Tabela 10 apresenta os conteúdos estimados de nutrientes na parte aérea para as populações da LFS e da LFI correspondentes às idades das fases já mencionadas na Tabela 3 para as curvas de acumulação de biomassa de parte aérea em função da idade, bem como os valores de conteúdos em relação à quantidade acumulada na idade estimada de colheita.

Tabela 10: Conteúdos estimados de nutrientes na parte aérea (kg ha<sup>-1</sup>) de povoamentos clonais de eucalipto nas idades para as populações das regiões de fronteira

Nutriente	Fronteiras					
	Superior			Inferior		
	Idade (ano)			Idade (ano)		
	2,40	4,07	5,74	3,43	4,79	6,14
N	286,5 (67,8)	385,2 (91,1)	422,5 (100)	116,8 (46,4)	201,7 (80,1)	251,9 (100)
P	23,2 (56,2)	33,2 (80,4)	41,3 (100)	8,2 (50,9)	11,5 (71,4)	16,1 (100)
K	225,8 (75,7)	282,4 (94,8)	298,0 (100)	80,6 (49,1)	125,3 (76,3)	164,3 (100)
Ca	270,8 (42,3)	399,3 (62,3)	640,7 (100)	62,7 (22,0)	152,1 (51,4)	295,8 (100)
Mg	61,0 (57,9)	87,9 (83,4)	105,4 (100)	21,6 (36,9)	41,1 (70,3)	58,5 (100)

<sup>/1</sup> Idades em que ocorrem os pontos P1, P2 e P3 nas curvas de acumulação de biomassa da parte aérea.

<sup>/2</sup> Valores entre parênteses indicam a proporção dos conteúdos (%) em relação aos existentes na maior idade.

A análise da Tabela 10 permite observar as sequências decrescentes de conteúdo: na LFS, aos 2,4 anos –  $N > Ca > K > Mg > P$ , essa mesma sequência ocorre na LFI aos 3,43 anos; na LFS, aos 4,07 e aos 5,74 anos –  $Ca > N > K > Mg > P$ ; na LFI aos 4,79  $N > Ca > K > Mg > P$  e aos 6,14 anos  $Ca > N > K > Mg > P$ . Nessas idades, as acumulações relativas de biomassa da parte aérea, conforme calculado com base na Tabela 1, foram: na LFS, 26,76 e 63,38% aos 2,4 e 4,07 anos, e a acumulação relativa de N, P, K, Ca e Mg foi de 67,8, 56,2, 75,7, 42,3 e 57,9%, respectivamente; já na LFI, a acumulação relativa de biomassa foi de 26,74 e 63,52%, aos 3,43 e 4,79 anos (valores relativos praticamente iguais aos verificados na LFS), ao passo que a acumulação relativa de N, P, K, Ca e Mg assumiu valores de 46,4, 50,9, 49,1, 21,2 e 36,9% .

Os baixos valores de absorção de Ca no P1 para ambas as populações sendo sempre menor do que 50% indicaram uma possível limitação de produção devido a um baixo fornecimento deste nutriente aos cultivos, seja por adubação ou por manejo. Devendo-se ainda ser melhorar entendimento desse comportamento em estudos futuros, pois como o Ca é imóvel por fazer parte da parede celular e necessário na formação do tronco, que ocorre principalmente entre o P1 e o P3, este nutriente possivelmente não deva ter maior porcentagem de absorção no P1 e sim no P2, diferentemente dos demais nutrientes.

A acumulação de nutrientes antecede à de biomassa, como já proposto por Neves (2000) e verificado em Martins (2004) e Valadares (2015). Essa proposição parece se aplicar para N, P, K e Mg, nutrientes de alta mobilidade no floema, em que a antecedência é importante para possibilitar posteriormente a remobilização por intermédio da ciclagem bioquímica. Para o Ca, os dados da Tabela 10 mostram que a antecedência só ocorreu para os povoamentos da LFS na idade de 2,4 anos.

Salvador et al. (2016) ao avaliar a dinâmica da produção e nutrientes em plantios clonais de *E. saligna* no sul do Brasil, observaram que com o avanço da idade do povoamento, houve uma migração dos nutrientes das folhas para as outras partes da planta. Essa migração não significou menores teores

nutricionais nas folhas, visto que na última idade avaliada, de 6,7 anos, ainda foi nas folhas que havia os maiores teores de N, P, K e S. Já para Ca e Mg, os maiores teores encontraram-se na casca.

O conhecimento sobre a acumulação de biomassa e de nutrientes em plantios florestais, bem como da partição entre esses nas árvores, e da movimentação dos nutrientes entre estes compartimentos, são importantes, visto que a ciclagem bioquímica é um importante fator da alta produtividade do eucalipto (Poggiani e Schumacher, 2000).

Os dados da Tabela 10 permitiram ainda obter as seguintes taxas médias de acumulação de nutrientes para a produção de biomassa de parte aérea, expressas em  $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , mostradas na Tabela 11.

Tabela 11: Taxas médias de acumulação de nutrientes de biomassa de parte aérea ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) em cada fase de crescimento das populações de fronteira.

Fase	Idade (ano)	N	P	K	Ca	Mg
Linha de Fronteira Superior						
Inicial	0 – 2,4	119,4	9,7	94,1	112,8	25,4
Crescimento	2,4 – 4,07	59,1	6,0	33,9	77,0	16,1
Estabilização	4,07 – 5,74	22,3	4,8	9,3	144,5	10,5
Linha de Fronteira Inferior						
Inicial	0 – 3,43	34,0	2,4	23,5	18,3	6,3
Crescimento	3,43 – 4,79	62,4	2,4	32,9	65,7	14,3
Estabilização	4,79 – 6,14	37,2	3,4	28,9	106,4	12,9

As taxas médias de acumulação da população de LFS para N, P, K e Mg foram sempre decrescentes, sendo a maior acumulação na primeira fase que culmina no P1 (0-2,4), e a menor na última fase de produção entre o P2 e o P3 (4,07-5,74). A única exceção neste caso foi o Ca que durante a segunda fase de produção P1 a P2 (2,4-4,07) teve uma diminuição da taxa média de acumulação, e na última fase de produção teve um aumento desta taxa, sendo encontrado o valor máximo. Para a população de LFI o N, K e Mg tiveram a maior taxa média de acumulação na segunda fase, entre P1 e P2 (3,43-4,79), sendo menor nas

demais fases. Para o P nas duas fases iniciais a taxa média de acumulação foi constante e maior na última fase de produção entre P2 e P3 (4,79-6,14). Já o Ca teve sempre aumento da taxa média de acumulação conforme houve avanço das fases de produção.

As curvas de acumulação de biomassa da parte aérea e de nutrientes pelos povoamentos da LFS descreveram o que se pode denominar de dreno-planta potencial, para C e para nutrientes minerais. O conhecimento do dreno-planta, e assim da demanda nutricional e de seu ritmo, como feito neste trabalho, é útil para embasar, pelo menos em parte (pois há a necessidade, também, do conhecimento do dreno-solo), as doses de nutrientes a serem utilizadas na fertilização e o manejo desta. Os povoamentos da LFS são aqueles em que os fatores de produção e o manejo devem estar em níveis ótimos ou próximos destes, o que envolve não apenas a disponibilidade desses fatores, mas também suas eficiências de uso. A propósito, Tisdale et al.(1985) concluíram que a produção das culturas é dependente de muitos fatores, que eles quantificam como 52, abrangendo fatores do ambiente (do clima, do solo e da planta) e fatores econômicos.

Os recursos ligados ao clima, com destaque para precipitação e radiação solar, ainda que não sejam diretamente manejáveis no contexto da produção comercial de plantios florestais, podem ter suas eficiências de uso alteradas em resposta a práticas de manejo. Como exemplo, pela adoção de diferentes esquemas de espaçamento, e assim de maiores ou menores populações de plantas por área, de arranjos espaciais, e da escolha de materiais genéticos adequados. As condições químicas, físicas e biológicas do solo também influenciam a eficiência nutricional, havendo interação, com as condições climáticas, do ponto de vista da resposta da planta.

É importante ressaltar que não bastam prescrições acertadas de manejo, para as condições do sítio florestal, mas também é importante a realização adequada das práticas de manejo, o que implica na necessidade de haver qualidade na realização das operações, inclusive quanto ao *timing* das mesmas.

### 3.3 – Eficiência de uso de fatores de produção

#### 3.3.1 – Radiação solar e água precipitada

Nos povoamentos da LFS e da LFI do relacionamento da biomassa de parte aérea em função da idade, equações foram ajustadas para a biomassa da parte aérea em função da precipitação e da radiação solar, considerados em termos de valores acumulados na idade das árvores (Tabela 12 e Figura 12). Fica evidente a existência de populações com distintas eficiências de uso de precipitação (EUPREC) e luz (EURAD), muito maiores na população da LFS. Nos povoamentos das LFS da Figura 12, os demais fatores de produção, aí incluídos os nutrientes, devem estar em níveis não limitantes, com base no conceito de linha de fronteira. Logo, as curvas das Figuras 12 A e 12 B, para os povoamentos da LFS, permitem obter o efeito per si da disponibilidade de cada um desses fatores sobre a produção de parte aérea. A derivada da biomassa produzida em relação ao nível do fator de produção pode ser entendida como sua eficiência de uso. Dessa forma, comparando a curva obtida para a população da LFS com a da LFI, tem-se o efeito do nível de limitação quanto aos outros fatores sobre o decréscimo na EURAD e EUPREC.

Tabela 12: Estimativas dos povoamentos ajustado para modelos gaussianos para biomassa de parte aérea ( $y$ , t ha<sup>-1</sup>) de plantios clonais de eucalipto em função da radiação solar (MJ m<sup>-2</sup> período<sup>-1</sup>) e da precipitação pluviométrica (mm período<sup>-1</sup>), para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento.

Variável	Fronteira	Parâmetros do modelo			
		a	b	c	ry <sup>2</sup>
Radiação Solar	LFS	335,145795	46373,753438	17751,243408	0,9880
	LFI	169,964807	50712,116007	16971,382868	0,9831
Precipitação	LFS	361,509646	10597,659325	3968,932517	0,9556
	LFI	167,905186	10216,350962	3111,558691	0,9730

$$^1/ y = a * \exp -(-x + b)^2 / (2 * c^2)$$

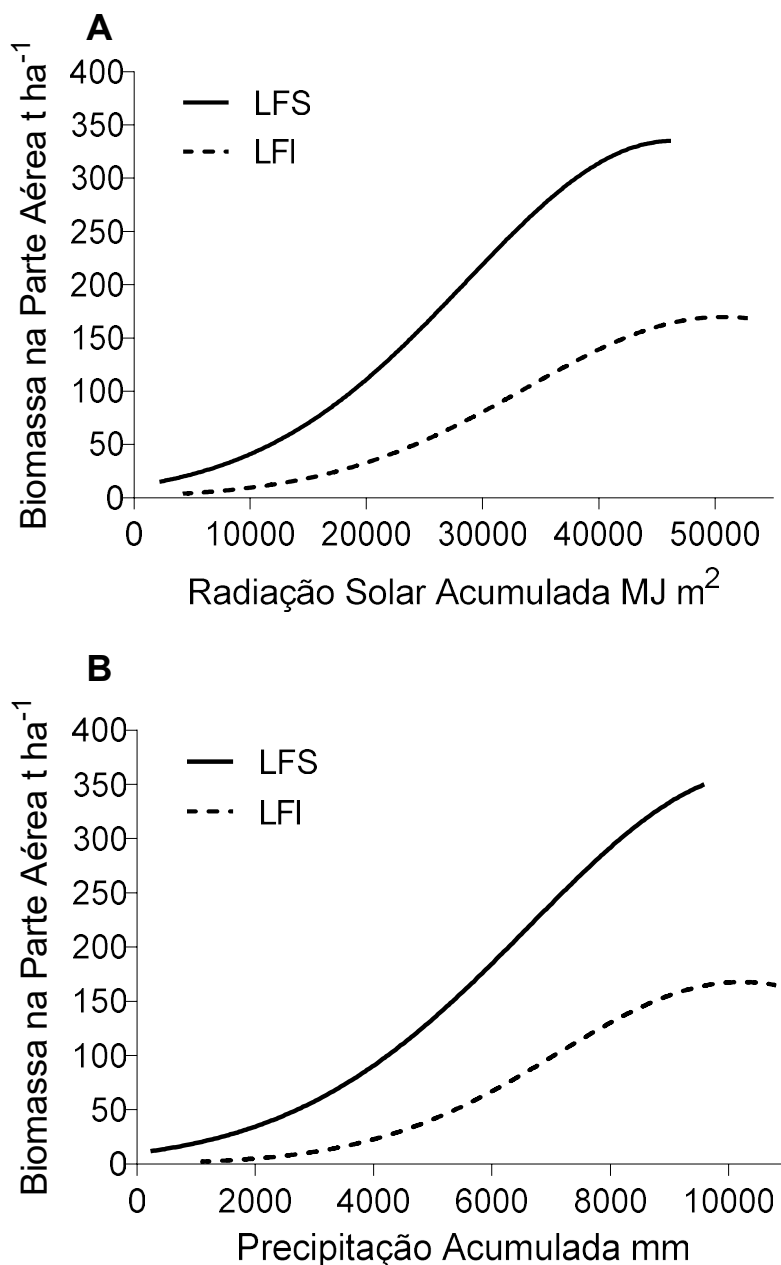


Figura 12. Curvas de acumulação estimadas da biomassa da parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da radiação solar (A) e da precipitação (B) acumuladas, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

A eficiência de uso dos recursos radiação solar acumulada e precipitação acumulada cresceu com a disponibilidade acumulada desses recursos. Deve-se entender que por disponibilidade acumulada, considerou-se, implicitamente, o do efeito da idade do povoamento. Essa é a razão de as curvas da Figura 12

serem de padrão análogo aos das curvas de crescimento. Outro aspecto, foi a grande diferença entre os valores de EURAD e EUPREC quando as populações de fronteira, superior e inferior, foram comparadas entre si. Nesse sentido e para exemplificar a utilidade de se conhecer os valores de EUPREC e EURAD, as Tabelas 13 e 14 contém os valores de estimativas de biomassa de parte aérea para diferentes cenários de radiação solar e de precipitação, respectivamente ao longo de uma rotação florestal de seis anos.

Na população da LFS, com base na média das diferentes idades e dos três cenários de disponibilidade de luz, a EURAD foi de  $0,596 \text{ g MJ}^{-1}$  de radiação solar global, sendo 2,24 vezes maior do que na população da LFI. Com base na análise da variação da EURAD ao longo da rotação, observou-se que, a superioridade dos povoamentos quando a EURAD decresceu com a idade de 3,75 vezes maior para 1,38 vezes maior, o que refletiu no crescimento inicial mais lento e sempre menor dos plantios da LFI. Estes valores foram condizentes ao relatado por Whitehead & Beadle (2004) que encontraram valores na literatura de EURAD entre  $0,6 - 2,7 \text{ g MJ}^{-1}$ , porém os valores mais comuns encontraram-se entre  $0,6-0,8 \text{ g MJ}^{-1}$  e os maiores valores ocorreram em condições irrigadas. Neste trabalho somente na LFS aos 6 anos na LFS chegou-se a  $0,7 \text{ g MJ}^{-1}$  e na LFI foram encontrados valores muito abaixo de EURAD.

Em relação a EUPREC, e com base na média das diferentes idades e dos três cenários de precipitação pluviométrica, nos povoamentos da população da LFS ela foi de  $24,41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , sendo 2,54 vezes maior do que nos povoamentos da LFI. A maior absorção de nutrientes que acarretou numa maior EUPREC foi também observada por Dye, (2000) na África do Sul, que concluiu que as maiores EUPREC ocorreram em função da adubação, (principalmente nas idades iniciais) e do manejo conservacionista, que mantém resíduos no solo e evita a compactação. Maiores temperaturas e topografia plana que favorecem a infiltração de água no solo.

Os valores encontrados neste trabalho diferem dos relatados por Whitehead & Beadle (2004) que encontraram valores anuais de eficiência de uso de água na literatura de  $5 \text{ g}$  de matéria seca por  $\text{kg}$  de água, medido em lisímetro, o que equivale a  $50 \text{ kg}$  de PA  $\text{ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  e também  $1$  a  $5 \text{ g}$  de tronco por  $\text{kg}$  de

água, o que equivale a 10 a 50 kg de tronco ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. A diferença entre a obtenção dos valores de EUPREC deste trabalho e de eficiência de uso de água dos obtidos na literatura e o período estudado podem explicar a diferença dos valores obtidos. Neste trabalho a metodologia de banco de dados utilizada permitiu observar desde o período de implantação da cultura, que possui baixa EUPREC a até o seu estabelecimento que possui maior EUPREC e os modelos gerados das populações mais contrastantes permitiram estimar a EUPREC durante o período de cultivo. Embora, pela metodologia utilizada não foi feito o balanço hídrico de água infiltrada no solo, o que exclui o escoamento superficial, e caso este balanço seja feito não poderíamos mais chamar esta variável de EUPREC e sim de eficiência de uso de água EUÁGUA, que foi a variável utilizada pelos autores citados, e esta seria maior.

Não se buscou identificar nos dados obtidos anomalias de precipitação durante o período de cultivo, tais como períodos de estiagem, e sua correlação com a produção e acumulação de nutrientes.

Tabela 13: Estimativas de biomassa de parte aérea (BPA) de plantios clonais de eucalipto ao longo da rotação, considerando três cenários de disponibilidade de luz, para povoamentos das fronteiras superior (LFS) e inferior (LFI) com suas eficiências de uso da radiação solar (EURAD)

Idade (ano)	EURAD	BPA	EURAD	BPA
	g MJ <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	g MJ <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>
LFS		LFI		
-----14,9 MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> -----				
1	0,431	23,5	0,089	4,9
2	0,477	45,4	0,099	10,8
4	0,592	129,7	0,183	40,2
6	0,763	250,7	0,297	97,8
-----16,9 MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> -----				
1	0,418	25,7	0,088	5,4
2	0,433	53,5	0,107	13,1
4	0,644	159,1	0,212	52,2
6	0,788	291,8	0,332	122,9
-----18,9 MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> -----				
1	0,410	28,2	0,088	6,1
2	0,451	62,3	0,115	15,8
4	0,964	191,3	0,244	67,2
6	0,779	321,9	0,353	146,1

Tabela 14: Estimativas de biomassa de parte aérea (BPA) de plantios clonais de eucalipto ao longo da rotação, considerando três cenários de disponibilidade de precipitação, para povoamentos das fronteiras superior (LFS) e inferior (LFI) com suas eficiências de uso da precipitação (EUPREC)

Idade (ano)	EUPREC	BPA	EUPREC	BPA
	kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>
	LFS		LFI	
-----1000 mm ano <sup>-1</sup> -----				
1	19,3	19,3	2,1	2,1
2	17,3	34,6	2,6	5,2
4	22,7	90,9	5,7	22,7
6	30,8	184,6	11,2	67,0
-----1250 mm ano <sup>-1</sup> -----				
1	18,1	22,6	2,1	2,6
2	18,1	45,2	3,1	7,7
4	26,7	133,7	8,3	41,3
6	35,5	266,4	15,3	114,7
-----1500 mm ano <sup>-1</sup> -----				
1	17,4	26,2	2,2	3,3
2	19,3	58,7	3,8	11,4
4	30,8	184,6	11,2	67,0
6	37,0	333,4	17,3	155,6

Os valores médios de radiação solar e de precipitação para os povoamentos das regiões de fronteira superior e inferior, respectivamente, foram: 17,1 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e 16,7 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>; 1300 mm ano<sup>-1</sup> e 1291 mm ano<sup>-1</sup>, ou seja, pouco diferiram entre essas populações, o que pode indicar que as diferenças na produção de biomassa da parte aérea e de EURAD e EUPREC entre os povoamentos da LFS e da LFI não sejam devidas a limitações por luz e precipitação para os povoamentos da LFI, cabendo, contudo, investigar se elas podem ser explicadas pela produção de superfície fotossintetizante e de sua qualidade nutricional.

Como mostrado na Figura 13, e com base na mediana ao longo da rotação, a biomassa de folhas dos povoamentos da LFS foi 1,02 vezes maior do que a existente nos povoamentos da LFI, o que implicou na existência de área foliar proporcionalmente maior, aproximadamente, em muito maior interceptação de energia luminosa, dado o maior índice de área foliar (IAF) e assim em maior fotossíntese. A produção de biomassa de tronco de povoamentos clonais de eucalipto no Vale do Rio Doce, MG, relacionou-se principalmente à extensão da superfície fotossintetizante (IAF), mas a inclusão da qualidade nutricional e do conteúdo relativo de água da folha aumentaram de modo importante (em cerca de 30%) o grau de explicação do modelo de regressão múltipla utilizado (Lourenço, 2009).

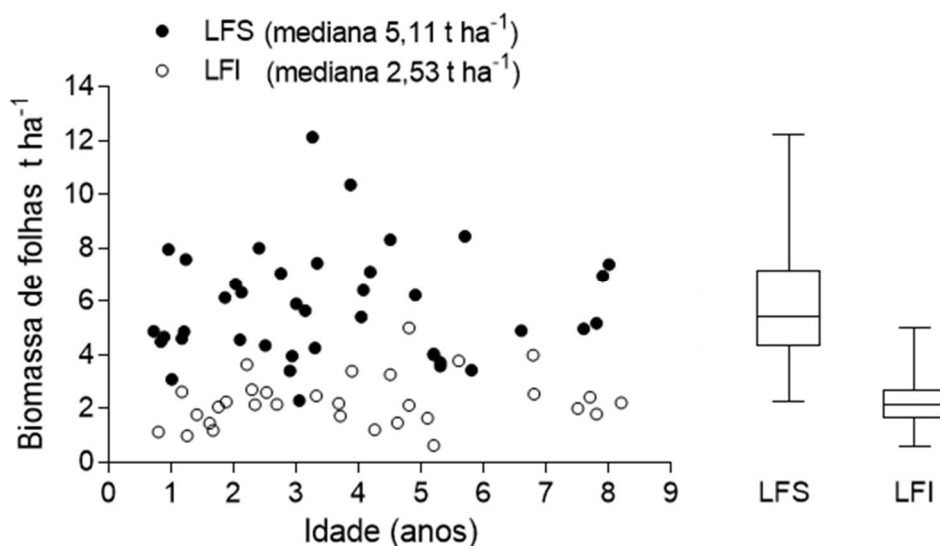


Figura 13: Biomassa de folhas ao longo da rotação para os povoamentos das populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) do relacionamento de biomassa de parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade

Os teores de nutrientes nas folhas fornecem ideia do grau de balanço nutricional, o aspecto quantitativo da nutrição, e assim da condição nutricional da superfície fotossintetizante, e indicam a eficiência com que os nutrientes são utilizados para a produção de folhas.

Para os dados de teores foliares, só houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) pelo teste t para amostras independentes entre as populações da LFS e da LFI para P ( $1,18 \text{ g kg}^{-1}$  na LFS vs  $0,96 \text{ g kg}^{-1}$  na LFI) e para Mg ( $2,62 \text{ g kg}^{-1}$  na LFS vs  $2,40 \text{ g kg}^{-1}$  na LFI), embora ambos esses pares de valores indiquem a não existência de limitação quanto a esses nutrientes, com base em Galdino (2015). Contudo, em razão de a biomassa de folhas ser muito maior, como já comentado, nos povoamentos da LFS, os conteúdos foliares de N, P, K, Ca e Mg foram também muito maiores ( $p < 0,01$ ) nos povoamentos da LFS. Em povoamentos clonais de eucalipto na região litorânea norte do Espírito Santo, concluiu-se que em eucalipto a maior produção das árvores clonais relaciona-se à maior biomassa foliar e aos seus maiores conteúdos de nutrientes e não à eficiência de utilização dos mesmos (Santos et al., 2015). O conteúdo do nutriente na folha inteira, em essência, a área e a qualidade nutricional da superfície fotossintetizante.

A eficiência da rede neural selecionada, para classificar os dados como LFS ou LFI, foi de 98,68 %, com 11 neurônios na camada escondida e as variáveis de entrada precipitação, radiação solar, idade, biomassa de folhas e teores foliares de N, P, K, Ca e Mg. Assim, em essência, além da disponibilidade dos fatores de produção água e luz, a extensão (com base na biomassa de folhas, por intermédio da área foliar específica) e a qualidade nutricional da superfície fotossintetizante são importantes na eficiência de uso de água e luz visando a acumulação de carbono na biomassa florestal.

A maior produção de folhas, e assim de área foliar, resultando em aumento da eficiência luminosa e na taxa de fotossíntese, é fortemente relacionada com a aplicação de fertilizantes, de modo a elevar a disponibilidade de nutrientes em sítios com solos de baixa fertilidade (Landsberg e Wright, 1989; Smethurst et al., 2003; Forrester et al., 2013). A interação entre fertilização, especialmente a de N (mas em solos tropicais também com P, dada a pobreza maior e mais generalizada de P nesses solos) com área foliar, tem sido explicada pelo fato de plantas mais bem nutridas tenderem a produzir mais folhas, bem como pelas menores taxas de senescência de folhas e ramos (Wiseman et al., 2006, Forrester et al., 2012). Essa maior longevidade da folha foi observada em

resposta ao N (Forrester et al., 2012) e também ao K, ainda que para este último não tenha havido efeito sobre a área foliar, embora a longevidade da folha tenha sido duas vezes maior que no tratamento controle (Laclau et al., 2009; Epron et al., 2012). A produção de folhas, juntamente com a de raízes finas, são eventos de elevado custo energético.

Nessa linha de raciocínio, como resultado do pareamento da população da LFS para a produção da parte aérea com a população da LFS do conteúdo do nutriente na parte aérea, feito neste trabalho para cada um dos cinco nutrientes estudados, foram obtidas novas populações de povoamentos concordantes quanto à acumulação de biomassa e de nutrientes na parte aérea; procedimento semelhante foi feito também para obter as populações concordantes da LFI (Tabela 15).

Tabela 15: Frequência relativa (%) de povoamentos clonais de eucalipto concordantes quanto à produção de biomassa da parte aérea e conteúdos de nutrientes nas fronteiras superior e inferior das curvas de acumulação de biomassa da parte aérea e desses nutrientes com a idade

Nutriente	Fronteira	
	Superior	Inferior
N	42,2	34,8
P	37,8	32,2
K	43,7	33,3
Ca	33,8	24,5
Mg	41,7	38,7
Média	39,8	33,3

Os teores foliares obtidos nessas novas populações são mostrados na Figura 14, para N, P e K, e na Figura 1, para Ca e Mg, e diferem entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste t para amostras independentes, para P, K, Ca e Mg, maiores nos povoamentos da LFS e tendem a ser maiores para o Ca ( $p = 0,13$ ), indicando que a condição nutricional quanto ao grau de balanço foi diferente entre as populações. Nestas, também houve superioridade quanto à produção de folhas dos povoamentos da LFS ( $5,8 \text{ t ha}^{-1}$ ) comparados aos da LFI ( $2,2 \text{ t ha}^{-1}$ ).

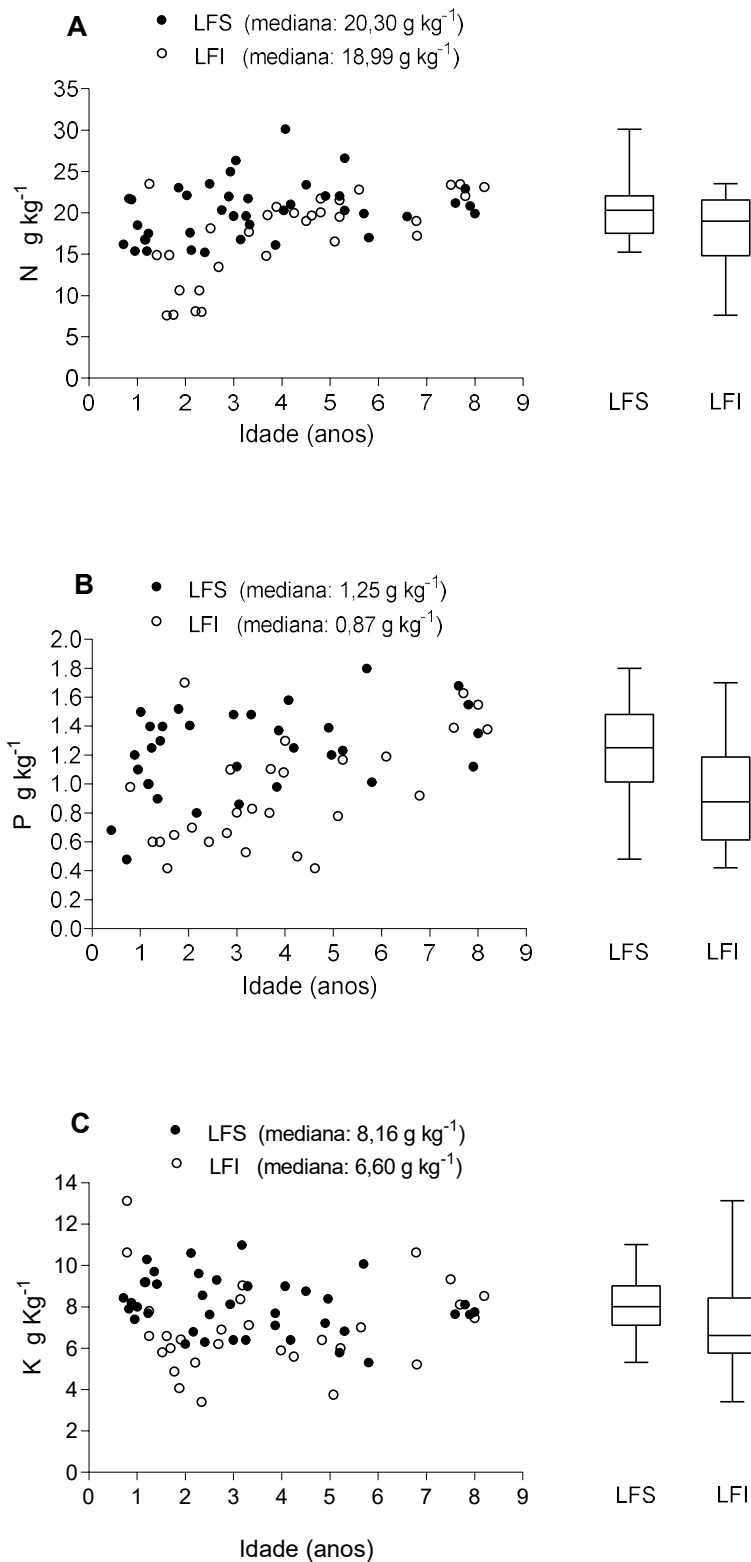


Figura 14: Teores foliares dos nutrientes N, P e K, nas figuras A, B e C respectivamente, ao longo da rotação para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) do relacionamento de biomassa de parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade.

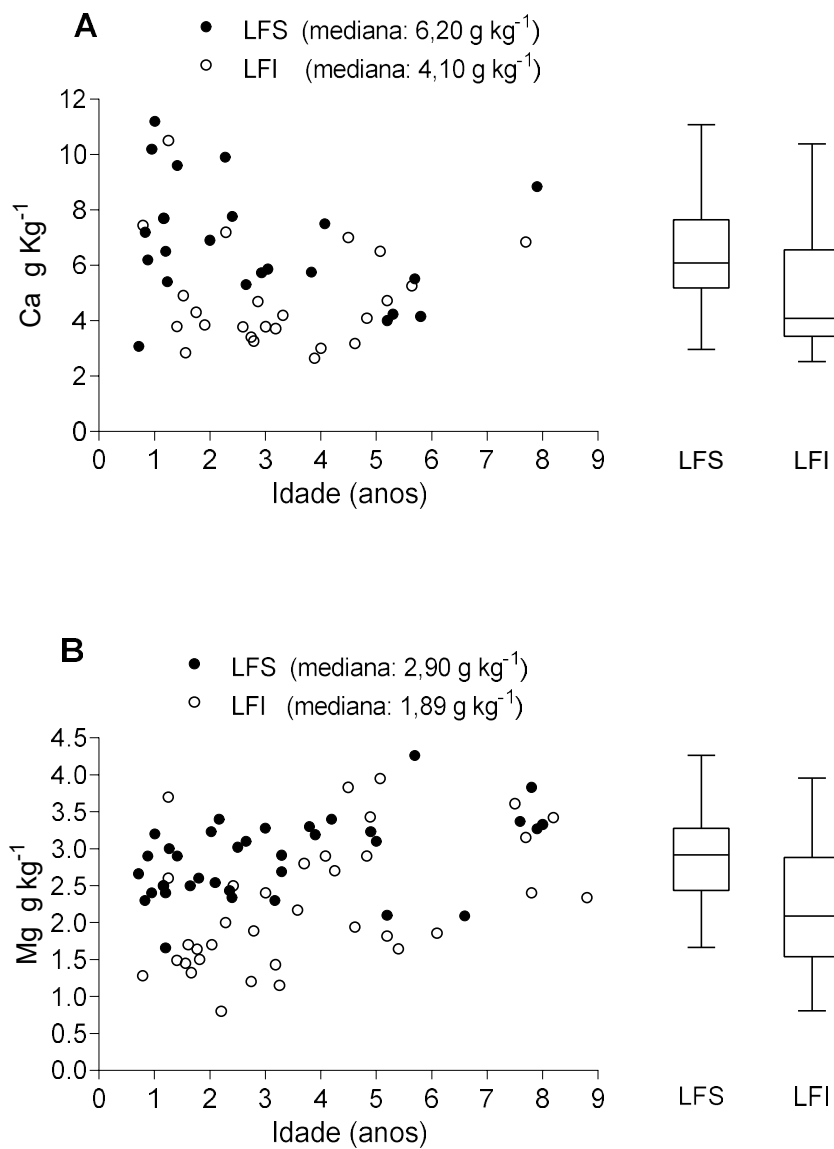


Figura 15: Teores foliares dos nutrientes Ca e Mg, nas figuras A e B, ao longo da rotação para as populações das regiões de fronteira superior e inferior do relacionamento de biomassa de parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade.

### **3.3.2 – Nutrientes minerais**

#### **3.3.2.1 – Em função da Idade do povoamento**

A relação entre os valores estimados de biomassa de parte aérea com a idade, em base na respectiva curva de acumulação da Tabela 3, e os conteúdos de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea estimados com base nas Tabelas 5 a 9, resultou nas curvas que descrevem o padrão de variação dos valores de CUB com a idade dos povoamento, mostrados na Figura 16. E, na Tabela 16, há os valores de biomassa de parte aérea, os conteúdos e os CUB de N, P, K, Ca e Mg ao longo da rotação, nas mesmas idades utilizadas para EURAD e EUPREC.

Tabela 16: Biomassa da parte aérea ( $t\ ha^{-1}$ ) conteúdos ( $kg\ ha^{-1}$ ) e Coeficientes de Utilização Biológica (CUB  $kg\ kg^{-1}$ ) de N, P, K, Ca e Mg para a produção de parte aérea dos povoamentos das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI), conforme diferentes idades do povoamento.

Idade (ano)	Parte Aérea	N	P	K	Ca	Mg
Conteúdo – LFS						
1	28,1	165,3	15,3	134,0	140,3	37,6
2	56,3	252,9	20,8	202,5	200,8	53,9
4	167,8	382,5	32,8	281,1	361,3	86,9
6	283,4	425,2	42,3	298,9	683,8	107,2
Conteúdo – LFI						
1	4,2	18,7	4,5	25,8	43,6	3,9
2	10,8	43,6	5,7	43,2	63,2	8,4
4	55,3	154,2	9,5	99,3	132,5	29,3
6	132,6	248,5	15,6	160,8	278,3	57,1
CUB – LFS						
1		170	1837	210	200	747
2		223	2707	278	280	1045
4		439	5116	597	464	1931
6		667	6700	948	414	2644
CUB- LFI						
1		227	948	164	97	1076
2		247	1880	250	171	1289
4		357	5821	554	415	1877
6		533	8518	824	476	2323

Analisando a variação do CUB com a idade, para as idades de 1, 2, 4 e 6 anos, ou seja, ao longo de um padrão de rotação muito adotado no Brasil, ficou claro que a eficiência de utilização de nutrientes aumentou com a idade, para os povoamentos da LFS e da LFI (Tabela 16). Cabe lembrar que a maior parte dos nutrientes foi absorvidas nas idades iniciais, na primeira fase a até o P1, nas fases subsequentes há uma maior produção de biomassa de tecidos com

menores teores de nutrientes, como os do lenho, o que fará com que o CUB aumente com a idade.

Em termos da média das 4 idades constantes da Tabela 16, os CUB de N (37% inferior), de P (apenas 5% inferior) e de Mg (apenas 3% inferior) foram menores na LFS do que na LFI; para K e Ca os CUB foram em torno de 13 a 17% superiores na LFS. Contudo, cabe avaliar esse padrão ao longo da rotação. Assim, na idade de 1 ano, somente para N é que o CUB da LFS foi menor do que o da LFI. Na idade de 2 anos, além do N, também para o Mg, o CUB para a LFS foi menor do que para LFI. Na idade de 4 anos, os CUB para todos os nutrientes estudados foram maiores na LFS. E na idade de 6 anos, os CUB de N, K e Mg são maiores na LFS. Chama a atenção que para K (Figura 12 C), os CUB da LFS foram sempre maiores do que os da LFI.

As curvas da Figura16 mostraram que para N, P, K e Mg, nutrientes de alta mobilidade no floema e por isso sujeitos à ciclagem bioquímica, o grande aumento nos valores de CUB ocorreu nas fases de grande aumento na produção de biomassa, que resultou do grande e rápido aumento na superfície fotossintetizante, no IAF. Como consequência da grande e rápida produção de novos tecidos, houve o estabelecimento de gradiente de idade fisiológica do tecido, o vetor causal da ciclagem bioquímica, importante estratégia envolvida na economia nutricional de árvores. Em trabalho realizado com eucalipto na região Sul, foi observado que a ciclagem bioquímica de N se iniciou a partir de três anos (Viera et al.,2013).

A ciclagem bioquímica ocorreu em nível de folhas, e, também, no lenho, entre cerne e alburno, durante a formação do cerne, sendo mais importante inicialmente em nível de folhas e posteriormente em nível de lenho, à medida que a alocação de carbono para o lenho foi aumentando.

Em essência, o CUB é o inverso do teor do nutriente na matéria seca, podendo ser entendido como propriedade intensiva da matéria, ou seja, diz da qualidade nutricional da matéria, tendo maior grau de universalidade. Como tal, existe relacionamento entre CUB e nível de ciclagem bioquímica. Para um mesmo material genético, em povoamentos mais produtivos, e assim com

crescimento maior e mais rápido, para os quais a disponibilidade de nutrientes no solo é maior, a contribuição da ciclagem bioquímica é maior em termos absolutos. Já em plantios menos produtivos, se crescidos em solos mais pobres, a contribuição da ciclagem bioquímica é menor em termos absolutos e é maior em termos relativos.

A utilização do CUB como índice de eficiência de utilização de nutrientes suscita frequentes indagações, havendo também o entendimento que considera que um índice mais adequado é o proposto por Sidiqi e Glass (1981), que consiste do quociente entre a matéria seca produzida elevada ao quadrado e o conteúdo do nutriente na matéria seca, ou seja, o quociente entre a matéria seca e o teor do nutriente. Contudo, o CUB é amplamente utilizado na literatura, sendo de uso mais simples e direto para se estimar a demanda nutricional com base na produtividade, nos sistemas de recomendação de adubação baseados em balanço nutricional entre suprimento pelo solo e demanda pela planta.

Neste trabalho, foram obtidos, também, os valores médios de CUB para a produção de parte aérea, para fases da curva de crescimento, nas populações de fronteira concordantes entre produção de biomassa da parte aérea e acumulação de cada nutriente estudado (Tabela 17). Isso foi feito para investigar o CUB nos plantios que mais acumulam biomassa e cada um dos nutrientes, no caso dos povoamentos da LFS; e para investigar o CUB dos plantios com menor acumulação de biomassa e de cada um dos nutrientes, nos povoamentos da LFI. Como esperado, os valores de CUB crescem ao longo da rotação, exceto principalmente para o CUB de Ca que decresceu do meio para o final da rotação, e as diferenças entre os valores de CUB entre as populações das regiões de fronteira são ampliadas. Cabe lembrar que a acumulação maior de nutrientes não ocorre necessariamente em função de uma maior disponibilidade do nutrientes no solo, seja por fertilização ou por ocorrência natural. Para que haja a acumulação é necessário que o solo tenha boas propriedades físicas que permitam o crescimento das raízes.

Em geral o CUB da LFI foi menor do que o CUB da LFS o que pode sugerir que o problema maior das florestas da LFI não tenha sido a oferta de nutrientes no solo e sim a restrição ambiental por outros fatores.

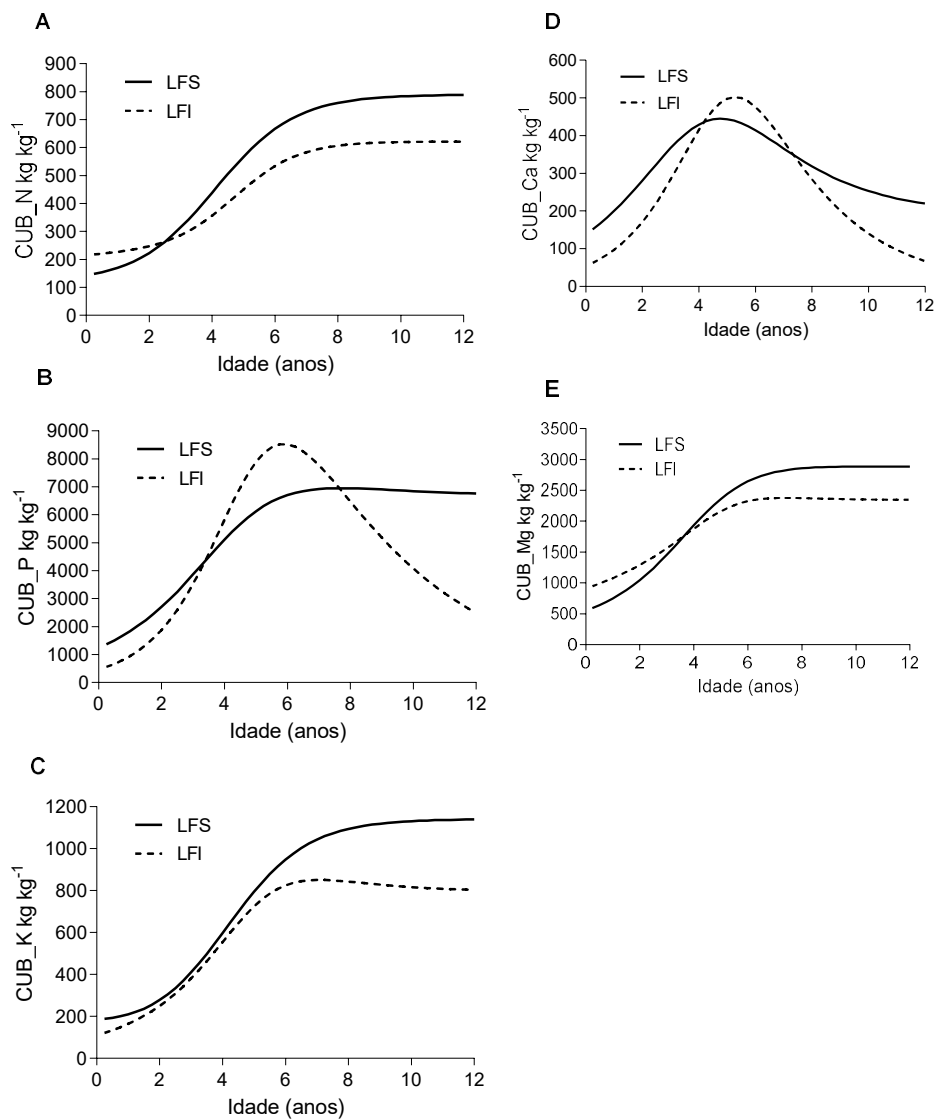


Figura 16 – Coeficientes de utilização biológica (CUB) de N, P, K, Ca e Mg para a produção de parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da idade, dos povoamentos das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI),

Tabela 17: Valores médios de CUB ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) de N, P, K, Ca e Mg para a produção de parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto conforme as fases da curva de crescimento, para as populações das regiões de fronteira.

Fase	Idade (ano)	Nutriente				
		N	P	K	Ca	Mg
Linha de Fronteira Superior						
Inicial	< 2,40	209	2492	251	233	924
Crescimento	2,40-5,74	351	4286	494	360	1524
Estabilização	$\geq 5,74$	620	5693	827	327	2037
Linha de Fronteira Inferior						
Inicial	< 3,43	249	4029	295	382	1707
Crescimento	3,43-6,14	460	10485	900	697	2783
Estabilização	$\geq 6,14$	647	8312	1000	295	2287

### 3.3.2.2 – Em função da área basal

Nas Tabelas 18 a 22 são apresentadas as equações para os conteúdos de nutrientes em função da variação de área basal, com base nas quais foram obtidas as Figuras 17 e 18 para a parte aérea, 19 e 20 para o tronco, 21 e 22 para o lenho.

O conteúdo do nutriente na parte aérea reflete a demanda total para a produção do tronco, que é o produto de interesse comercial, ao passo que o conteúdos no tronco e no lenho refletem as quantidades exportáveis da área com colheita deste produto, em cenários de colheita do tronco ou apenas do lenho (caso ocorra o descascamento),

Tabela 18: Conteúdo de N (y, kg ha<sup>-1</sup>) dos componentes lenho, tronco e parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da Área Basal (x, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

População		Equação	ry $\hat{y}$
Lenho	LFS	$\hat{y} = 2,04 x^{1,5035}$	0,9767
	LFI	$\hat{y} = 1,8463 e^{0,1388x}$	0,9422
Tronco	LFS	$\hat{y} = 2,6922 x^{1,4759}$	0,9851
	LFI	$\hat{y} = 0,4567 x^{1,6465}$	0,9449
Parte	LFS	$\hat{y} = 65,402 x^{0,5809}$	0,9639
Aérea	LFI	$\hat{y} = 30,969 e^{0,0737x}$	0,9624

Tabela 19: Conteúdo de P (y, kg ha<sup>-1</sup>) dos componentes lenho, tronco e parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da Área Basal (x, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

População		Equação	ry $\hat{y}$
Lenho	LFS	$\hat{y} = 0,4675 x^{1,2261}$	0,9514
	LFI	$\hat{y} = 0,1095 e^{0,1391x}$	0,89
Tronco	LFS	$\hat{y} = 0,5691 x^{1,2658}$	0,9526
	LFI	$\hat{y} = 0,0436 x^{1,5964}$	0,9438
Parte	LFS	$\hat{y} = 6,2026 x^{0,5388}$	0,9142
Aérea	LFI	$\hat{y} = 2,061 e^{0,0782x}$	0,9460

Tabela 20: Conteúdo de K (y, kg ha<sup>-1</sup>) dos componentes lenho, tronco e parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da Área Basal (x, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

População		Equação	ry $\hat{y}$
Lenho	LFS	$\hat{y} = 5,849 x^{1,0683}$	0,9346
	LFI	$\hat{y} = 0,4719 x^{1,4574}$	0,9581
Tronco	LFS	$\hat{y} = 5,5254 x^{1,241}$	0,9529
	LFI	$\hat{y} = 0,7288 x^{1,5406}$	0,9796
Parte	LFS	$\hat{y} = 54,465 x^{0,5554}$	0,9445
Aérea	LFI	$\hat{y} = 26,056 e^{0,0669x}$	0,9698

Tabela 21: Conteúdo de Ca (y, kg ha<sup>-1</sup>) dos componentes lenho, tronco e parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da Área Basal (x, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

População		Equação	ry $\hat{y}$
Lenho	LFS	$\hat{y} = 1,1017 x^{1,6477}$	0,9573
	LFI	$\hat{y} = 1,0471 e^{0,1371x}$	0,9186
Tronco	LFS	$\hat{y} = 3,7474 x^{1,55}$	0,9777
	LFI	$\hat{y} = 0,8335 x^{1,5303}$	0,9256
Parte	LFS	$\hat{y} = 37,115 x^{0,8413}$	0,9190
Aérea	LFI	$\hat{y} = 17,659 e^{0,0885x}$	0,9578

Tabela 22: Conteúdo de Mg (y, kg ha<sup>-1</sup>) dos componentes lenho, tronco e parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da Área Basal (x, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

População		Equação	ry $\hat{y}$
Lenho	LFS	$\hat{y} = 0,4131 x^{1,4196}$	0,9538
	LFI	$\hat{y} = 0,4631 e^{0,1224x}$	0,9414
Tronco	LFS	$\hat{y} = 1,8534 x^{1,1714}$	0,9643
	LFI	$\hat{y} = 0,242 x^{1,431}$	0,9590
Parte	LFS	$\hat{y} = 11,316 x^{0,6704}$	0,9681
Aérea	LFI	$\hat{y} = 1,5479 x^{0,9902}$	0,9517

Nos relacionamentos envolvendo parte aérea, tronco e lenho, para todos os nutrientes estudados, ficou clara a existência de populações que se alinham às fronteiras (Figuras 17, 18 e 19). Para uma mesma área basal, os povoamentos da LFS foram aqueles com a máxima acumulação relativa do nutriente e, portanto, com a mínima eficiência de utilização do mesmo. Já nos povoamentos da LFI, os de mínima acumulação relativa do nutriente, houve a máxima eficiência de utilização do mesmo. Portanto, as linhas de fronteira das Figuras 17, 18 e 19, podem ser entendidas como as curvas de eficiência de utilização mínima (a da LFS) e máxima (a da LFI) do nutriente.

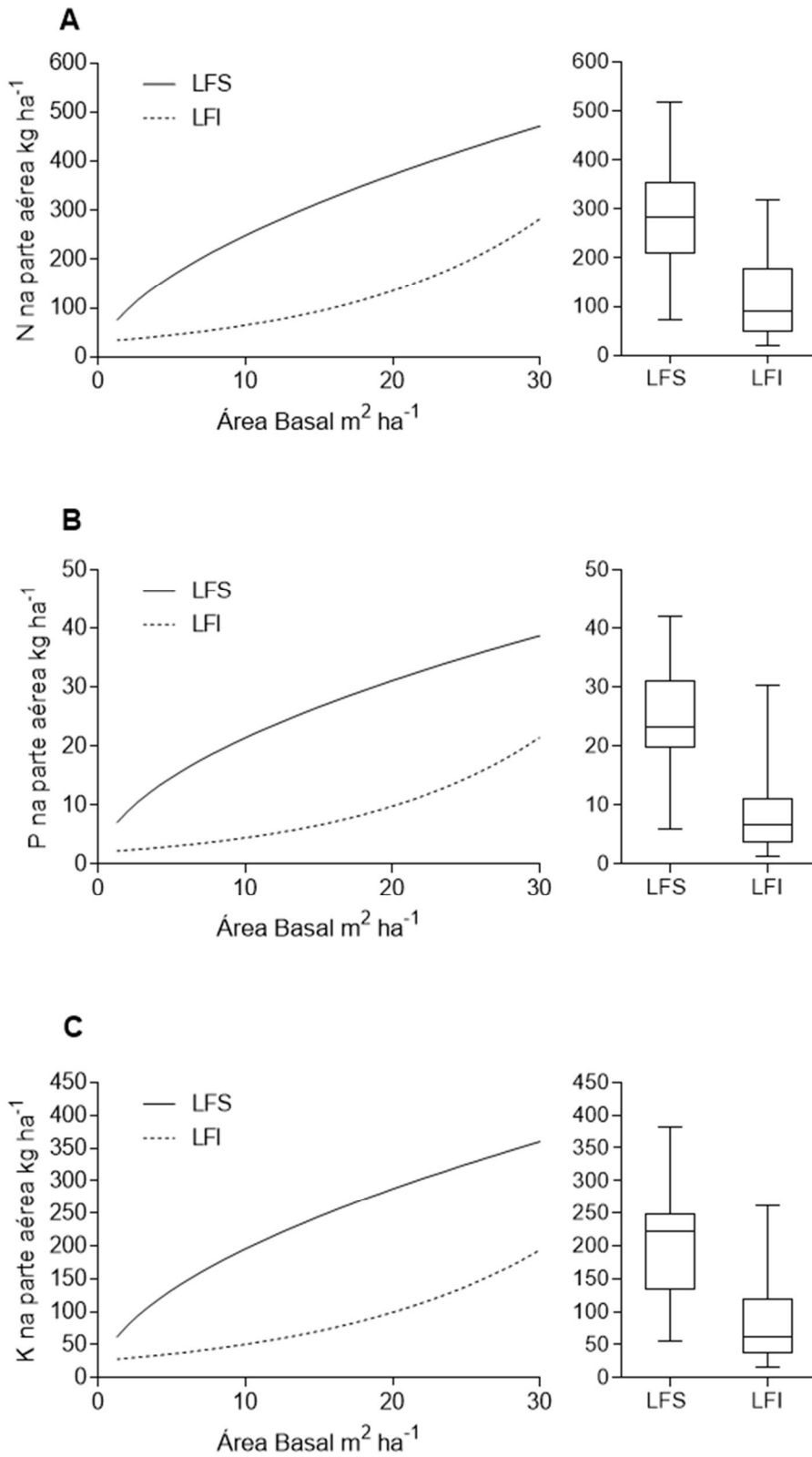


Figura 17. Curvas de acumulação estimadas de N, P e K na parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

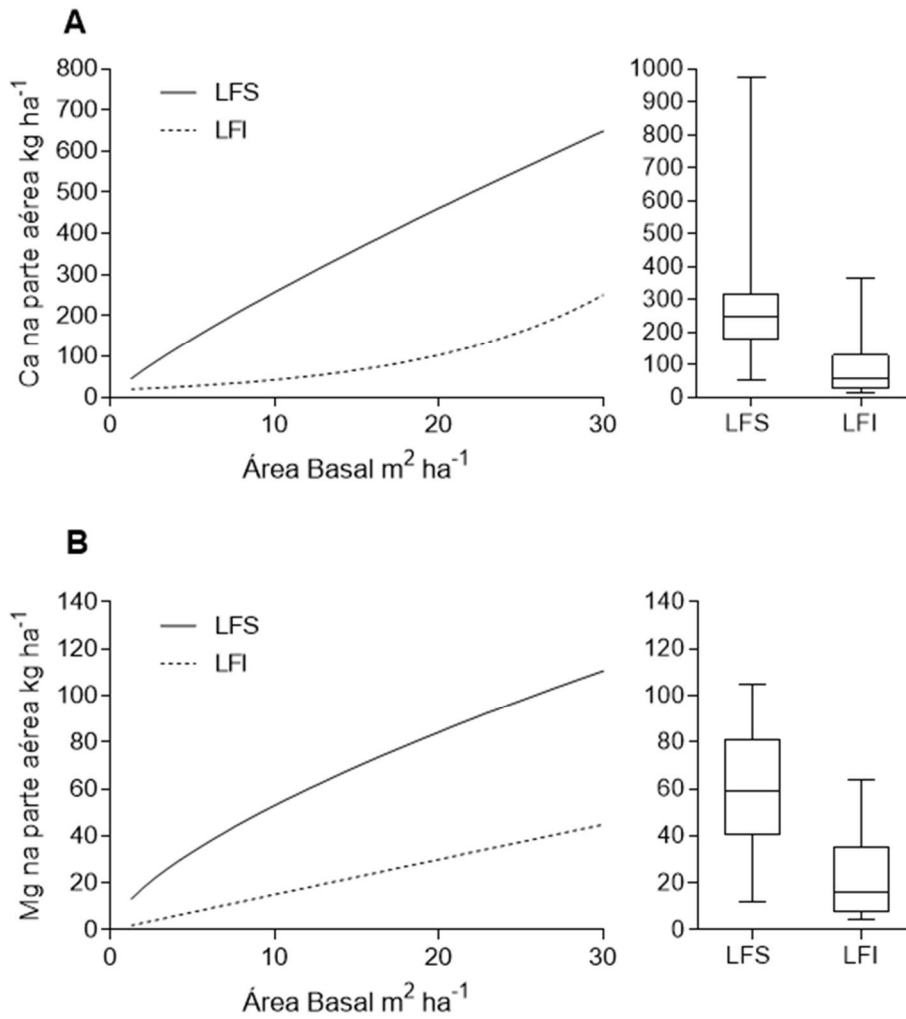


Figura 18. Curvas de acumulação estimadas de Ca e Mg na parte aérea de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

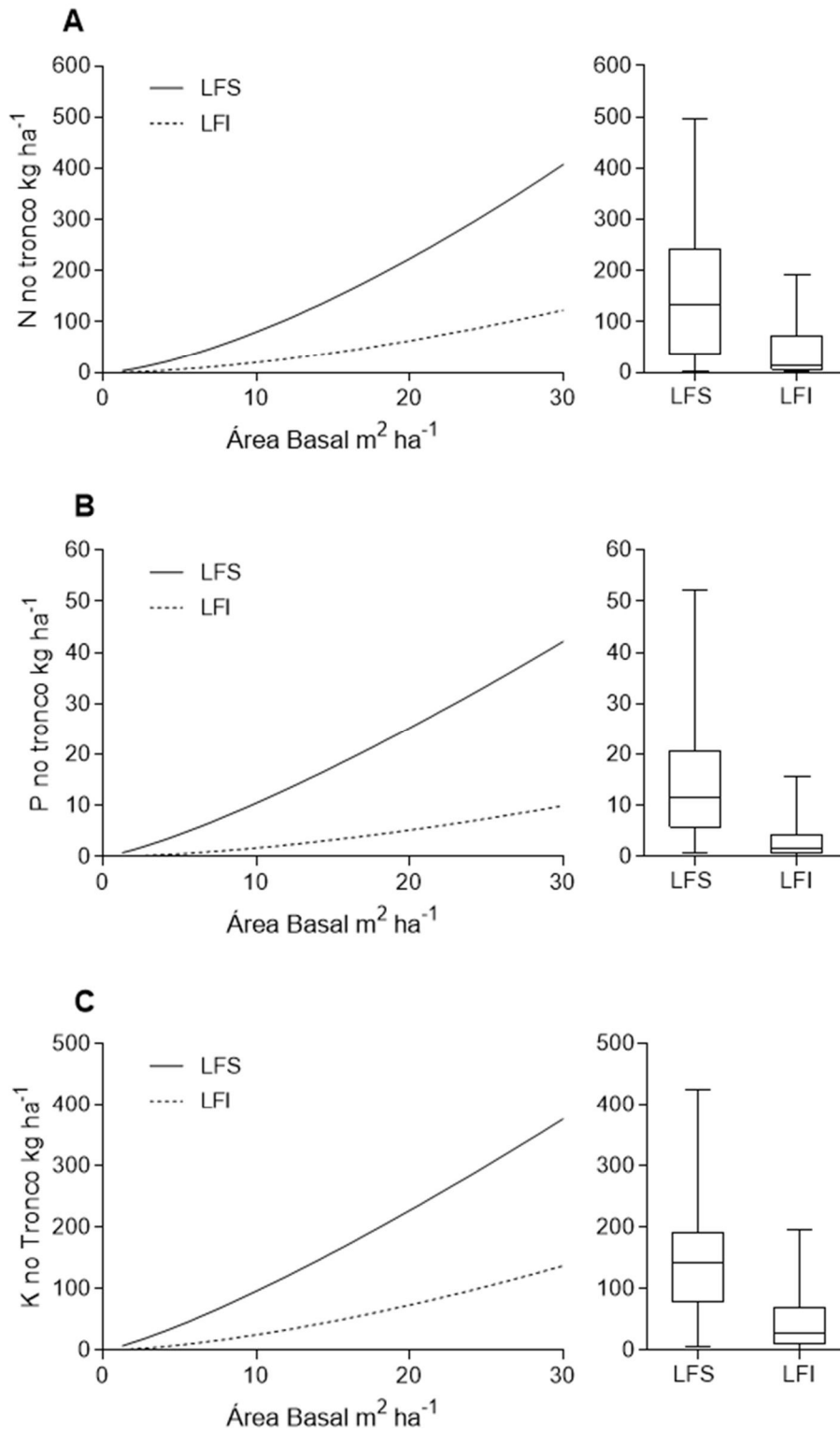


Figura 19. Curvas de acumulação estimadas de N, P e K no tronco de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

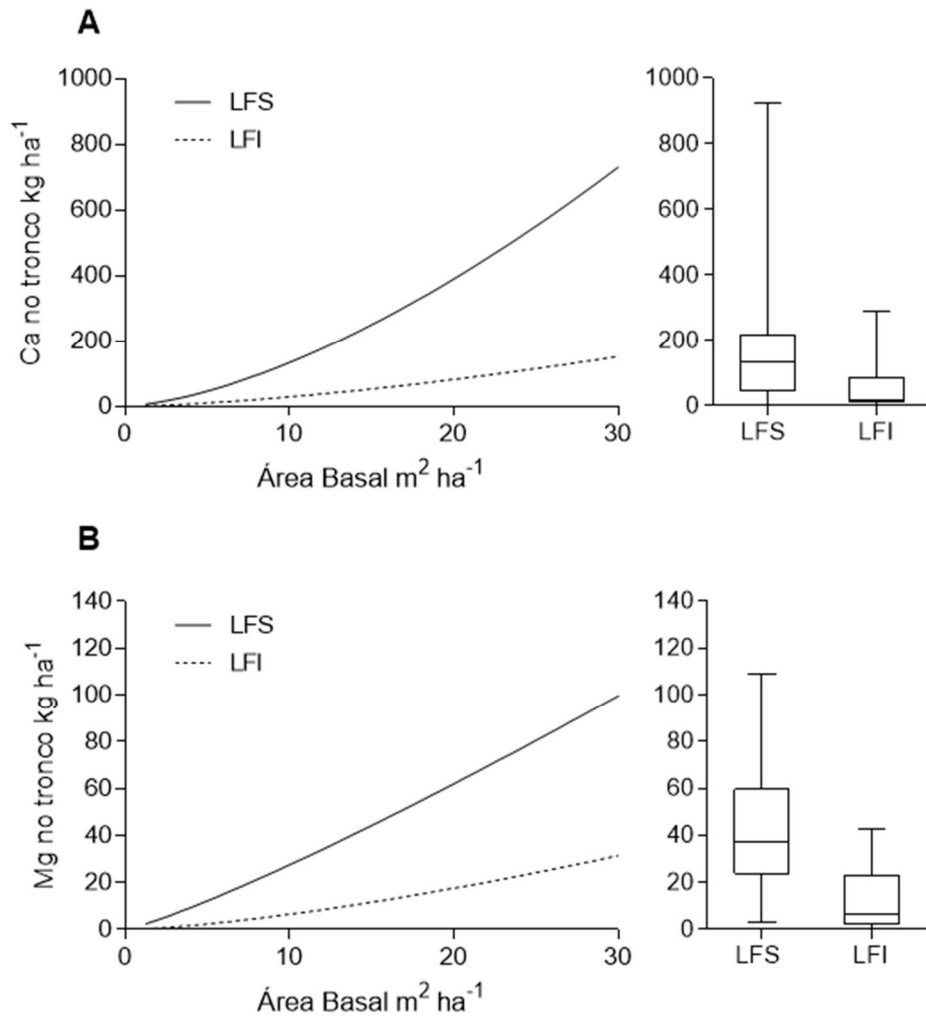


Figura 20. Curvas de acumulação estimadas de Ca e Mg no tronco de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

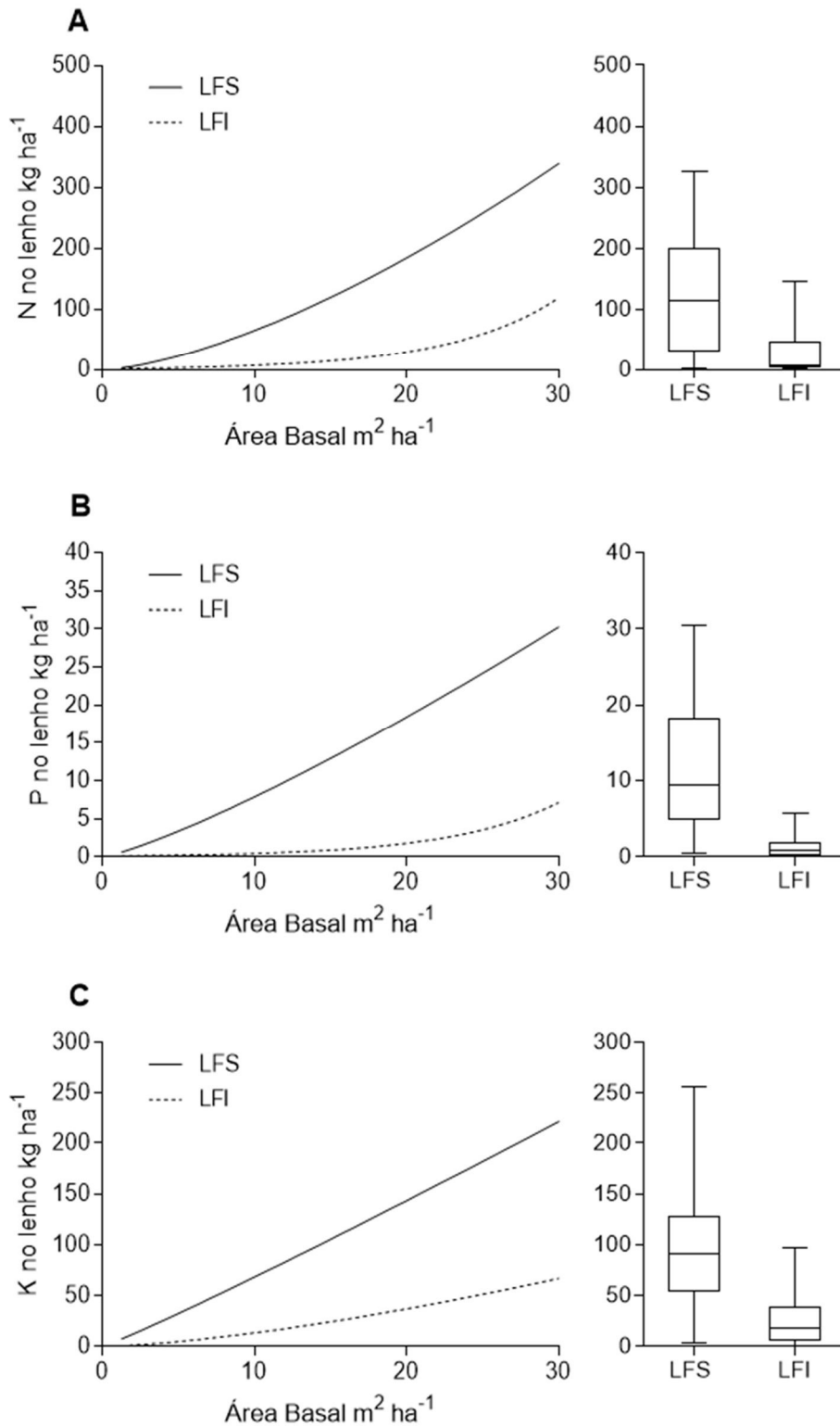


Figura 21. Curvas de acumulação estimadas de N, P e K no lenho de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

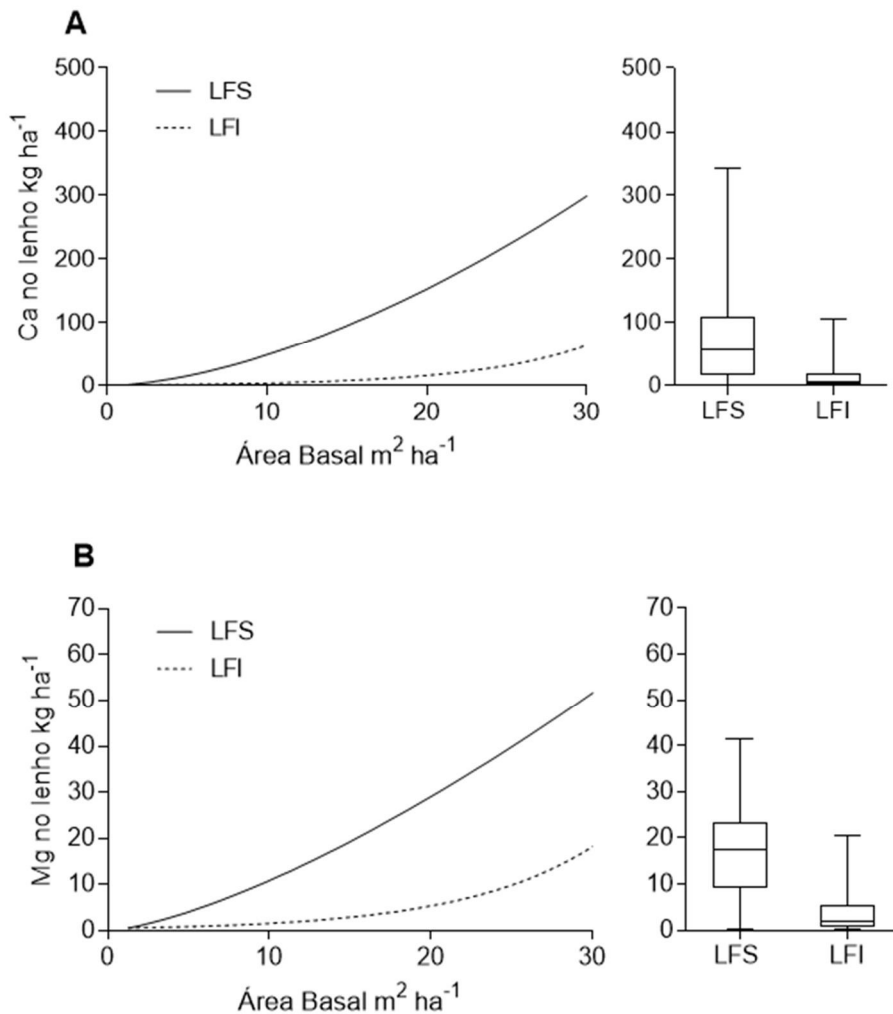


Figura 22. Curvas de acumulação estimadas de Ca e Mg no lenho de povoamentos clonais de eucalipto em função da área basal, para as populações das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI)

A comparação da forma das linhas de fronteira revela que: a) a demanda nutricional da parte aérea na LFS relaciona-se à área basal conforme curva com concavidade voltada para baixo, já na LFI a concavidade é voltada para cima, exceto para Mg, nutriente para o qual ambas as curvas de fronteira têm concavidade voltada para baixo (Figura 17); b) nas Figuras 18 e 19, o relacionamento da demanda nutricional com a área basal é descrito por meio de curvas, para todos os nutrientes, com concavidade voltada para cima, tanto para os povoamentos da LFS como para os da LFI. As plantas da LFS possuem mais copa do que as plantas das populações da LFI, esta diferença é que acarreta as distintas concavidades das duas populações.

Ou seja, o padrão do relacionamento é distinto para a copa, e pode ser explicado pelo fato de na faixa de árvores com pequena área basal, esperadamente plantios mais jovens, os plantios com maior acumulação inicial de nutrientes para as árvores são aqueles com maior produção de copa, componente este com maiores teores de nutrientes. Esses plantios com maior IAF tem maior interceptação de luz, fazem mais fotossíntese e crescem mais e mais rapidamente, com isso vai se alterando a alocação de carbono em favor do tronco em formação. Como o tronco é um componente com menores teores de nutrientes, à medida que vai sendo formado, e em paralelo vai havendo a ciclagem bioquímica, o conteúdo de nutrientes na planta vai aumentando em taxa relativa decrescente.

Nas Tabelas 23 a 27 são apresentados os conteúdos estimados na parte aérea, tronco e lenho, para N, P, K, Ca e Mg, com base em área basal, nas populações da LFS e da LFI, bem como as partições para o tronco e lenho em relação à parte aérea.

Pela comparação dos conteúdos constantes dessas Tabelas para as populações da LFI com os da LFS, em termos da média para os cinco nutrientes estudados e para os quatro níveis de área basal, sendo 4, 8, 16 e 24 ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), vê-se que a acumulação na LFI foi sempre menor em magnitudes variando de 71,8% para a parte aérea, 77,2% para o tronco e 84,3% para o lenho. Na parte aérea, e considerando os cinco nutrientes em termos médios, a acumulação na LFI em relação a da LFS variou de em torno de 76% menor, para área basal de até 8  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ , situando-se em 62 % menor para área basal de 24  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ .

Tabela 23 – Conteúdos de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos componentes de árvore estimados em função da área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), na parte aérea, no tronco e no lenho de povoamentos clonais de eucalipto, das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento, bem como suas partições (%).

Região	Área Basal			
	4	8	16	24
Conteúdo de N na Parte Aérea				
LFS	149,3	214,5	331,4	416,7
LFI	42,0	54,7	103,3	184,8
Conteúdo de N no Tronco				
LFS	21,9	55,1	166,3	297,4
LFI	4,7	13,2	45,4	86,9
Conteúdo de N no Lenho				
LFS	17,3	44,1	136,1	246,1
LFI	3,3	5,4	17,8	53,4
Partição para o Tronco				
LFS	14,7	25,7	50,2	71,4
LFI	11,2	24,1	43,9	47,0
Partição para o Lenho				
LFS	11,6	20,6	41,1	59,1
LFI	7,9	9,9	17,2	28,9

Tabela 24 – Conteúdos de P (kg ha<sup>-1</sup>) nos componentes de árvore estimados em função da área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), na parte aérea, no tronco e no lenho de povoamentos clonais de eucalipto, das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento, bem como suas partições (%).

Região	Área Basal			
	4	8	16	24
Conteúdo de P na Parte Aérea				
LFS	13,3	18,7	27,9	34,5
LFI	2,9	3,8	7,4	13,7
Conteúdo de P no Tronco				
LFS	3,5	7,6	19,5	32,2
LFI	0,4	1,1	3,8	7,1
Conteúdo de P no Lenho				
LFS	2,7	5,4	14,4	23,3
LFI	0,2	0,3	1,1	3,2
Partição para o Tronco				
LFS	26,3	40,6	69,9	93,3
LFI	13,8	28,9	51,4	51,8
Partição para o Lenho				
LFS	20,3	28,9	51,6	67,5
LFI	6,9	7,9	14,9	23,4

Tabela 25 – Conteúdos de K ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos componentes de árvore estimados em função da área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), na parte aérea, no tronco e no lenho de povoamentos clonais de eucalipto, das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento, bem como suas partições (%).

Região	Área Basal			
	4	8	16	24
Conteúdo de K na Parte Aérea				
LFS	119,9	169,6	257,0	319,9
LFI	34,4	43,7	77,7	131,8
Conteúdo de K no Tronco				
LFS	32,2	69,9	177,0	288,7
LFI	6,5	17,0	53,9	99,0
Conteúdo de K no Lenho				
LFS	26,7	52,0	115,7	176,2
LFI	3,7	9,3	27,7	49,1
Partição para o Tronco				
LFS	26,9	41,2	68,9	90,2
LFI	18,9	38,9	69,4	75,1
Partição para o Lenho				
LFS	22,3	30,7	45,0	55,1
LFI	10,8	21,3	35,6	37,3

Tabela 26 – Conteúdos de Ca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos componentes de árvore estimados em função da área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), na parte aérea, no tronco e no lenho de povoamentos clonais de eucalipto, das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento, bem como suas partições (%).

Região	Área Basal			
	4	8	16	24
Conteúdo de Ca na Parte Aérea				
LFS	122,6	207,4	389,3	542,3
LFI	25,5	35,0	75,0	150,8
Conteúdo de Ca no Tronco				
LFS	34,0	89,2	284,7	524,3
LFI	7,3	19,0	59,9	109,5
Conteúdo de Ca no Lenho				
LFS	11,5	32,0	109,9	210,5
LFI	1,8	3,0	9,8	29,0
Partição para o Tronco				
LFS	27,7	43,0	73,1	96,7
LFI	28,6	54,3	79,9	72,6
Partição para o Lenho				
LFS	9,4	15,4	28,2	38,8
LFI	7,1	8,6	13,1	19,2

Tabela 27 – Conteúdos de Mg ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) nos componentes de árvore estimados em função da área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), na parte aérea, no tronco e no lenho de povoamentos clonais de eucalipto, das regiões de fronteira superior (LFS) e inferior (LFI) desse relacionamento, bem como suas partições (%).

Região	Área Basal			
	4	8	16	24
Conteúdo de Mg na Parte Aérea				
LFS	29,3	44,6	73,6	95,9
LFI	6,3	11,7	24,6	36,4
Conteúdo de Mg no Tronco				
LFS	9,8	20,3	48,9	77,6
LFI	1,9	4,5	13,2	23,2
Conteúdo de Mg no Lenho				
LFS	3,1	7,5	21,8	38,1
LFI	0,8	1,2	3,4	9,0
Partição para o Tronco				
LFS	33,4	45,5	66,4	80,9
LFI	30,2	38,5	53,7	63,7
Partição para o Lenho				
LFS	10,6	16,8	29,6	39,7
LFI	12,7	10,3	13,8	24,7

Com o aumento da área basal, a acumulação na LFI em relação a da LFS, para o tronco, variou de 82% menor a 71% menor, exceto para Ca que foi 79% menor para área basal variando de 4 a  $24 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$ , respectivamente.

Já no lenho, a acumulação na LFI em relação a da LFS variou de 83,6% a 79,60% menor com o aumento da área basal de 4 a  $24 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$ , respectivamente.

Essas grandes diferenças, em termos absolutos e relativos, entre as duas populações de fronteira sinalizam para a necessidade de estudos que procurem elucidar as razões das mesmas. Conforme Martins (comunicação pessoal) a curva de acumulação relativa mínima – neste trabalho a da LFI – indicaria a real

exigência nutricional, minimizando o consumo de luxo, sendo, ainda, pouco variável com o ambiente.

As partições de N, P, K, Ca e Mg para o tronco e para o lenho aumentam com a área basal, sendo sempre menores para a população da LFI (Figuras 17 a 19), implicando em menor exportação absoluta e relativa de nutrientes quando da colheita dos povoamentos dessa região de fronteira,

#### 4. Conclusões

- As curvas de acumulação máximas e mínimas de biomassa e de N, P, K, Ca e Mg ao longo da rotação, descritas por modelos sigmóides, são úteis para caracterizar o dreno-planta e sua dinâmica.
- A eficiência de uso de radiação solar (EURAD) e de água precipitada (EUPREC) foram, em média, de 0,596 g MJ<sup>-1</sup> e de 24,41 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, valores 2,24 e 2,54 vezes maiores nos povoamentos em que houve a acumulação máxima de biomassa de parte aérea, o que indica que as plantas mais produtivas são as que usam mais eficientemente os recursos radiação solar e precipitação.
- As eficiências de utilização de N, P, K, Ca e Mg aumentam, em geral, com a idade segundo modelo sigmoide, e com a área basal conforme modelos exponencial e potencial.
- Para uma mesma área basal produzida, os povoamentos de eucalipto com máxima eficiência de uso de nutrientes acumulam menos 68, 73, 68, 79 e 71 % N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, do que os povoamentos com mínima eficiência de uso
- As partições de N, P, K, Ca e Mg para o tronco e para o lenho aumentam com a área basal, sendo sempre menores para os povoamentos de máxima eficiência de uso desses nutrientes, implicando em menor exportação absoluta e relativa de nutrientes quando da colheita.

## 5. Literatura Citada

Almeida, E. I. B.; Deus, J. A. L.; Corrêa, M. C. M.; Crisostomo, L. A.; Neves, J. C. L. (2016). Linha de Fronteira e Chance Matemática na Determinação do Estado Nutricional de Pitaia. **Revista Ciência Agronômica**: 744-754.

Barros, N. F.; Comerford, N. B. (2002). Sustentabilidade da Produção de Florestas Plantadas na Região Tropical. **Tópicos em Ciência do Solo**. v.2. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa – MG, Brasil: 487-592.

Barros, N. F.; Novais, R. F. (2010). Solos e Nutrição Florestal: Contribuição para a Silvicultura Brasileira. **Revista Opiniões**. Mar. p.26.

Battie-Laclau, P.; Delgado-Rojas, J. S.; Christina, M.; Nouvellon, Y.; Bouillet, J. P.; Piccolo, M. C.; Moreira, M. Z.; Gonçalves, J. L. M.; Roupsard, O.; Laclau, J. P. (2016). Potassium Fertilization Increases Water-Use Efficiency for Stem Biomass Production Without Affecting Intrinsic Water-Use Efficiency in *Eucalyptus grandis* Plantations. **Forest Ecology and Management**, 364: 77-89.

Beer, C.; Ciais, P.; Reichstein, M.; Baldocchi, D.; Law, B.E.; Papale, D.; Soussana, J.-F.; Ammann, C.; Buchmann, N.; Franket, D.; et al. (2009). Temporal and Among-Site Variability of Inherent Water Use Efficiency at the Ecosystem Level. **Global Biogeochemistry Cycles**, p.23.

Binkley, D.; Stape, J. L.; Ryan M. G. (2004). Thinking About Efficiency of Resource Use in Forests. **Forest Ecology and Management**, 193: 5-16.

Binkley, D. (2011). Understanding the Role of Resource Use Efficiency in Determining the Growth of Trees and Forests: pp. 13-26. In: **Forests in development: A vital balance** Springer, Dordrecht.

Binkley, D.; Stape, J. L.; Bauerle, W. L.; Ryan. M. G. (2010). Explaining Growth of Individual Trees: Light Interception and Efficiency of Light Use by *Eucalyptus* at Four Sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 259: 1704-1713.

Binkley, D.; Campos, O. C.; Gspaltl, M; Forrester D. I. (2013). Light Absorption and Use Efficiency in Forests: Why Patterns Differ for Trees and Stands. **Forest Ecology and Management.**, 288: 5-13

Boyden, S.; Binkley, D.; Stape, J. L. (2008). Competition Among Trees Depends on Genetic Variation and Resource Supply. **Ecology**, Durham, v. 89: 2850-2859.

Borges, J. S.: (2012) **Modulador Edáfico para Uso em Modelo Ecofisiológico e Produtividade Potência de Povoamentos de Eucalipto.** Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 70 p.

Bündchen, M.; Boeger, M. R. T; Reissmann, C. B.; da Silva, S. L. C. (2013). Status Nutricional e Eficiência no Uso de Nutrientes em Espécies Arbóreas da Floresta Subtropical no Sul do Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98: 227-236.

Cannell, M. G. R. (1989) Light Interception, Light Use Efficient and Assimilate Partitioning in Poplar and Willow Stands. In: Pereira, J. S., Landsberg, J. J. (eds.), **Biomass Production by Fast-Growing Trees.** Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp. 1-12.

Carvalho, M. B.; (2016) **Normas e Faixas de Suficiência Nutricional para Teca no Mato Grosso.** Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 40 p.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2011) **Levantamento da Geodiversidade Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil Isoietas Anuais Médias Período 1977 a 2006.** Escala 1:5.000.000

Cunha, A. C. M. C. M.; (2010) **Diagnose Nutricional de Minicepas e Previsão de Enraizamento de Miniestacas de Eucalipto por Redes Neurais.** Tese de Doutorado em Ciências Florestais, UFV. Viçosa – MG: 59 p.

Du, H.; Zeng, F.; Peng, W.; Wang, K.; Zhang, H.; Liu, L.; Song, T. (2015) Carbon Storage in a *Eucalyptus* Plantation Chronosequence in Southern China. **Forests**, v.6: 1763-1778.

Dye, P. J. (2000) Water Use Efficiency in South African Eucalyptus Plantations: A Reviews. **The Southern African Forestry Journal**. v.189: 17-26.

Epron, D.; Laclau, J. P.; Almeida, J. C. R.; Gonçalves, J. L. M.; Ponton, S.; Stte, C. R.; Delgado-Rojas, J. S.; Bouillet, J-P.; Nouvellon, Y. (2012) Do Changes in Carbon Allocation Account for the Growth Response to Potassium and Sodium Applications in Tropical *Eucalyptus* Plantations ? **Tree Physiology**. v.31: 1-13.

Fernandes, L. V. (2010). **Normas e Determinação de Faixas de Suficiência para Diagnose Foliar com Base no Crescimento Relativo de Eucalipto**. Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 81p.

Forrester, D. I.; Collopy, J. J.; Beadle, C. L.; Baker, T. G. (2012) Interactive Effects of Simultaneously Applied Thinning, Pruning and Fertilizer Application Treatments on Growth, Biomass Production and Crown Architecture in a Young *Eucalyptus nitens* Plantation. **Forest Ecology and Management**. v.267: 104-116.

Forrester, D. I.; Collopy, J. J.; Beadle, C. L.; Baker, T. G. (2013) Effect of Thinnin, Pruning and Nitrogen Fertilizer Application on Light Interception and Light-Use Efficiency in a Young *Eucalyptus nitens* Plantation. **Forest Ecology and Management**, v.288:21-30.

Galdino, M. P. (2015). **Valores de Referência e Faixas de Suficiência Nutricional para Avaliação do Estado Nutricional da Cultura do eucalipto no Brasil**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 59 p.

Ibá. Industria Brasileira de Árvores; (2018) **Relatório Ibá 2018 – Ano base 2017.**: 80p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004) **Mapas de Biomas do Brasil – Primeira Aproximação**. Escala 1:5.000.000

Laclau, J. P.; Almeida, J. C. R.; Gonçalves, J. L. M.; Saint-André, L.; Ventura, M.; Ranger, J.; Moreira, R. M.; Nouvellon, Y. (2009) Influence of

Nitrogen and Potassium Fertilization on Leaf Lifespan and Allocation of Above-Ground in *Eucalyptus* Plantations. **Tree Physiology**.: 111-124

Lafetá, B. O.; Santana, R. C.; Nogueira, G. S.; Penido, T. M. A.; Chaves, C. M. M. B.; Mucida, D. P.; (2014) Artificial Neural Networks to Estimate Nutrient Use Efficiency in Eucalyptus. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**. v.8: 25-264.

Lafetá, B. O.; Santana, R. C.; Nogueira, G. S.; Neves, J. C. L.; Penido, T. M. A.; (2018). Eficiência de Utilização de Macronutrientes em Eucalypto por Método Não Destrutivo Estimados por Redes Neurais Artificiais. **Ciência Florestal**. v.8: 613-623.

Landsberg, J. J.; Wright, L. L. (1989) Comparison Among Populus Clones and Intensive Culture Conditions, Using an Energy-Conversion Model. **Forest Ecology and Management**. v.27. pp.129.

Landsberg, J. J.; Waring, R. H. A. (1997). Generalised Model of Forest Productivity Using Simplified Concepts of Radiation-Use Efficiency, Carbon Balance and Partitioning. **Forest Ecology and Management**. v.95, n.3: 209-228.

Landsberg, J., Sands, P. (2011). Chapter 4 - stand structure and dynamics. In **Physiological Ecology of Forest Production, vol. 4 of Terrestrial Ecology**. Elsevier: 81– 114.

Law, B. E., Falge, E., Gu, L., Baldocchi, D. D., Bakwin, P., Berbigier, P., Davis, K., Dolman, A. J., Falk, M., Fuentes, J. D., Goldstein, A.; Granier, A.; Grelle, A.; Hollinger, D.; Janssens, I. A.; Jarvis, P.; Jensen, N. O.; Katul, G.; Mahli, K.; Matteucci, G.; Meyers, T.; Monson, R.; Munger, W.; Oechel, W.; Olson, R.; Pilegaard, K.; Paw, U. K. T.; Thorgeirsson, H.; Valentini, R.; Verma, Shashi; Vesala, T.; Wilson, K.; Wofsy, S. (2002) Environmental Controls Over Carbon Dioxide and Water Vapor Exchange of Terrestrial Vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.113: 97-120.

Leite, F. P., Silva: I. R. Novais R. F.; Barros, N. F.; Neves, J. C. L.; Villani, E. M. A. (2011); et al. Nutrient relations during an Eucalyptus cycle at different

population densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 35: 949-959.

Lima Neto, A. J. (2018). **Constantes Vmax, Km, Cmin, Coeficiente de Partição e Análises de Solo e Folha na Recomendação de Adubação para Eucalipto**. Tese de Doutorado em Fitotecnia, UFV. Viçosa – MG: 59p.

Lourenço, H.M., 2009. **Crescimento e eficiência do uso de água e nutrientes em eucalipto fertirrigado**. Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 157p.

Maia, E. C.; Morais, E. R. C.; (2016) Boundary Line Model to Estimate the Nutrient Sufficiency Range in Muskmelon Leaves. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.40: 8p.

Martins, L. G. C (2004) **Método de Recomendação de Adubação para Eucalipto com Base no Monitoramento Nutricional**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa: 83p.

Mendonça, L. P.; (2016) **Curvas de Resposta Potencial e Faixas de Suficiência Nutricional para Café Arábica em Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, UFV. Viçosa – MG: 55 p.

Neves, J. C. L. (2000) **Produção e Partição de Biomassa, Aspectos Nutricionais e Hídricos em Plantios Clonais de Eucalipto na Região Litorânea do Espírito Santo**. Tese de Doutorado em Produção Vegetal na UENF, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ: 191p.

Njukeng, J. N.; Ehabe, E. E.; Nkeng, G. E.; Schick, J.; Kratz, S.; Schung, E. (2013) Investigations on the Nutritional Status of *Hevea brasiliensis* Plantations in the Humid Forest Zone of Cameroon. **Journal für Kulturpflanzen**. v.65: 376-384.

Poggiani, F.; Schumacker, M. V. (2000) Ciclagem de Nutrientes em Florestas Nativas. In: Gonçalves, J. L. M.; Bendedeti, W. (eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF: 287-308.

PONTES, M. S. (2011) **Parametrização do modelo 3-PG para teca (*Tectona grandis* L.f) e dos sistemas FERTI-UFV e NUTRI-UFV para subsidiar o seu manejo nutricional**. Dissertação de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. UFV, Viçosa – MG: 79p.

Salvador, S. M.; Schumacher, M. V.; Viera, M.; Stahl, J.; Consensa, C. B.(2016). Biomass and nutrient stocks in clonal plantations of *Eucalyptus saligna* Smith. at different ages. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 311-321.

Santana, R.C.; Barros, N.F.; Neves, J.C.L (1999). Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.56, n.56, p.155-169.

Santana, R. C.; Barros, N, F.; Neves, J. C. L. (2002) Eficiência de Utilização de Nutrientes e Sustentabilidade da Produção em Procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em Sítios Florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**. v.26: 447-457.

Santos, M. L. (2015). **Partição de Biomassa e Nutrientes em Plantios Clonais e Seminais de Teca**. Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, UFV. Viçosa – MG: 60p.

Santos, M. L.; Neves, J.C.L.; Alexandre, J.C. (2015). Eficiência Foliar em Árvores de Clones de Eucalipto de Diferentes Classes de Produtividade. **Simpósio de Integração Acadêmica da UFV / SIA**. Viçosa-MG.

Seibt, U; Rajabi, A.; Griffiths, H.; Berry J.A. (2008). Carbon Isotopes and Water use Efficiency: Sense and Sensitivity. **Oecologia**, 155: 441-454.

Shujaiddin, N.; Kumar, B. M. (2003). *Ailanthus triphysa* at Different Densities and Fertilizer Regimes in Kerala, India: Growth, Yield, Nutrient Use Efficiency and Nutrient Export Through Harvest. **Forest Ecology and Management**, 180: 135–151.

Siddiqui, M. Y.; Glass, A. D. M. (1981) Utilization Index: a Modified Approach to the Estimation and Comparison of Nutrient Utilization Efficiency in Plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4: 289-302.

Smethurst, P; Baillie, C.; Cherry, M.; Holz, G. (2003). Fertilizer Effects on LAI and Growth of Four *Eucalyptus nitens* Plantations. **Forest Ecology and Management**, v.176: 531-542.

Souza, J. S.; Neves, J. C. L.; Martinez, H. E. P.; Alvarez, V. V. H. (2018). Relationship Between Coffee Leaf Analysis and Soil Chemical Analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.42: 13p.

Stahringer, N. I. (2017) **Parametrização de Modelos de Produtividade e de Balanço Nutricional para *Pinus* e *Eucalyptus* em Corrientes – Argentina**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 153p.

Stape, J. L. (2002) **Production Ecology of Clonal Eucalyptus Plantations in Northeastern Brazil**. Tese de Doutorado – Colorado State University, Fort Collins, Colorado - USA: 225p.

Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G. (2008). Production and Carbon Allocation in a Clonal Eucalyptus Plantation with Water and Nutrient Manipulations. **Forest Ecology and Management**, v.255: 920-930.

StatSoft, Inc. (2002) **Statistica for Windows**. Computer Program Manual. Tulsa – OK, USA.

Tiba, C.; Fraidenraich, N. (2000) **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos**. Editora Universitária da UFPE: 111p.

Tisdale, S.L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. (1985) **Soil fertility and fertilizers**. 4 ed.: New York, Macmillan Publishing: 754p.

Tomé Jr., J. B. (2004) **Uma Nova Abordagem nas Recomendações de Adubação**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 141p.

Valadares, S. V. (2015). **Modelagem da Aquisição de Fósforo e da Eficiência Nutricional de Eucalipto**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, UFV. Viçosa – MG: 102 p.

Viera, M.; Schumacher, M. V.; Caldeira, M. V. W.; Watzlawick, L. F. (2013). Teores de Nutrientes em Povoamentos Monoespecíficos e Mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em Sistema Agrossilvicultural. **Ciência Florestal**, UFSM. v. 23: 67-76.

Viera, M.; Schumacher, M. V.; Trüby, P.; Araújo, E. F. (2015). Implicações Nutricionais com Base em Diferentes Intensidades de Colheita da Biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, 45: 432-439.

Vizcayno-Soto, G.; Cotê, B. (2004). Boundary Line Approach to Determine Standards of Nutrition for Manure Trees from Spatial Variation of Growth and Foliar Nutrient Concentrations in Natural Environments. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.35: 2965-2985.

Walworth, J. L.; Letsch, W. S.; Sumner, M. E. (1986). Use of Boundary Lines in Establishing Diagnostic Norms. **Soil Society American Journal**. v.50: 123-128.

White, D.A.; McGrath, J.F.; Ryan, M.G. Battaglia, M.; Mendham, D.S.; Kin al, J.; Downes, G.M.; Crombie, D.S.; Hunt. M.E. (2014). Managing for water-use efficient wood production in *Eucalyptus globulus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v.331: 272-280.

Whitehead, D.; Beadle, C. L. (2004) Physiological Regulation of Productivity and Water Use in Eucalyptus: a Review. **Forest Ecology and Management**. v.193: 113-140.

Wiseman, D.; Smethurst, P.; Pinkard, L.; Wardlaw, T.; Beadle, C.; Hall, M.; Baillie, C.; Mohammed, C. (2006). Pruning and fertilizer effects on branch size and decay in two *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**. v.225: 123-133,

Wood, T. E.; Lawrence, D.; Wells, J. A. (2011). Interspecific Variation in Foliar Nutrients and Resorption of Nine Canopy-tree Species in a Secondary Neotropical Rain Forest. **Biotropica**, Washington, v. 43, n. 5: 544–551.