

ANA PAULA VARGAS DE BARROS

**PRODUÇÃO DE MADEIRA E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES
MODELADOS CONFORME A CLASSE DE PRODUTIVIDADE DE
POVOAMENTOS CLONAIIS DE EUCALIPTO**

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

Orientador: Júlio César Lima Neves

Coorientador: Hélio Garcia Leite

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B277p
2021

Barros, Ana Paula Vargas de, 1994-
Produção de madeira e eficiência de uso de nutrientes
modelados conforme a classe de produtividade de povoamentos
clonais de eucalipto / Ana Paula Vargas de Barros. – Viçosa,
MG, 2021.
96 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 93-96.

1. Eucalipto - Nutrição. 2. Eucalipto - Crescimento.
3. Eucalipto - Modelos matemáticos. 4. Biomassa. 5. Época de
colheita. 6. Eucalipto - Aspectos econômicos. 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

ANA PAULA VARGAS DE BARROS

**PRODUÇÃO DE MADEIRA E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES
MODELADOS CONFORME A CLASSE DE PRODUTIVIDADE DE
POVOAMENTOS CLONAIIS DE EUCALIPTO**

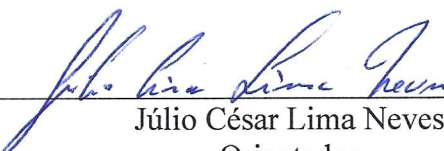
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2021.

Assentimento:



Ana Paula Vargas de Barros
Autora



Júlio César Lima Neves
Orientador

*Ao avanço da ciência, tão sucateada e
ameaçada no cenário assustador em que
vivemos.*

*Aos cientistas, sinônimos de resistência, a
quem desejo muita força e resiliência.*

AGRADECIMENTOS

Ao Júlio, meu orientador, que além de me dar todo o suporte técnico, se preocupou com o meu bem estar ao longo desse caminho. A sua disciplina e cuidado com as pessoas são inspiradores. Ao Hélio, meu coorientador, que com sua simplicidade e competência, me ensinou muito além do conteúdo técnico.

Aos meus pais, sempre presentes em minha vida, me cercando de amor, de cuidado e de suporte. Às minhas irmãs, as pessoas que me ensinaram o significado de companheirismo e amor, meu muito obrigada por existirem e fazerem de mim uma pessoa melhor.

À minha amiga Beá, que esteve comigo desde a minha infância, fazendo com que o caminho fosse mais leve e divertido. Ao Rafa, pela amizade e ajuda em todas as fases do meu mestrado. À Thalita, por todo amor e cuidado, o seu suporte foi essencial para a realização deste trabalho. À Maria Clara, por ser tão cuidadosa comigo e por estar sempre ao meu lado, oferecendo um amor tão genuíno. Às Dercys, por fazerem com que a minha vida seja mais feliz e completa. À Ana Ju e ao Jeff, amigos que amo tanto, meu muito obrigada por se fazerem presentes mesmo com tanta distância física entre nós.

À Universidade Federal de Viçosa, por ter me proporcionado tantos ensinamentos na graduação e na pós graduação. Aos professores envolvidos na minha formação pessoal e profissional ao longo da minha vida. À todas as pessoas que me ajudaram, direta ou indiretamente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O Papel, a nuvem e o interser

“Se você for um poeta, verá nitidamente uma nuvem passeando nesta folha de papel. Sem a nuvem, não há chuva. Sem a chuva, as árvores não crescem. Sem as árvores, não se pode produzir este papel. A nuvem é essencial para a existência do papel. Se a nuvem não está aqui, a folha de papel também não está. Portanto, podemos dizer que a nuvem e o papel “intersão”. Interser é uma palavra que ainda não se encontra no dicionário, mas se combinarmos o radical inter com o verbo ser, teremos um novo verbo: interser. Se examinarmos esta folha com maior profundidade, poderemos ver nela o sol. Sem o sol, não há floresta. Na verdade, sem o sol não há vida. Sabemos, assim, que o sol também está nesta folha de papel. O papel e o sol intersão.

Se prosseguirmos em nosso exame, veremos o lenhador que cortou a árvore e a levou à fábrica para ser transformada em papel. E vemos o trigo. Sabemos que o lenhador não pode existir sem seu pão de cada dia. Portanto o trigo que se transforma em pão também está nesta folha de papel.

O pai e a mãe do lenhador também estão aqui.

Quando olhamos desta forma, vemos que, sem todas estas coisas, esta folha de papel não teria condições de existir. Ao olharmos ainda mais fundo, vemos também a nós mesmos nesta folha de papel. Isso não é difícil porque, quando observamos algum objeto, ele faz parte de nossa percepção. Sua mente está aqui, assim como a minha. É possível, portanto, afirmar que tudo está aqui nesta folha de papel. Não conseguimos indicar uma coisa que não esteja nela- o tempo, o espaço, o sol, a nuvem, o rio, o calor. Tudo coexiste nesta folha de papel. É por isso que para mim a palavra interser deveria ser dicionarizada. Ser é interser. Não podemos simplesmente ser sozinhos e isolados. Temos de interser com tudo o mais. Esta folha de papel é, porque tudo o mais é. Imagine que tentemos devolver um dos elementos à sua origem. Imagine tentarmos devolver a luz do sol ao sol. Você acha que a folha de papel ainda seria possível? Não, sem o sol, nada pode existir. Se devolvermos o lenhador à sua mãe, tampouco teremos a folha de papel. O fato é que esta folha de papel é composta apenas de elementos não papel. Se devolvermos estes elementos às suas origens, não haverá papel algum. Sem estes elementos não papel, como a mente, o lenhador, o sol e assim por diante, não haverá papel. Por mais fina que esta folha seja, tudo o que há no universo está nela”

(Thich Nhat Hahn)

RESUMO

BARROS, Ana Paula Vargas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Produção de madeira e eficiência de uso de nutrientes modelados conforme a classe de produtividade de povoamentos clonais de eucalipto.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Hélio Garcia Leite.

O Brasil, por ser muito extenso, possui grande variedade de capacidades produtivas entre seus sítios. A capacidade produtiva é definida pelo índice de qualidade do sítio (IQSítio). A obtenção da produtividade máxima atingível da cultura do eucalipto é em função deste índice somado ao manejo aplicado e a eficiência de uso de recursos ao longo da rotação. O trabalho teve como objetivos: a) modelar a produção volumétrica e a acumulação de carbono e de macronutrientes minerais, assim como a eficiência nutricional, ao longo da rotação, conforme a classe de produtividade de povoamentos clonais de eucalipto; b) modelar os parâmetros das curvas de produção de povoamentos de eucalipto; c) propor a inclusão da eficiência de uso de nutrientes e de análises econômicas na tomada de decisão quanto à idade de corte de povoamentos de eucalipto. Foram obtidos dados de plantios clonais de eucalipto de diferentes regiões brasileiras, em variadas idades, o que permitiu a confecção de um banco de dados contendo informações de 2223 plantios comerciais. Os dados observados foram divididos em 10 classes de produtividade em volume de tronco tomando como referência a população superior (da linha de fronteira superior, LFS). Foi ajustada a equação logística, para descrever a dinâmica de crescimento, para cada uma dessas classes, relacionando volume e biomassa com a idade, cujos parâmetros foram modelados. O conteúdo de macronutrientes foi modelado em função da biomassa. As eficiências de uso de nutrientes foram calculadas com base na razão entre biomassa de tronco e conteúdo de nutrientes. Todas essas informações foram utilizadas para a simulação de diferentes cenários de idade de corte dos povoamentos e foi feita a análise econômica (VPL) e (CMP) de cada um desses cenários. Além de favorecer a sustentabilidade da área de plantio, de gerar uma maior economia com fertilização em rotações futuras, o alongamento da idade de corte mostrou-se, também, economicamente viável, independente da taxa de juros.

Palavras-chave: Eucalipto-modelagem de crescimento. Eucalipto-acumulação de biomassa. Eucalipto-acumulação de nutrientes. Eucalipto-eficiência nutricional. Eucalipto-idade técnica de corte.

ABSTRACT

BARROS, Ana Paula Vargas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2021. **Wood production and nutrients efficiency use modeled according to the productivity class of clonal eucalyptus stands.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Hélio Garcia Leite.

Brazil, for its large extension, has a great variety of productive capacities among its forest sites. The productive capacity is defined by the site quality index. The achievement of the maximum attainable productivity of the eucalyptus culture depends on this index added to the applied management and to the resource's efficiency use throughout the rotation. The study had as objectives: a) to model the volumetric production and the accumulation of carbon and mineral macronutrients, as well as the nutritional efficiency, along the rotation, according to the productivity class of eucalyptus clonal stands; b) to model the parameters of the production curves of eucalyptus stands; c) to propose the inclusion of the nutrients use efficiency and of economic analysis in the decision-making about the cutting age of eucalyptus stands. Data were obtained from clonal eucalyptus plantations from different Brazilian regions, at various ages, which allowed the creation of a database containing information from 2223 commercial plantations. The observed data were divided into 10 productivity classes of trunk volume, taking as reference the upper population (of the upper frontier line, UFL). A logistic equation was adjusted to describe the growth dynamics for each of these classes, relating volume and biomass with age, whose parameters were modeled. The macronutrient content was modeled as a function of trunk biomass. The nutrient use efficiencies were calculated based on the ratio of trunk biomass and nutrient content. All this information was used to simulate different forest stand cutting age scenarios and the economic analysis (NPV) and (APC) of each of these scenarios was performed. In addition to favoring the sustainability of the plantation area and to generating greater savings with fertilization in future rotations, extending the cutting age also proved to be economically viable, regardless of the interest rate.

Keywords: Eucalyptus-growth modeling. Eucalyptus-biomass accumulation. Eucalyptus-nutrients accumulation. Eucalyptus-nutritional efficiency. Eucalyptus-technical age of cutting.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.1 Potencial produtivo – Volume relativo	15
2.2 Modelagem de volume e biomassa de tronco, da alocação de nutrientes e da eficiência de uso de nutrientes em plantios de eucalipto	16
2.2.1 Volume e biomassa de tronco	16
2.2.2 Conteúdo de nutrientes	16
2.2.3 Eficiência de uso de nutrientes	17
2.3 Modelagem dos parâmetros das curvas de produção.....	18
2.3.1 Parâmetro α , β e γ	18
2.3.2 P1, P2 e P3.....	18
2.4 Idade técnica de corte: uma abordagem alternativa.....	20
2.4.1 ITC Volumétrico e Gravimétrico	21
2.4.2 Extração e exportação relativas à produção e seus respectivos custos.....	21
2.4.3 Economia nutricional ao de atrasar a idade de corte	21
2.4.4 Análise Econômica.....	22
RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
3.1 Modelagem de volume e biomassa de tronco, da alocação de nutrientes e da eficiência de uso de nutrientes em plantios de eucalipto	26
3.1.1 Volume e biomassa de tronco	26
3.1.2 Conteúdo de nutrientes	30
3.1.3 Eficiência de uso de nutrientes	48
3.2 Modelagem dos parâmetros	59
3.2.1 Parâmetro α , β e γ	59
3.2.2 Pontos P1, P2 e P3.....	63
3.3 Idade técnica de corte: uma abordagem alternativa.....	66

3.3.1	ITC Volumétrico e Gravimétrico	66
3.3.2	Extração e Exportação relativas à produção e seus respectivos custos	70
3.3.3	Economia nutricional ao se atrasar a idade de corte	83
3.3.4	Análise econômica	86
CONCLUSÕES		91
REFERÊNCIAS		93

INTRODUÇÃO

O eucalipto é a cultura florestal mais plantada no Brasil, com importantes reflexos do ponto de vista ambiental, econômico e social. A competitividade do setor de base florestal do Brasil é dependente de que o manejo da floresta seja feito de modo a garantir a sustentabilidade da produção florestal. Essa sustentabilidade, na região tropical, requer a manutenção, em níveis adequados às necessidades da cultura, dos fluxos de água e nutrientes no sistema solo-povoamentos florestais (Neves, 2000, Barros e Comerford, 2002).

O eucalipto teve uma grande adaptabilidade ao Brasil devido às suas condições edafoclimáticas. Somado a este fato, os intensos investimentos em pesquisa em manejo e em melhoramento genético desta cultura, levaram à um grande aumento de sua produtividade, tornando-se o país de referência neste quesito.

Como consequência da alta produtividade, as rotações costumam ser muito mais curtas do que em outros países (Soares, 2015). Isto de certo modo contribui para a necessidade de investimentos em monitoramento nutricional dos plantios (Neves et al., 2008), para subsidiar, do ponto de vista técnico, a fertilização, prática amplamente requerida, nas condições de solo do Brasil, para o aumento da produtividade da cultura e ou de sua manutenção se já em níveis elevados.

A fertilização da cultura do eucalipto no Brasil tem sido feita, em muitas empresas do setor com base no balanço nutricional entre a quantidade de nutrientes que o solo pode suprir e a quantidade de nutrientes demandada pelas plantas (Witschoreck, 2014). Esse cálculo não é tão simples, pois envolve muitas informações que variam em função do sítio em que o plantio está inserido, das práticas silviculturais e do material genético utilizado, como feito no modelo Nutricalc (Barros et al, 1995, Barros et al, 2000).

A demanda nutricional das plantas varia em função da produtividade e da produção que se deseja atingir, e da eficiência nutricional das plantas. Essa eficiência depende do genótipo e é influenciada pela idade, disponibilidade de água, tipo de solo e práticas de manejo (Valadares, 2015).

Por outro lado, a quantidade de nutrientes que o solo é capaz de suprir varia de acordo com fatores como a disponibilidade do nutriente, o volume de solo explorado pelas raízes e a quantidade de nutrientes contidos nos resíduos de plantas, por exemplo, os resíduos da colheita florestal deixados na área ou contidos em vegetações invasoras, fatores que são influenciados

também pelo manejo adotado (Barros et al., 1995, Barros et al., 2017). O cultivo mínimo, por exemplo, propicia um maior acúmulo de matéria orgânica, que além de ser benéfica para a estrutura física do solo, é positivo para a disponibilidade nutricional, por aumentar a CTC do solo, reduzir os impactos da acidez, e pela capacidade de manutenção da umidade, além de diversos outros benefícios (Pavinato e Rosolem, 2008).

Para que a recomendação de adubação seja eficiente é necessário investir em trabalhos de modelagem das variáveis envolvidas no sistema solo-planta para diferentes regiões e potenciais produtivos, como feito por Valadares (2015) - que modelou a eficiência nutricional do eucalipto como função de clima (precipitação pluviométrica), solo (teor de argila) e manejo (área útil por árvore, ou seja, do espaçamento de plantio), e por Cordido (2019), que avaliou as acumulações-limite (máximas e mínimas) de biomassa e de nutrientes minerais durante a rotação de povoamentos de eucalipto no Brasil.

É amplamente conhecido que o uso indiscriminado de fertilizantes, tem efeitos, por exemplo, na qualidade dos solos, da água, da saúde humana e de outros organismos. Problemas como acidificação do solo, contaminação do lençol freático, eutrofização de recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa são alguns dos efeitos causados pelo uso excessivo de fertilizantes. A racionalização do uso de fertilizantes, incluindo o aprimoramento das prescrições de doses e do manejo das fertilizações, além de ser uma questão econômica tem reflexos no ambiente como um todo.

As curvas típicas de crescimento e produção do eucalipto são descritas por modelos sigmóides, que demonstram a evolução do tamanho da variável analisada, mais comumente o volume, no decorrer do tempo (Husch et al., 1972), podendo ser divididas em três fases ao longo da rotação.

Na fase inicial de crescimento da floresta (fase 1), caracterizada pelo crescimento das raízes, que constitui a prioridade na alocação do carbono assimilado na fotossíntese, ainda pequena, o solo é o principal supridor de nutrientes para as plantas. Assim, o ciclo geoquímico é via de ciclagem predominante, por isso, nessa fase, a planta é altamente sensível ao efeito de competição pelos recursos de produção, e a aceleração, que é a tendência de como a taxa de crescimento modifica com a mudança unitária da idade, é positiva.

A partir de meados da fase 1, a planta começa a direcionar carbono para as folhas, aumentando o índice de área foliar e, conseqüentemente a interceptação de luz, o que ocorre até meados da fase 2, época em que a aceleração de crescimento se iguala a zero, coincidindo com

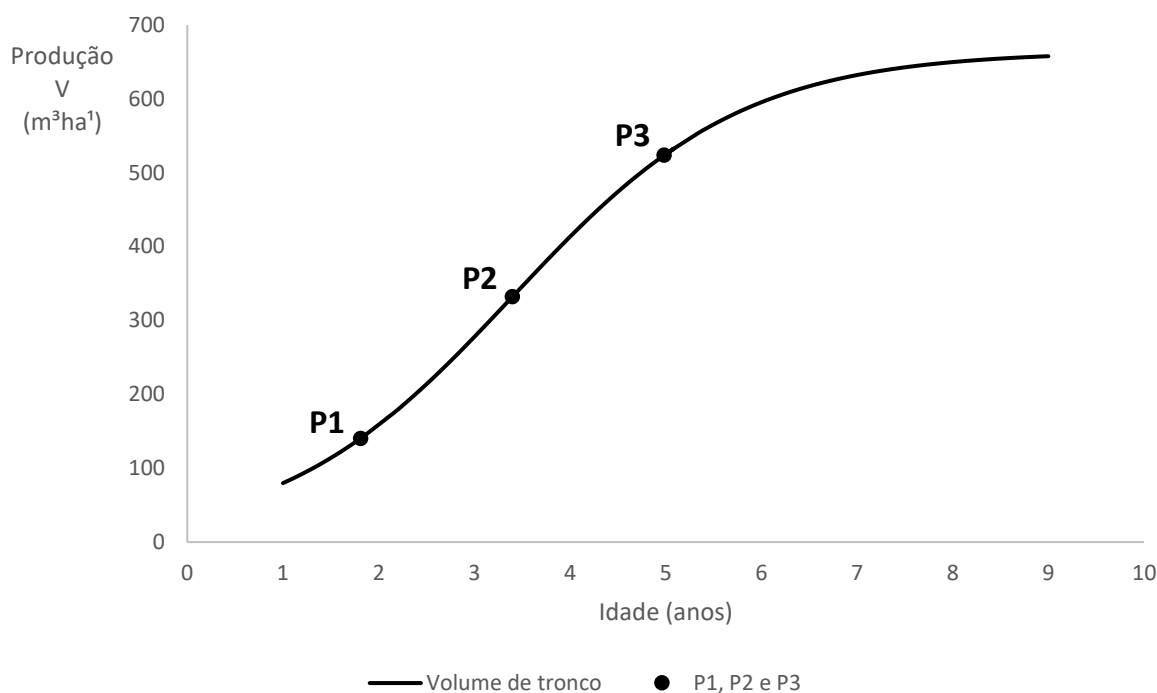
o máximo valor de Incremento Corrente (IC). De meados da fase 1 a meados da fase 2, esse período é caracterizado pela alta competição intra-planta, no qual os fotoassimilados são transportados dos tecidos mais velhos para os mais jovens - tecidos que são os drenos preferenciais. Este mecanismo é conhecido como ciclagem bioquímica, importante para a economia nutricional das árvores.

A fase 3 é mais qualitativa, nela a aceleração do crescimento é negativa e a competição intra-árvore é diminuída, passando a ocorrer importante competição entre árvores. Isto propicia a ciclagem biogeoquímica, mediante a deposição de litter, sendo os nutrientes liberados do litter para o solo, pela ação de organismos da mesofauna e da microbiota, portanto em ritmo compatível com as condições de clima, de solo e com a qualidade do resíduo, ficando disponíveis serem absorvidos novamente pelas árvores.

Esses momentos no tempo não são exatos, porém, as idades de máximo IC e de máximo incremento médio (IM) são biologicamente interpretáveis e importantes para o manejo florestal, podendo ser determinadas por meio de modelagem e cálculo diferencial.

Segundo Cordido (2019) e Teixeira (2020), curvas de produção construídas com o emprego de modelos não lineares sigmóides, como as funções Logística, Gompertz, Richards e Von Bertalanffy, podem ser utilizadas para identificar momentos (tempos ou idades) importantes durante as fases de crescimento, como indicado pelos pontos P1, P2 e P3 (Figura 1). Esses três pontos são importantes para a tomada de decisão quanto à idade recomendada para algumas práticas de manejo, como a fertilização, por exemplo (Fernandes et al., 2017). O P2, por exemplo, é a idade em que a taxa de crescimento é máxima (máximo incremento corrente - IC).

Figura 1 - Curva de produção volumétrica de tronco com a indicação dos pontos P1, P2 e P3



Na realidade, antes do ponto de máximo IC há um momento em que o crescimento passa a ser mais acelerado e após o ponto de máximo IC ocorre outro momento importante, no qual a desaceleração do crescimento é máxima. Esses momentos de uma curva de produção são encontrados utilizando a função de produção e suas derivadas de ordens superiores. A determinação e interpretação desses momentos ao longo do tempo pode ser estendida para a acumulação de carbono e de nutrientes, na parte aérea e nas raízes.

Esperadamente, o uso de rotações maiores em povoamentos de eucalipto pode contribuir para reduzir a exportação de nutrientes, devido ao aumento da eficiência de utilização de nutrientes, como se pode concluir com base nos modelos de Valadares (2015), consequência da otimização das ciclagens bioquímica e biogeoquímica, conforme visto por Neves (2000) dentre outros vários autores, de nutrientes minerais. Quando a colheita acontece mais tardiamente, os benefícios qualitativos oferecidos pela fase 3 da curva de produção são mais bem aproveitados, a exemplo do ganho na densidade da madeira, da produção de madeira com menores teores de nutrientes e da maior devolução de nutrientes minerais para o solo. Além disso, os impactos sobre a condição física do solo são menores, pois se a rotação é maior, a frequência de entrada de máquinas no campo é menor. Porém, é importante que se encontre uma idade de corte em que o projeto não perca o retorno econômico que teria em idades de corte mais precoces.

Os sistemas de recomendações de fertilização com base no balanço nutricional possibilitam a simulação de diferentes cenários, porém, devido à necessidade de um grande número de informações sobre a planta e o sítio, muitas vezes não disponíveis, evidencia-se a importância da modelagem das variáveis envolvidas nestes sistemas para diferentes regiões e potenciais produtivos a fim de tornar essas recomendações cada vez mais acuradas.

Acredita-se que o sucesso dos empreendimentos florestais depende da redução de custos e do aumento da produção e, muitas vezes, a sustentabilidade ambiental desses empreendimentos não recebe a atenção necessária. Nesse sentido, é indiscutível a importância da manutenção dos fluxos nutricionais no sistema solo-planta, mas além disso, é fundamental a adoção de estratégias que visam a redução dos impactos causados por esses empreendimentos.

A soma desses fatores manifesta a urgência e oportunidade em se adequar a uma forma de empreendedorismo florestal mais sustentável. Para isso, é necessário, primeiramente, conhecer bem a dinâmica de crescimento da cultura florestal, o conteúdo de nutrientes nos compartimentos das árvores e seus padrões de alocação em função da idade, assim como a eficiência de utilização destes nutrientes em diferentes cenários.

A modelagem é um mecanismo de grande importância, pois possibilita o prognóstico de crescimento e produção, assim como a demanda nutricional, em diferentes cenários, sendo de extrema valia no processo de planejamento e manejo florestal. O objetivo na modelagem de dados de crescimento é obter informações sobre os parâmetros que compõe a curva de crescimento, obtendo a interpretação física destes para construir um modelo dos padrões observados (Caterina, 2017).

Diante do exposto, percebe-se a necessidade de aprofundamento em estudos para a caracterização e modelagem de crescimento de povoamentos de eucalipto, que reflete a acumulação de carbono, além da modelagem da acumulação de nutrientes, e a avaliação da eficiência de utilização de nutrientes. Além disso, percebe-se a urgência por estratégias que busquem conciliar aspectos econômicos e ambientais em um povoamento florestal.

Os objetivos desse trabalho foram: modelar a produção volumétrica e a acumulação de carbono e de macronutrientes minerais, assim como a eficiência nutricional, ao longo da rotação, conforme a classe de produtividade de povoamentos clonais de eucalipto; modelar os parâmetros das curvas de produção de povoamentos de eucalipto; propor a inclusão da eficiência de uso de nutrientes e de análises econômicas na tomada de decisão quanto à idade de corte de povoamentos de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram obtidos dados de plantios clonais de eucalipto de diferentes regiões do Brasil, em variadas idades, com diferentes condições de sítio, o que permitiu a elaboração de um banco de dados com informações de 2.223 plantios comerciais. As informações contidas no banco de dados são: informações dendrométricas (altura, DAP, volume de madeira), de espaçamento, produção de biomassa e teores de macronutrientes minerais dos compartimentos da parte aérea das árvores (folhas, galhos, casca e lenho). É importante ressaltar que esses dados não foram obtidos por meio de inventário florestal contínuo ou por medições nas mesmas árvores ao longo do tempo.

2.1 Potencial produtivo – Volume relativo

Os dados obtidos foram divididos em 10 classes de produtividade de volume de tronco, tomando como referência a população superior (da linha de fronteira superior, LFS), considerada a população de referência, em que não houve fatores limitantes ao crescimento. As classes de produtividade foram: 0 a 10 (LFI), 10 a 20, 20 a 30, 30 a 40, 40 a 50, 50 a 60, 60 a 70, 70 a 80, 80 a 90 e 90 a 100 (LFS). Para a detecção da LFS, foi elaborado um gráfico de dispersão do volume de tronco dos povoamentos em função da idade. Foram selecionados os povoamentos que se alinharam à fronteira superior desse relacionamento; a seguir, aos pares de pontos assim obtidos (volume de tronco e idade) foi ajustada a equação logística para descrever a dinâmica de crescimento. A partir dos parâmetros da equação, foram estimados os volumes de tronco em função da idade até a idade de 12 anos. Com os dados de volume observado e os de volume predito foi possível calcular o volume de tronco relativo (A), como demonstrado na equação 1.

$$A = \frac{\text{Volume observado} \times 100}{\text{Volume do LFS}} \quad (1)$$

Em que:

A = Volume de tronco relativo (%),

Volume observado = dados observados de volume de tronco, em m³ ha⁻¹,

Volume do LFS = Volume de tronco predito da classe superior em produtividade, em m³ ha⁻¹

O quociente A indica o posicionamento de uma população em relação aos indivíduos superiores em crescimento em volume; assim, por exemplo, um povoamento com o valor de $A = 85$ indica que esse povoamento está situado na classe de produtividade de 80 a 90% para sua idade.

2.2 Modelagem de volume e biomassa de tronco, da alocação de nutrientes e da eficiência de uso de nutrientes em plantios de eucalipto

A modelagem permite a comparação de diferentes cenários em qualquer classe de produtividade. Devido a essa flexibilidade, todo o trabalho foi desenvolvido com dados estimados.

2.2.1 Volume e biomassa de tronco

Os dados observados de volume e de biomassa de tronco, além da idade, para cada classe de produtividade, definida pelo parâmetro A acima referido, foram relacionados utilizando a equação logística, pois, além de ter significado biológico, foi a que melhor representou a dinâmica de crescimento de todas as classes de produtividade. Por meio da equação assim obtida, foram obtidas estimativas de volume e de biomassa de tronco até a idade de 12 anos.

2.2.2 Conteúdo de nutrientes

Os conteúdos de N, P, K, Ca e Mg no tronco e na parte aérea, por hectare, obtidos pelo produto das respectivas biomassas secas pelos seus teores de nutrientes, foram relacionados com os valores observados de biomassa de tronco e foram ajustados os modelos de regressão que melhor representaram a dinâmica de alocação de cada nutriente (no tronco e na parte aérea) com o aumento da biomassa e, conseqüentemente, com o aumento da idade. Os parâmetros das equações foram utilizados para a modelagem de macronutrientes até a idade de 12 anos.

A modelagem de biomassa e de macronutrientes foi feita para cada uma das 10 classes de produtividade de volume de tronco, estratificadas anteriormente.

Alocação de nutrientes

A alocação de nutrientes nos compartimentos das árvores foi obtida somente para a LFS, ou seja, para as árvores com maior eficiência de uso dos recursos de produção, ao longo da rotação.

2.2.3 Eficiência de uso de nutrientes

O CUB compartimentalizado, razão entre a biomassa de tronco e o conteúdo de nutriente neste compartimento (Barros et al, 1986; Barros et al, 1995), e o CUB integralizado (Neves, 2000, Santos, 2015), razão entre a biomassa de tronco e o conteúdo de nutrientes na árvore como um todo, foram os índices utilizados para a quantificação da eficiência de uso de nutrientes.

O conteúdo dos macronutrientes nas raízes foram estimados a partir de equações obtidas por Neves¹ (equações 2, 3, 4, 5 e 6).

$$\frac{N \text{ nas raízes}}{N \text{ na PA}} = 0,2929i^{-0,087} \quad (2)$$

Em que:

N nas raízes = Conteúdo de N nas raízes, em kg ha⁻¹,
N na PA = Conteúdo de N na parte aérea, em kg ha⁻¹,
i = Idade, em anos.

$$\frac{P \text{ nas raízes}}{P \text{ na PA}} = 0,3073i^{-0,212} \quad (3)$$

Em que:

P nas raízes = Conteúdo de P nas raízes, em kg ha⁻¹,
P na PA = Conteúdo de P na parte aérea, em kg ha⁻¹,
i = Idade, em anos.

$$K \text{ nas raízes} = 0,15 \times K \text{ na PA} \quad (4)$$

Em que:

K nas raízes = Conteúdo de K nas raízes, em kg ha⁻¹,
K na PA = Conteúdo de K na parte aérea, em kg ha⁻¹.

¹ Prof. Júlio César Lima Neves, Departamento de Solos – UFV, comunicação pessoal

$$\frac{Ca \text{ nas raízes}}{Ca \text{ na PA}} = 0,1811i^{-0,366} \quad (5)$$

Em que:

Ca nas raízes = Conteúdo de Ca nas raízes, em kg ha⁻¹,
 Ca na Ca = Conteúdo de Ca na parte aérea, em kg ha⁻¹,
 i = Idade, em anos.

$$\frac{Mg \text{ nas raízes}}{Mg \text{ na PA}} = 0,1265i^{-0,288} \quad (6)$$

Em que:

Mg nas raízes = Conteúdo de Mg nas raízes, em kg ha⁻¹,
 Mg na PA = Conteúdo de Mg na parte aérea, em kg ha⁻¹,
 i = Idade, em anos.

Essas equações foram feitas para descrever o comportamento do conteúdo de nutrientes nas raízes em função do conteúdo de nutrientes na parte aérea para plantios clonais de eucalipto. O conteúdo nas raízes foi estimado para realizar o cálculo do conteúdo de nutrientes na árvore.

2.3 Modelagem dos parâmetros das curvas de produção

A equação logística foi ajustada para descrever a dinâmica de crescimento das populações de cada uma das classes de produtividade, relacionando volume de madeira com a idade, cujos parâmetros foram modelados em função da classe de produtividade. O comportamento de cada parâmetro foi observado com o centro de cada classe (A): 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95%.

2.3.1 Parâmetro α , β e γ

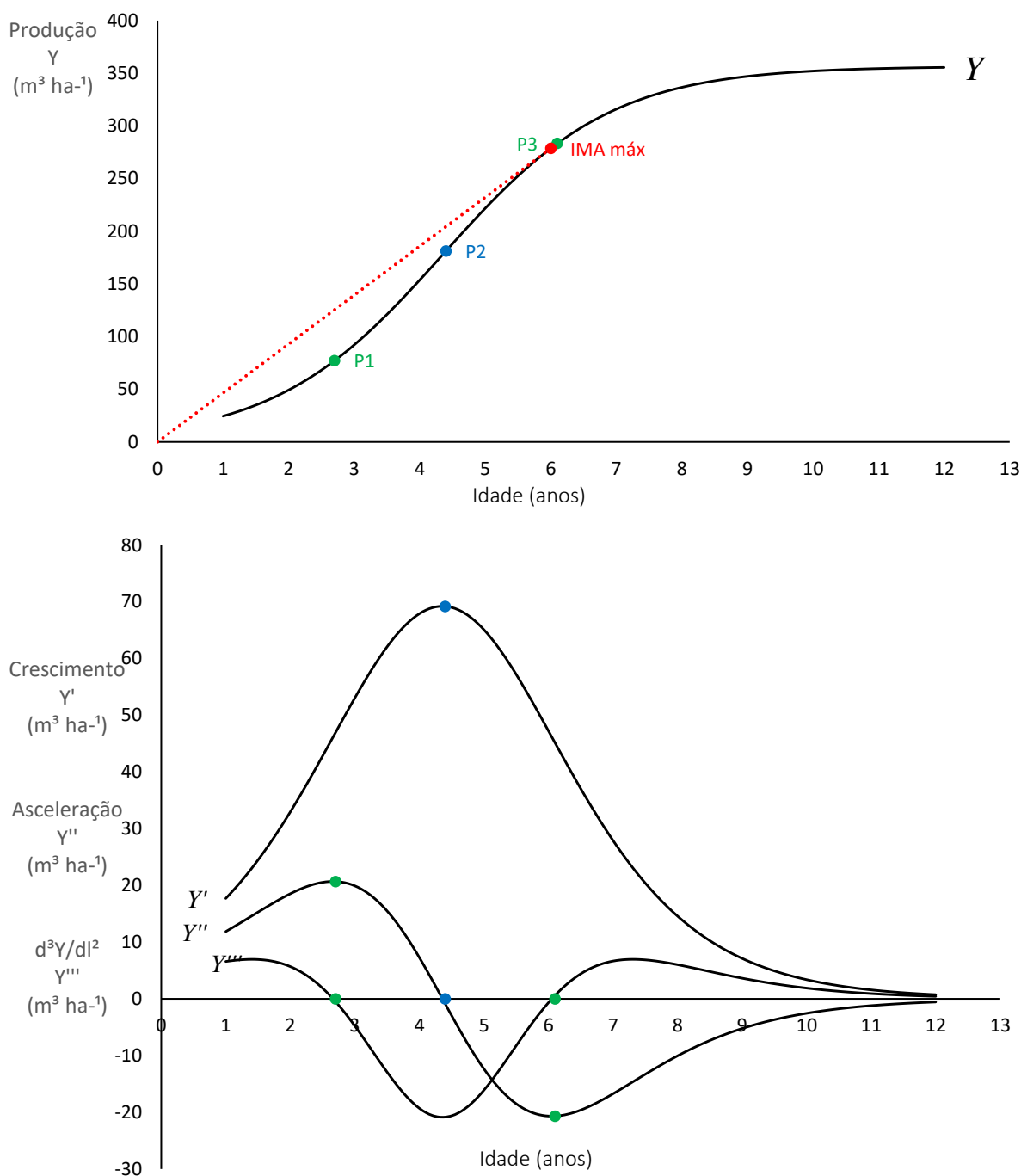
Os valores de A e seus respectivos valores de α e β foram modelados no Curve Expert Professional, utilizando as equações que melhor descreveram o comportamento destes parâmetros em função da produtividade. Visto que o parâmetro γ não apresenta variações significativas em relação à produtividade, foi utilizado um valor constante.

2.3.2 P1, P2 e P3

O $P1$ é a idade de máxima aceleração do crescimento, o $P2$ é a idade de máxima taxa de crescimento e o $P3$ é a idade de máxima desaceleração do crescimento. Esses pontos são encontrados a partir das derivações da curva de produção.

Na figura 2, a curva representada por Y é a de produção, na qual podemos ver os pontos $P1$, $P2$, $P3$ e IMA máximo. Ao se derivar a função de produção, temos a curva de crescimento, representada por Y' . Nesta curva, é possível identificar o ponto de maior crescimento (ICA máximo) que acontece na idade $P2$, representada pelo símbolo azul. Para encontrar o valor de $P2$, Y' precisa ser derivada e igualada a zero, gerando a curva Y'' . Quando a aceleração é nula, o ICA alcança o seu valor máximo. Y'' é a curva de aceleração do crescimento, nela podemos ver o $P1$ e o $P3$, representados por pontos verdes. Para encontrar as idades $P1$ e $P3$ é preciso derivar a função Y'' e igualá-la a zero, gerando a curva Y''' .

Figura 2 - P1, P2, P3 e IMA máximo representados na curva de produção e nas suas derivadas



2.4 Idade técnica de corte: uma abordagem alternativa

Foram selecionadas duas das 10 classes de produtividades, a da LFS, considerada a população de referência, e a central (50 a 60% de produtividade).

2.4.1 ITC Volumétrico e Gravimétrico

O incremento médio anual (IMA) e o incremento corrente anual (ICA) em volume e em biomassa de tronco das duas classes foram calculados para a definição da idade técnica de corte (ITC) pelo método tradicional (o que prioriza a maximização do IMA). O IMA é o quanto a floresta cresceu, em média, por ano, até uma determinada idade, e foi calculado dividindo o volume e a biomassa pela idade em que essas variáveis foram medidas (equação 7). O ICA mede o crescimento no período de um ano e foi calculado pela diferença de volume e de biomassa entre o final e o início do período de crescimento de um ano (equação 8).

$$\text{IMAt} = \text{Volt e Biot} / \text{Idade t} \quad (7)$$

$$\text{ICAt} = \text{Volt e Biot} - \text{Vol}(t - 1) \text{ e Bio}(t - 1) \quad (8)$$

Em que:

ICAt - incremento corrente anual no período t;

Volt e Biot - Volume e biomassa no período t, em m³ ha⁻¹;

Vol(t-1) e Bio(t-1) - Volume e biomassa no período t-1, em m³ ha⁻¹;

IMAt - Incremento corrente anual no período t;

Idade t - Idade da população no período t, em anos.

2.4.2 Extração e exportação relativas à produção e seus respectivos custos

A extração foi calculada pela soma dos macronutrientes nos seguintes compartimentos das árvores: folhas, galhos, tronco e raízes.

A exportação de nutrientes é a quantidade de nutrientes retirados do campo por ocasião da colheita e se dá pelo conteúdo de nutrientes presentes no tronco na idade de corte. Tanto a extração quanto a exportação foram medidos em kg ha⁻¹.

A extração e a exportação relativas à produção são calculadas, respectivamente, pelo conteúdo de nutrientes na árvore dividido pela biomassa de tronco e pelo conteúdo de nutrientes no tronco dividido pela biomassa de tronco, em kg kg⁻¹.

2.4.3 Economia nutricional ao de atrasar a idade de corte

O cálculo da economia com fertilizantes obtida ao se atrasar a idade de corte foi feito pela comparação dos custos de extração e da exportação relativos à produção de madeira nas seguintes idades:

ITC volumétrica e ITC gravimétrica de cada classe de produtividade e aos 12 anos de idade para as duas classes de produtividade.

Os custos de extração e de exportação foram obtidos pela multiplicação do conteúdo de cada nutriente na árvore e no tronco, respectivamente, pelo preço dos fertilizantes da tabela 1. Ambos os custos relativos à produção foram obtidos pela razão entre cada um deles e a biomassa de tronco.

Tabela 1 - Preços de fertilizantes utilizados para o cálculo da economia nutricional

	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio
Fertilizante	Sulfato de Amônio	Superfosfato Simples	Cloreto de Potássio	Calcário Dolomítico	Calcário Dolomítico
% do Nutriente	20%N	20%P2O5	60%K2O	30% CaO	15%MgO
Preço	7,4 R\$ kg ⁻¹ N	16,8 R\$ kg ⁻¹ P	7,8 R\$ kg ⁻¹ K	0,4 R\$ kg ⁻¹ CaO	0,8 R\$ kg ⁻¹ MgO

2.4.4 Análise Econômica

A escolha dos métodos de avaliação econômica teve como pré-requisito a consideração da variação do capital no tempo. Os métodos utilizados foram: valor presente líquido (VPL) e custo médio de produção (CMP). Ambos foram elaborados para as idades de corte de 4 a 12 anos e para as taxas de juros de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 %.

Valor presente líquido – VPL

O VPL transfere para o ano zero a receita e os custos e calcula a diferença entre esses valores, conforme evidenciado na equação 9.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} \quad (9)$$

Em que:

R_j = Receitas no período j, em R\$ ha⁻¹;

C_j = Custos no período j, em R\$ ha⁻¹;

i = taxa de juros ao ano;
j = período em que a receita e/ou o custo ocorrem (j = 0...n), em anos; e
n = duração do projeto, em anos.

Quando o VPL é maior do que zero, indica que o investimento é viável e quando se compara diferentes cenários, aquele que apresenta o maior valor positivo de VPL é o melhor investimento.

Custo médio de produção – CMP

CMP é a divisão entre o valor atual do custo e a produção total equivalente e foi calculado de acordo com a equação 10:

$$CMP = \frac{\sum_{j=0}^n CTj(1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n PTj(1+i)^{-j}} \quad (10)$$

Em que:

CTj = Custo total equivalente, em R\$ ha⁻¹;
PTj = Produção total equivalente, em m³ ha⁻¹;
i = taxa de juros ao ano;
j = período em que o custo e/ou a produção ocorrem (j = 0...n), em anos; e
n = duração do projeto, em anos.

O investimento que apresenta o menor custo médio de produção é o mais lucrativo.

Os valores de custos utilizados, tanto de implantação, quanto de manutenção, constam na tabela 2.

Tabela 2- Custos empregados para as análises econômicas de diferentes cenários de idades de corte.

(Continua)

Custos de implantação e de manutenção de um plantio florestal						
Ano	Atividade	Rendimento (Un./ha)	Unid.	Custo unitário	Aplicação (%)	Total (R\$ ha ⁻¹)
Ano 0	Ajudante Florestal	20	hh	11,39	100%	227,74
Ano 0	Alinhamento/Marcação	10	hh	11,39	100%	113,87

Tabela 2- Custos empregados para as análises econômicas de diferentes cenários de idades de corte.

(Continuação)

Custos de implantação e de manutenção de um plantio florestal						
Ano	Atividade	Rendimento (Un./ha)	Unid.	Custo unitário	Aplicação (%)	Total (R\$ ha ⁻¹)
Ano 0	Capina Química Manual Total	11	hh	14,51	80%	127,68
Ano 0	Capina Química Mecânica total	0,95	hh	88,26	20%	16,77
Ano 0	Combate à Formiga Sistemático	3,5	Hh	11,93	100%	41,75
Ano 0	Combate à Formiga Convencional	8	hh	11,93	110%	104,97
Ano 0	Coveamento Motorizado	17	hh	22,99	80%	312,63
Ano 0	Irrigação Caminhão Pipa	16	hh	18,57	100%	297,18
Ano 0	Limpeza Manual	80	hh	11,39	30%	273,29
Ano 0	Operador de Motosserra	2	hh	27,69	100%	55,38
Ano 0	Planificação	5	hh	80	0%	-
Ano 0	Plantio c/ gel	17	hh	16,71	100%	284,00
Ano 0	Replantio c/ Gel	7	hh	16,71	100%	116,94
Ano 0	Roçada Manual	30	hh	11,39	70%	239,13
Ano 0	Subsolagem/Fosfatagem	1,5	hh	135,7	20%	40,71
Ano 0	Cupinícida	0,03	kg	845,13	100%	27,89
Ano 0	Formicida	8	kg	4,27	110%	37,58
Ano 0	Frete Mudas/Insumos	1	ha	132	100%	132,00
Ano 0	Gel	3	kg	6,69	100%	20,07
Ano 0	Herbicida	6	l	9,53	100%	57,18
Ano 0	Map	0,33	kg	1,35	100%	0,45
Ano 0	Mudas	1,2	mil	231,4	100%	277,71
Ano 0	Topografia	1	ha	65,67	100%	65,67

Tabela 2- Custos empregados para as análises econômicas de diferentes cenários de idades de corte.

(Continuação)

Custos de implantação e de manutenção de um plantio florestal						
Ano	Atividade	Rendimento (Un./ha)	Unid.	Custo unitário	Aplicação (%)	Total (R\$ ha ⁻¹)
Ano 1	Ajudante Florestal	10	hh	11,14	100%	111,40
Ano 1	Capina Química Manual Total	15	hh	14,51	100%	217,64
Ano 1	Combate à formiga convencional	6	hh	11,93	110%	78,73
Ano 1	Construção Manual de Aceiro	200	hh	11,39	10%	227,74
Ano 1	Coroamento	16	hh	11,39	100%	182,19
Ano 1	Roçada Manual - Pós plantio	16	hh	11,39	100%	182,19
Ano 1	Formicida	7	kg	4,27	110%	32,88
Ano 1	Herbicida	3	l	9,53	100%	28,59
Ano 2	Capina Química Manual Total	13	hh	14,51	100%	188,62
Ano 2	Combate à Formiga Convencional	6	hh	11,93	110%	78,73
Ano 2	Manutenção Manual de Aceiro	200	hh	11,39	10%	227,74
Ano 2	Roçada manual	16	hh	11,39	100%	182,19
Ano 2	Formicida	5	kg	4,27	110%	23,49
Ano 2	Herbicida	6	kg	9,53	100%	57,18
Ano 3	Capina Química Manual	6	hh	11,93	110%	78,73
Ano 3	Formicida	2	kg	4,27	110%	9,39

Tabela 2- Custos empregados para as análises econômicas de diferentes cenários de idades de corte.

(Conclusão)						
Custos de implantação e de manutenção de um plantio florestal						
Ano	Atividade	Rendimento (Un./ha)	Unid.	Custo unitário	Aplicação (%)	Total (R\$ ha ⁻¹)
Ano 4	Capina Química Manual	6	hh	11,93	110%	78,73
	Total					
Ano 4	Formicida	2	kg	4,27	110%	9,39

Nota: Os custos do ano 4 se repetem anualmente até o ano de corte.

Fonte: Binoti, 2010.

Os valores de exportação nas diferentes idades foram utilizados para calcular os custos com fertilização, levando em consideração a necessidade de reposição dos nutrientes retirados pela colheita ao sistema, a fim de se evitar um desequilíbrio nutricional e futuro exaurimento do solo.

Os custos com adubação são diferentes para o LFS e para a classe central. Para calculá-los, multiplicou-se a exportação relativa em cada simulação de idade de corte pelos valores da tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem de volume e biomassa de tronco, da alocação de nutrientes e da eficiência de uso de nutrientes em plantios de eucalipto

3.1.1 Volume e biomassa de tronco

Os modelos ajustados para estimar volume e biomassa, em cada classe de produtividade, foram do tipo logístico (equação 11).

$$V = \frac{\alpha}{1 + \beta} e^{-\gamma I} \quad (11)$$

Em que:

V= Produção;

I= Idade do povoamento;

α , β , γ = Parâmetros.

Os coeficientes de correlação e os parâmetros das equações ajustadas estão descritos nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3- Modelagem de volume

Classes	α	β	γ	r
90 a 100	696,84	14,97	0,79	0,993
80 a 90	579,70	18,69	0,90	0,998
70 a 80	522,54	18,27	0,86	0,997
60 a 70	463,51	16,08	0,80	0,996
50 a 60	385,15	18,00	0,85	0,995
40 a 50	324,29	17,72	0,83	0,992
30 a 40	270,92	18,31	0,79	0,989
20 a 30	220,91	21,88	0,79	0,973
10 a 20	136,18	24,35	0,86	0,919
0 a 10	46,36	17,67	0,92	0,784

Tabela 4- Modelagem de biomassa

Classes	α	β	γ	r
90 a 100	410,69	12,40	0,56	0,973
80 a 90	303,60	15,59	0,69	0,998
70 a 80	310,44	15,32	0,59	0,994
60 a 70	237,86	14,90	0,66	0,996
50 a 60	212,01	16,06	0,66	0,996
40 a 50	180,91	16,76	0,62	0,993
30 a 40	163,42	18,62	0,60	0,988
20 a 30	125,02	20,49	0,62	0,949
10 a 20	76,52	29,09	0,86	0,876
0 a 10	12,56	19,17	1,53	0,617

O parâmetro α apresentou valores mais altos nas classes com maior potencial produtivo, tanto para biomassa quanto para volume. Isso acontece porque α é a assíntota, refere-se à produção quando a idade tende ao infinito, ou seja, a produção máxima ou produção quando ICA = 0.

O β é um parâmetro escala (constante de integração) que não tem interpretação biológica (Santoro et al., 2005).

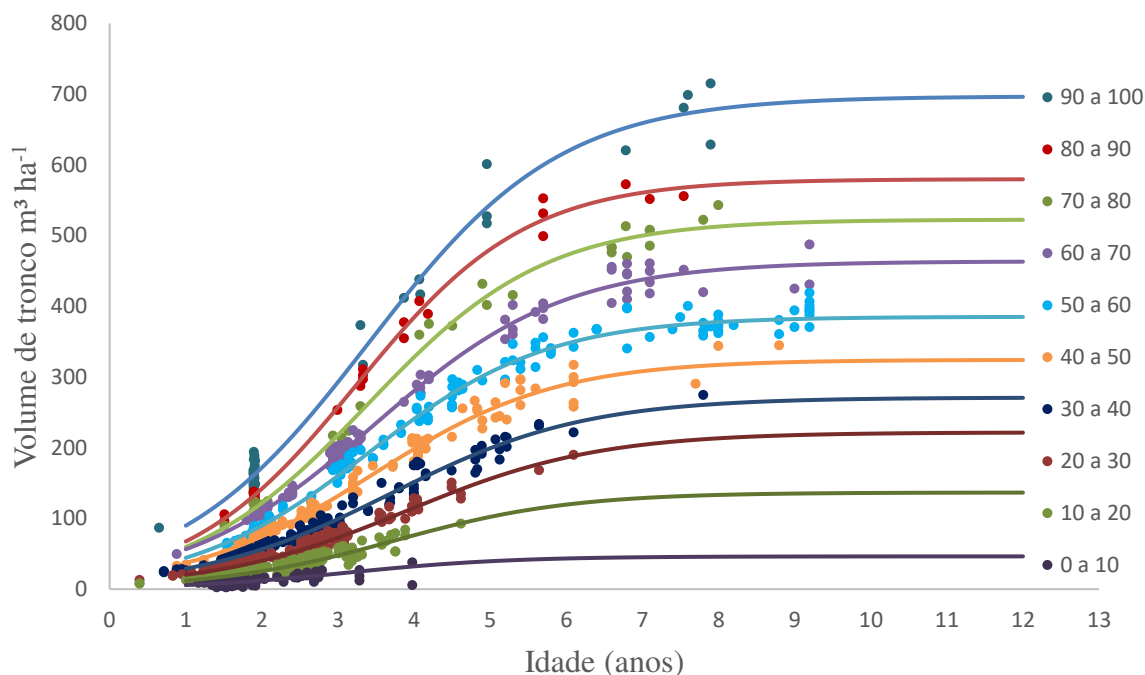
O parâmetro γ está relacionado à taxa média de crescimento da curva e não apresentou variações significativas entre as classes de produtividade, apesar dos valores de volume e biomassa alcançados serem bem diferentes entre as classes.

As funções logísticas descrevem a evolução do tamanho da variável analisada no decorrer do tempo. Ela foi utilizada, inicialmente por Verhulst, para descrever o crescimento de populações humanas em 1845; posteriormente, foi utilizada para representar o crescimento de animais e vegetais (Carvalho, 1996). Desde então, tem sido muito utilizada para modelagem do crescimento biológico, sendo considerada uma das melhores para este fim. A equação representa a dinâmica do crescimento em um ambiente com recursos finitos e se baseia no princípio de que a taxa de crescimento é proporcional à população e aos recursos disponíveis (Robazza et al., 2010).

Os valores de volume e de biomassa estimados tiveram grande analogia com os valores observados, tendo uma pequena queda dos coeficientes de correlação em classes com menores potenciais produtivos (tabelas 3 e 4). Os dados dessas classes, principalmente a da linha de fronteira inferior (LFI), concentram-se em idades muito precoces, sendo escassos os dados em idades mais avançadas do plantio, justamente pelo insucesso dessas populações em relação ao crescimento em volume; presume-se que elas não tiveram continuidade.

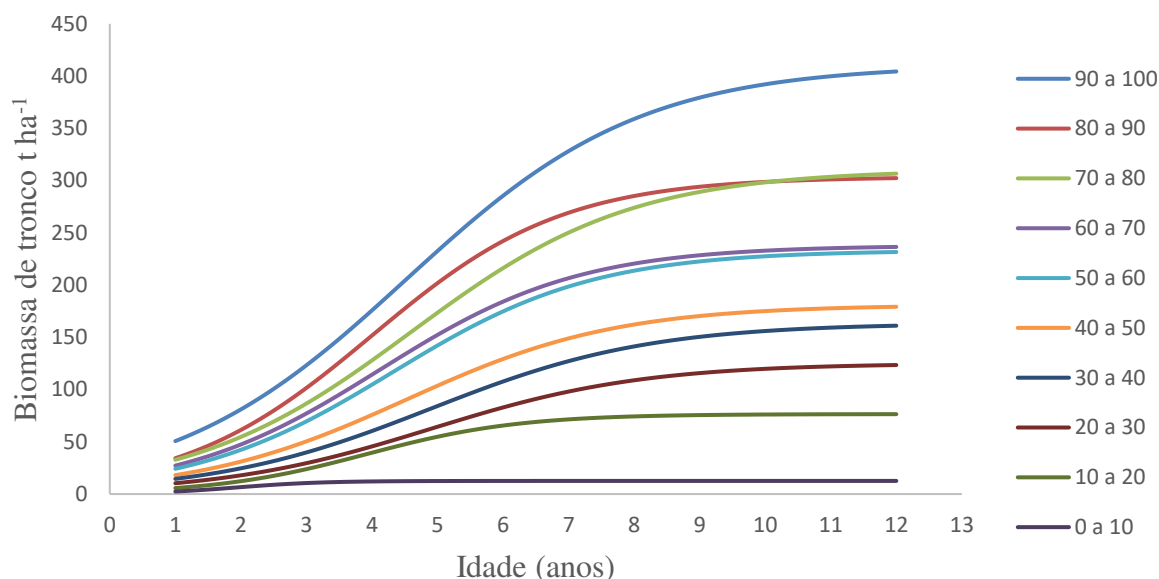
A figura 3 demonstra os dados de volume de tronco observados em cada classe de produtividade, plotados em forma de pontos, e os volumes de tronco modelados para cada classe, representados por linhas. É possível notar que os dados modelados se encontram perfeitamente no centro dos dados observados de cada classe, constatando a eficiência da modelagem.

Figura 3 - Volumes de tronco observados e modelados para as 10 classes de produtividade, em função da idade



A partir da divisão das populações de acordo com suas produtividades em volume, foram modelados as outras variáveis encontradas nessas populações, como a biomassa e o conteúdo de nutrientes nos compartimentos das árvores. Essas variáveis não seguem perfeitamente a sequência das classes de produtividade, ou seja, a LFS não possui, necessariamente, maior conteúdo de carbono e nutrientes no tronco do que as outras classes pelo fato de terem maior produção volumétrica, por exemplo. A biomassa de tronco dessas classes modelada até a idade de 12 anos é demonstrada pela figura 4.

Figura 4 - Biomassa de tronco modelada em função da idade, para as 10 classes de produtividade



A diferença da dinâmica de crescimento em volume e alocação de C entre as classes se explica pelo fato de que, o Brasil, por ser muito extenso, possui grande variedade de capacidades produtivas entre seus sítios florestais. A capacidade produtiva é, conceitualmente, definida por clima, fisiografia e solo, cujos índices de qualidade, uma vez integrados, resultam no índice de qualidade do sítio (IQSítio). Um mesmo sítio, porém, pode ter diferentes taxas de produtividade. A produtividade atingível da cultura do eucalipto ocorre em função do sítio, do material genético utilizado e do manejo aplicado, uma vez que distintos materiais genéticos e esquemas de manejo podem resultar em distintas eficiências de uso de fatores de produção, a exemplo de luz, água e nutrientes (Borges, 2012).

3.1.2 Conteúdo de nutrientes

Os conteúdos de N, P, K, Ca e Mg no tronco e na parte aérea foram relacionados com os valores observados de biomassa de tronco e foi ajustada a equação que melhor representou a dinâmica de alocação de cada nutriente (no tronco e na parte aérea) com o aumento da biomassa e, conseqüentemente, com o aumento da idade. Os parâmetros das equações foram utilizados para a modelagem de macronutrientes até a idade de 12 anos.

A tabela 5 mostra as equações utilizadas para a modelagem dos macronutrientes, em cada classe de produtividade, para o tronco e para a parte aérea.

Tabela 5 - Equações utilizadas para a modelagem de macronutrientes, no tronco e na parte aérea, em função da biomassa de tronco

Classe de produtividade	N		P		K		Ca		Mg	
	Tr	PA	Tr	PA	Tr	PA	Tr	PA	Tr	PA
90 a 100	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
80 a 90	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
70 a 80	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
60 a 70	L	L	L	L	RL	RL	E	E	L	L
50 a 60	L	L	L	L	Bl	RM	L	L	L	Bl
40 a 50	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
30 a 40	L	L	RM	E	L	L	L	G	L	L
20 a 30	L	FH	L	L	L	L	RQ	G	L	L
10 a 20	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
0 a 10	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L

Nota: Tr= Tronco; PA= Parte Aérea; L=Logistic²; RL = Reciprocal Logarithm³; E=Exponential⁴; Bl=Bleasdale⁵; RM=Rational Model⁶; G= Geometric⁷; FH= Farazdaghi – Harris⁸; RQ= Reciprocal Quadratic⁹;

As tabelas de 6 a 15 indicam os parâmetros e os coeficientes de correlação das equações utilizadas para a modelagem dos conteúdos de N, P, K, Ca e Mg no tronco e na parte aérea, em cada classe:

$$^2 y=a/(1+be^{-cx})$$

$$^3 y=1/a+b\ln(x)$$

$$^4 y=ae^{bx}$$

$$^5 y=(a+bx)^{-1/c}$$

$$^6 y=(a+bx)/(1+cx+dx^2)$$

$$^7 y=ax^{bx}$$

$$^8 y=1/(a+bx^c)$$

$$^9 y=1/(a+bx+cx^2)$$

Tabela 6 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de N no tronco, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de nitrogênio no tronco				
Classe	a	b	c	r
90 a 100	374,22	17,82	0,03	0,881
80 a 90	325,08	16,61	0,03	0,727
70 a 80	312,72	14,16	0,03	0,796
60 a 70	278,70	25,46	0,04	0,868
50 a 60	351,65	6,28	0,02	0,818
40 a 50	192,91	16,12	0,05	0,871
30 a 40	173,65	13,08	0,05	0,829
20 a 30	97,76	8,81	0,06	0,822
10 a 20	85,26	11,06	0,08	0,816
0 a 10	28,33	8,51	0,24	0,772

Tabela 7 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de P no tronco, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de fósforo no tronco					
Classe	a	b	c	d	r
90 a 100	29,22	8,76	0,02		0,829
80 a 90	34,57	16,19	0,03		0,827
70 a 80	22,96	4,29	0,02		0,703
60 a 70	19,66	8,64	0,03		0,877
50 a 60	19,33	4,74	0,02		0,683
40 a 50	17,40	4,98	0,02		0,751
30 a 40	-19,76	2,08	0,31	-1,2E-03	0,768
20 a 30	9,06	8,87	0,07		0,723
10 a 20	8,45	12,92	0,10		0,701
0 a 10	7,74	20,49	0,16		0,681

Tabela 8 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de K no tronco, nas 10 classes de produtividade

(Continua)

Conteúdo de potássio no tronco				
Classe	a	b	c	r
90 a 100	464,39	8,09	0,01	0,960
80 a 90	306,24	7,05	0,02	0,853
70 a 80	198,42	5,72	0,03	0,661
60 a 70	0,03	-0,01		0,847
50 a 60	0,09	0,01	0,55	0,753

Tabela 8 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de K no tronco, nas 10 classes de produtividade

(Conclusão)

Conteúdo de potássio no tronco				
Classe	a	b	c	r
40 a 50	130,82	6,03	0,06	0,685
30 a 40	99,94	5,25	0,07	0,734
20 a 30	112,32	7,17	0,07	0,756
10 a 20	96,82	8,15	0,08	0,789
0 a 10	39,63	7,12	0,24	0,761

Tabela 9 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de Ca no tronco, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de cálcio no tronco					
Classe	a	b	c	D	r
90 a 100	481,92	6,89	0,02		0,919
80 a 90	901,54	9,25	0,01		0,726
70 a 80	384,21	11,14	0,03		0,669
60 a 70	67,13	0,01			0,745
50 a 60	168,95	0,38	3E-03	-1,20E-05	0,740
40 a 50	526,67	14,66	0,02		0,826
30 a 40	473,15	14,30	0,02		0,795
20 a 30	0,04	-5,4E-04	2,23E-06	0,69	0,745
10 a 20	57,54	3,95	0,09		0,679
0 a 10	92,96	13,77	0,17		0,763

Tabela 10 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de Mg no tronco, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de magnésio no tronco				
Classe	a	b	c	r
90 a 100	81,29	4,74	0,02	0,755
80 a 90	79,14	5,44	0,03	0,774
70 a 80	64,75	2,93	0,02	0,754
60 a 70	60,11	2,32	0,01	0,807
50 a 60	387,73	22,68	0,01	0,797
40 a 50	44,67	3,93	0,03	0,743
30 a 40	42,03	5,81	0,03	0,785
20 a 30	29,03	5,51	0,05	0,796
10 a 20	14,70	4,16	0,08	0,660
0 a 10	23,20	13,95	0,15	0,754

Tabela 11 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de N na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de nitrogênio na parte aérea				
Classe	a	b	c	r
90 a 100	524,33	8,25	0,03	0,789
80 a 90	463,88	5,88	0,03	0,717
70 a 80	427,31	4,26	0,02	0,786
60 a 70	389,51	5,20	0,03	0,850
50 a 60	828,09	4,44	0,01	0,803
40 a 50	282,02	1,84	0,03	0,857
30 a 40	432,91	2,65		0,810
20 a 30	0,02	0,00	0,27	0,634
10 a 20	161,82	1,12	0,06	0,725
0 a 10	123,16	1,78	0,20	0,704

Tabela 12 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de P na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

Conteúdo de fósforo na parte aérea				
Classe	a	b	c	r
90 a 100	49,35	13,81	0,03	0,757
80 a 90	44,16	9,37	0,03	0,818
70 a 80	28,65	3,43	0,03	0,756
60 a 70	26,47	3,14	0,03	0,861
50 a 60	43,79	3,02	0,01	0,589
40 a 50	23,09	1,21	0,02	0,740
30 a 40	9,87	0,01		0,728
20 a 30	12,77	1,31	0,06	0,701
10 a 20	11,06	1,40	0,08	0,699
0 a 10	14,28	2,62	0,10	0,658

Tabela 13 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de K na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

(Continua)

Conteúdo de potássio na parte aérea					
Classe	a	b	c	d	r
90 a 100	419,65	9,55	0,03		0,911
80 a 90	371,12	3,96	0,03		0,824
70 a 80	237,06	1,64	0,03		0,698
60 a 70	0,02	0,00			0,823
50 a 60	168,96	0,38	0,00	-1,20E-05	0,740
40 a 50	167,89	4,00	0,08		0,702
30 a 40	141,01	1,58	0,07		0,703
20 a 30	153,54	1,45	0,05		0,733

Tabela 13 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de K na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

(Conclusão)

Classe	Conteúdo de potássio na parte aérea				r
	a	b	c	d	
10 a 20	182,64	2,16	0,04		0,771
0 a 10	86,50	1,74	0,28		0,721

Tabela 14 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de Ca na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

Classe	Conteúdo de cálcio na parte aérea				r
	a	b	c	d	
90 a 100	563,02	5,04	0,02		0,879
80 a 90	1580,03	9,57	0,01		0,904
70 a 80	447,67	7,40	0,03		0,735
60 a 70	100,02	0,01			0,727
50 a 60	1936,86	23,37	0,01		0,841
40 a 50	842,66	9,39	0,01		0,799
30 a 40	85,10	0,00			0,682
20 a 30	0,02	0,00	0,00		0,613
10 a 20	74,51	0,84	0,15		0,641
0 a 10	131,05	3,10	0,14		0,647

Tabela 15 - Parâmetros e coeficiente de correlação das equações utilizadas para a modelagem de Mg na parte aérea, nas 10 classes de produtividade

Classe	Conteúdo de magnésio na parte aérea				r
	a	b	c	d	
90 a 100	109,66	3,20	0,02		0,814
80 a 90	121,52	3,17	0,02		0,801
70 a 80	78,30	1,69	0,02		0,702
60 a 70	63,75	0,88	0,02		0,800
50 a 60	0,59	0,00	0,15		0,714
40 a 50	100,19	2,51	0,01		0,737
30 a 40	101,76	3,72	0,01		0,752
20 a 30	48,79	1,97	0,03		0,727
10 a 20	19,88	2,40	0,31		0,641
0 a 10	54,99	5,78	0,11		0,675

O conhecimento dos padrões de alocação dos nutrientes e de seus conteúdos nos compartimentos das plantas ao longo da rotação é de extrema importância para o entendimento da demanda nutricional de povoamentos florestais ao longo de seus ciclos de vida e para o

conhecimento da quantidade de nutrientes pode retornar ao solo, caso os resíduos sejam deixados no campo no momento da colheita.

Saber a quantidade de nutrientes demandada em cada idade nos permite inferir sobre os melhores momentos para a realização de práticas silviculturais, como por exemplo, a fertilização, que deve ser feita em momentos em que os plantios terão maior resposta e, consequentemente maior aproveitamento dos nutrientes.

De acordo com o conteúdo de nutrientes modelado, percebe-se que, de maneira geral, a aquisição desses nutrientes pela planta se dá até a idade de 5 anos, com exceção do cálcio e de algumas classes dos outros nutrientes. Após essa idade, a ciclagem bioquímica torna-se importantíssima para o suprimento nutricional, principalmente para o tronco, pois neste momento, as copas e as raízes já estão formados.

Os conteúdos de macronutrientes no tronco e na parte aérea aumentam em função da idade. Diferentemente do volume e da biomassa, eles não seguem perfeitamente a ordem das classes de produtividade, ou seja, populações com maior potencial produtivo não possuem, necessariamente, maiores conteúdos de nutrientes em seus compartimentos do que populações com menores potenciais produtivos. Apesar da produtividade ter influência direta nos padrões de alocação de nutrientes, fatores genéticos, silviculturais e edafoclimáticos também interferem na alocação de nutrientes e na quantidade de nutrientes assimilada.

Ao se comparar o conteúdo de nitrogênio no tronco entre as diferentes classes de produtividade, constata-se que populações mais produtivas possuem também, maior conteúdo de nitrogênio no tronco. Este resultado coincidiu com os resultados obtidos por Santana et al. (2008), que analisaram as variações nos conteúdos de macronutrientes para a produção de uma mesma quantidade de biomassa (100 t ha^{-1}) em diferentes condições de sítio. Concluiu-se que o N foi o nutriente que apresentou menor variação de conteúdo entre diferentes condições de sítio. Esta constatação explica o conteúdo de N no tronco ter seguido perfeitamente a ordem dos potenciais produtivos, sendo menos influenciado pelo sítio e mais influenciado pela produtividade e pela idade (Figura 5).

As curvas de conteúdo de N no tronco tendem a estabilizarem-se antes da idade de 6 anos. Percebe-se uma leve tendência de estabilização mais precoce em classes mais produtivas. A classe central, 50 a 60 de produtividade, possui a estabilização tardia, aos 9 anos. Na parte aérea, nota-se que, de maneira geral, as populações centrais levam mais tempo para estabilizarem o conteúdo de N, que acontece por volta dos 9 anos de idade. A mesma tendência de estabilização mais rápida em classes mais produtivas é observada na parte aérea (Figura 6).

Percebe-se também que a demanda de N na parte aérea é suprida antes da demanda de N no tronco.

Figura 5 - Conteúdo de N no tronco em função da idade, nas 10 classes de produtividade

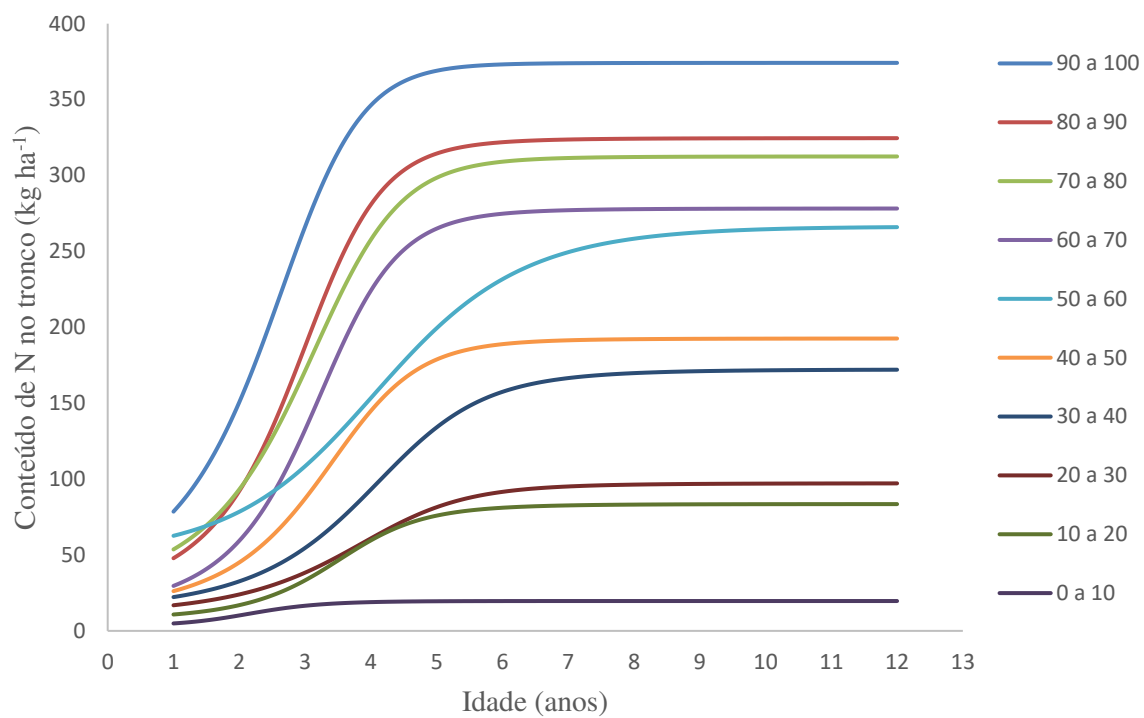
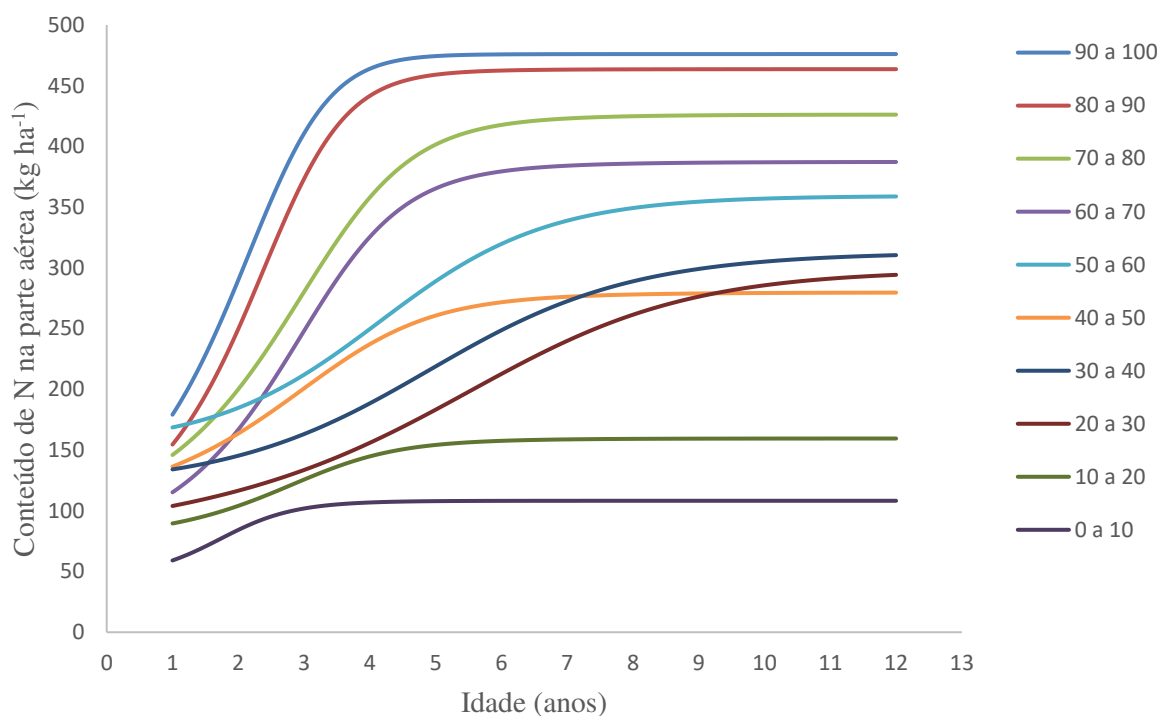


Figura 6 - Conteúdo de N na parte aérea em função da idade, nas 10 classes de produtividade



O conteúdo de P no tronco também sofreu maior influência da produtividade e da idade, dentre outros fatores. Quanto mais produtiva uma população, maior o conteúdo de P no tronco, com exceção das duas classes superiores, que se inverteram (Figura 7). Na parte aérea, as classes centrais (50 a 60 e 30 a 40) ultrapassam o conteúdo de P das classes subsequentes e possuem a estabilização das curvas em idades mais tardias que as curvas de conteúdo de P no tronco. Nas outras classes, percebe-se o contrário, o conteúdo de P no tronco estabiliza-se depois da estabilização de P na parte aérea (Figura 8).

Figura 7 - Conteúdo de P no tronco em função da idade, nas 10 classes de produtividade

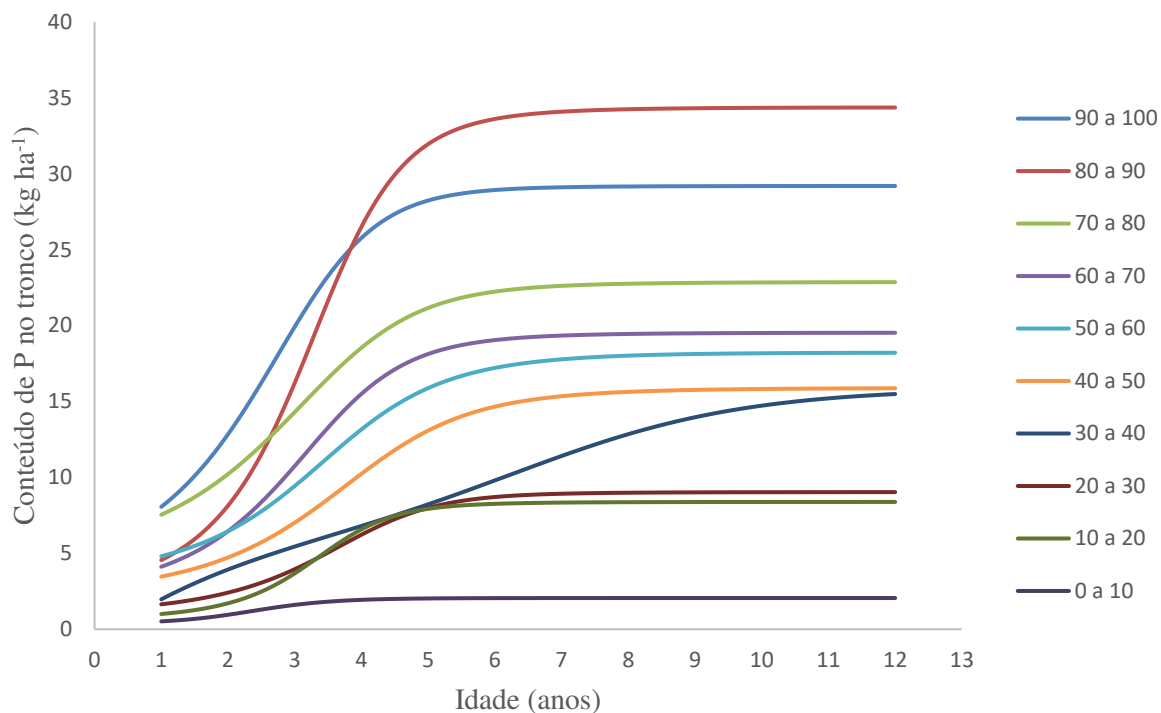
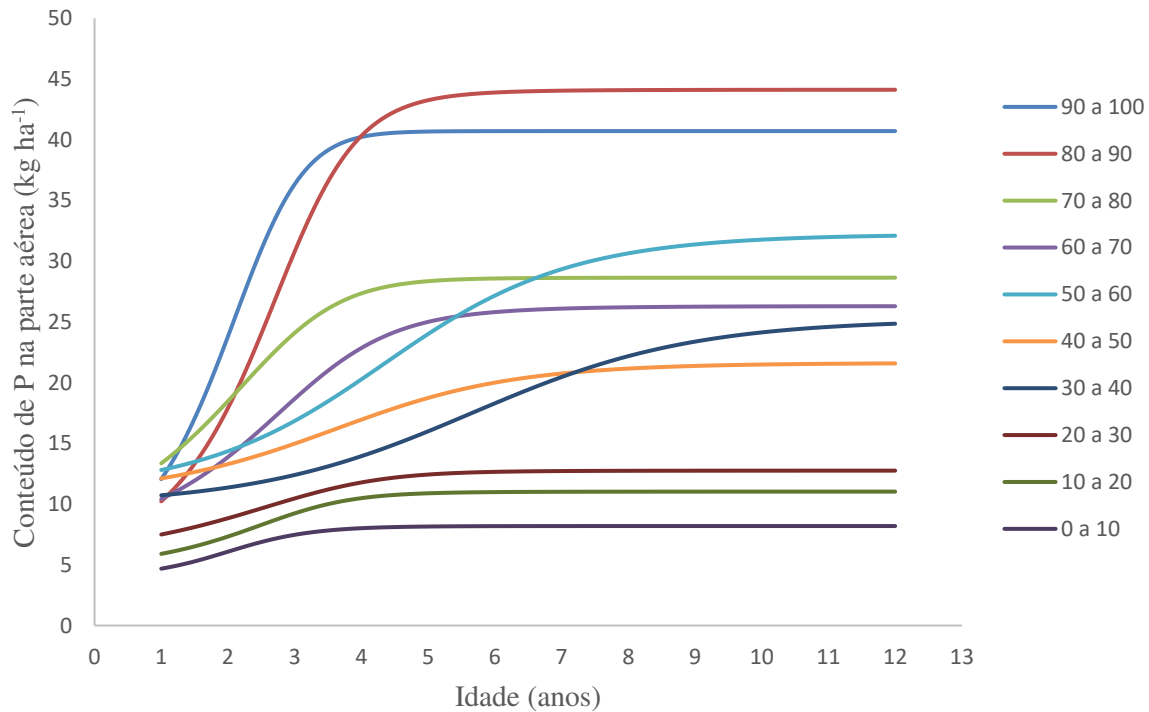


Figura 8 - Conteúdo de P na parte aérea em função da idade, nas 10 classes de produtividade



Os padrões de acumulação de K no tronco e na parte aérea foram bem semelhantes entre si (Figuras 9 e 10). As curvas de acumulação não seguiram a ordem perfeita dos potenciais produtivos. A demanda de K na parte aérea é atendida em idades anteriores à de K no tronco. As classes centrais, 50 a 60 e 60 a 70, são as que levam mais tempo para o suprimento da demanda deste nutriente, tanto no tronco, quanto na parte aérea.

Figura 9 - Conteúdo de K no tronco em função da idade, nas 10 classes de produtividade

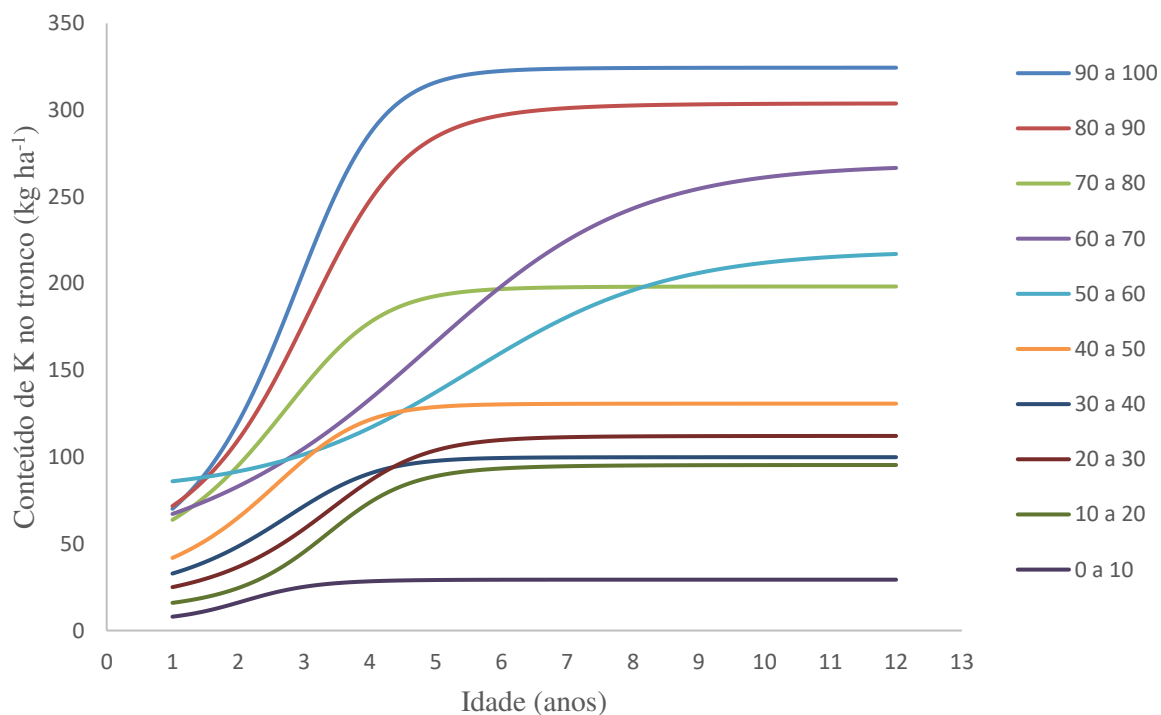
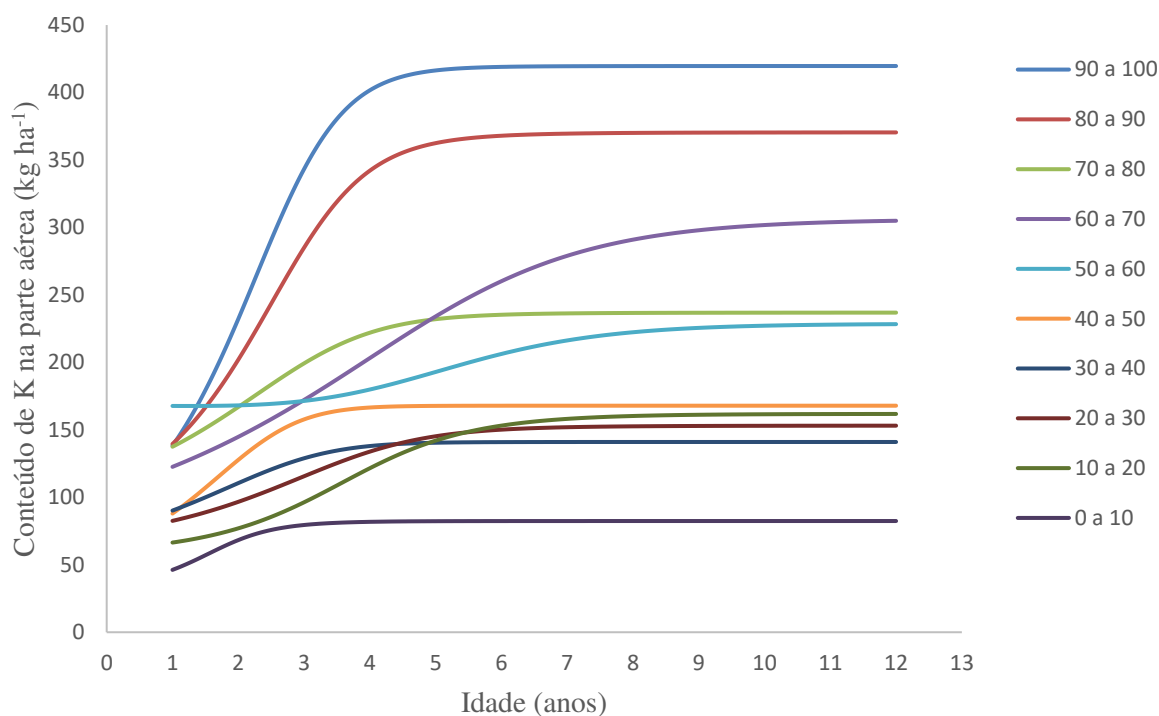


Figura 10 - Conteúdo de K na parte aérea em função da idade, nas 10 classes de produtividade



As curvas de acumulação de Ca, tanto no tronco quanto na parte aérea, são mais deslocadas para direita, levando mais tempo para alcançarem a estabilização (Figuras 11 e 12). O Ca, além de ser um elemento estrutural e fazer parte da lamela média da membrana celular, está altamente concentrado na casca, por ser um elemento praticamente imóvel no floema. Assim, a acumulação deste nutriente se dá à medida que ocorre a formação de madeira, aumentando proporcionalmente ao conteúdo de carbono no tronco. Por ser pouco móvel no floema, a demanda deste nutriente não é suprida por ciclagem bioquímica, como constatado também por Zaia e Gama-Rodrigues (2004), assim, a acumulação de Ca no tronco e na parte aérea tende a se estabilizar na mesma idade.

Figura 11 - Conteúdo de Ca no tronco em função da idade, nas 10 classes de produtividade

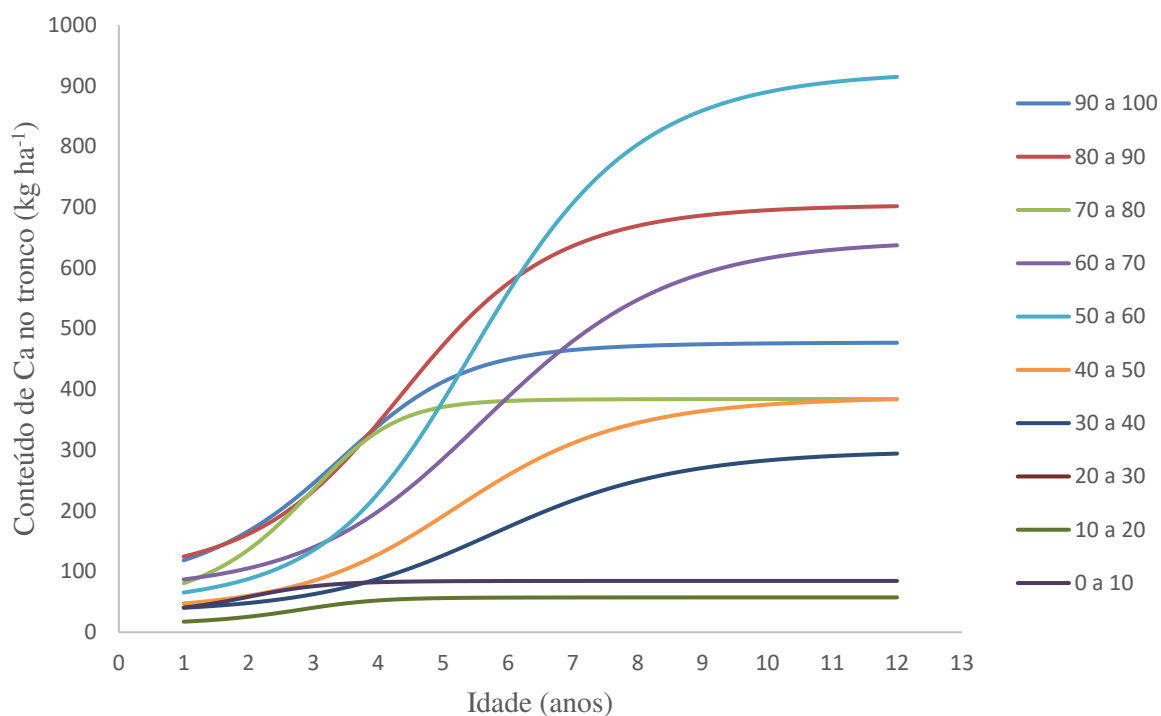
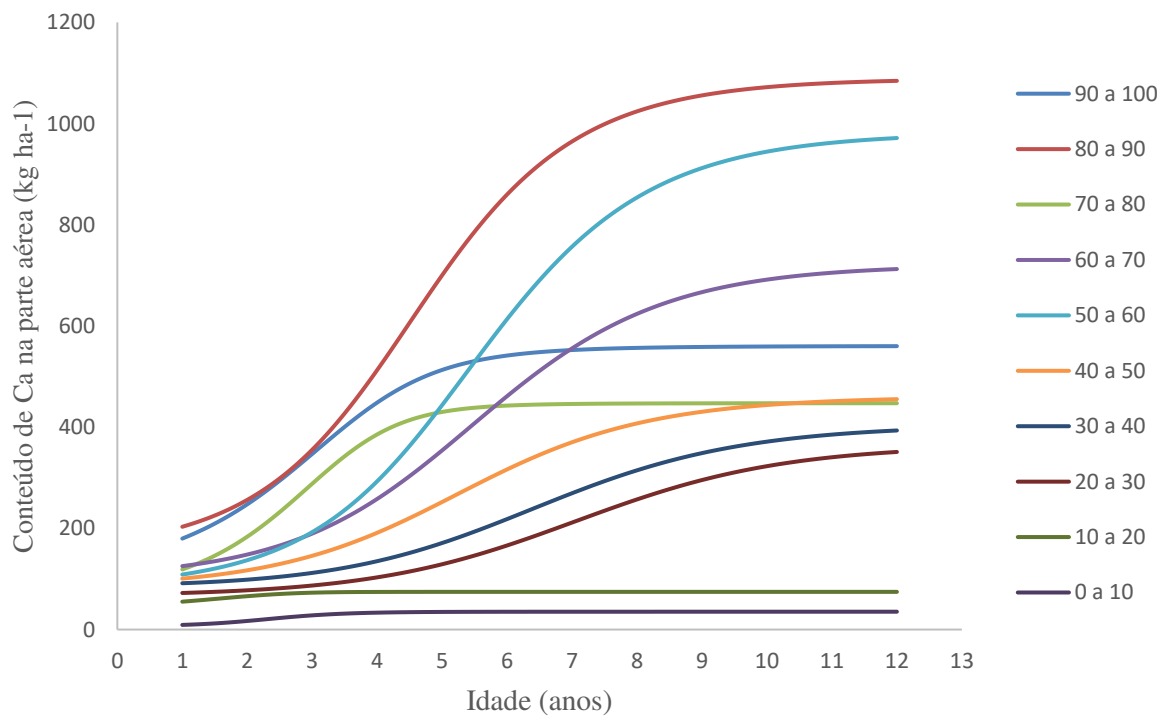


Figura 12 - Conteúdo de Ca na parte aérea em função da idade, nas 10 classes de produtividade



De maneira semelhante aos outros nutrientes, a demanda de Mg, tanto no tronco quanto na parte aérea, é suprida mais cedo em classes de produtividade superiores. O suprimento ocorre, normalmente, em idades mais precoces para a parte aérea do que para o tronco, com exceção das classes centrais (20 a 30, 30 a 40 e 40 a 50). Percebe-se uma grande influência da produtividade no conteúdo de Mg absorvido pelas plantas, principalmente na alocação deste nutriente no tronco (Figuras 13 e 14).

Figura 13 - Conteúdo de Mg no tronco em função da idade, nas 10 classes de produtividade

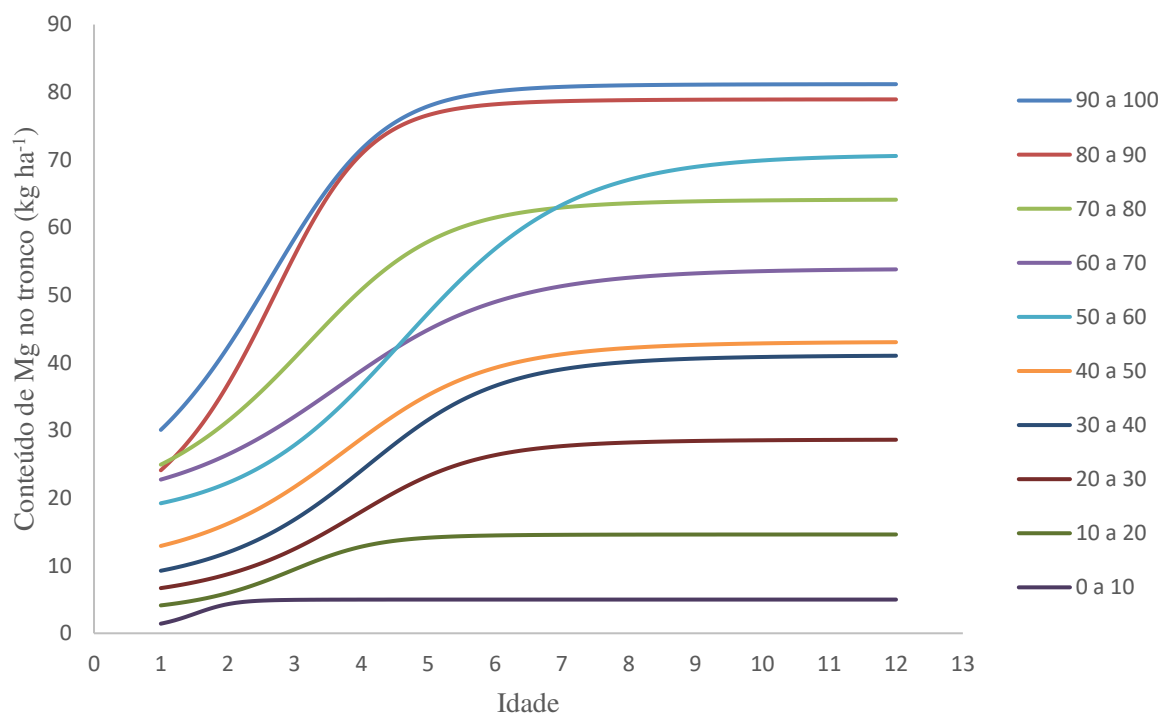
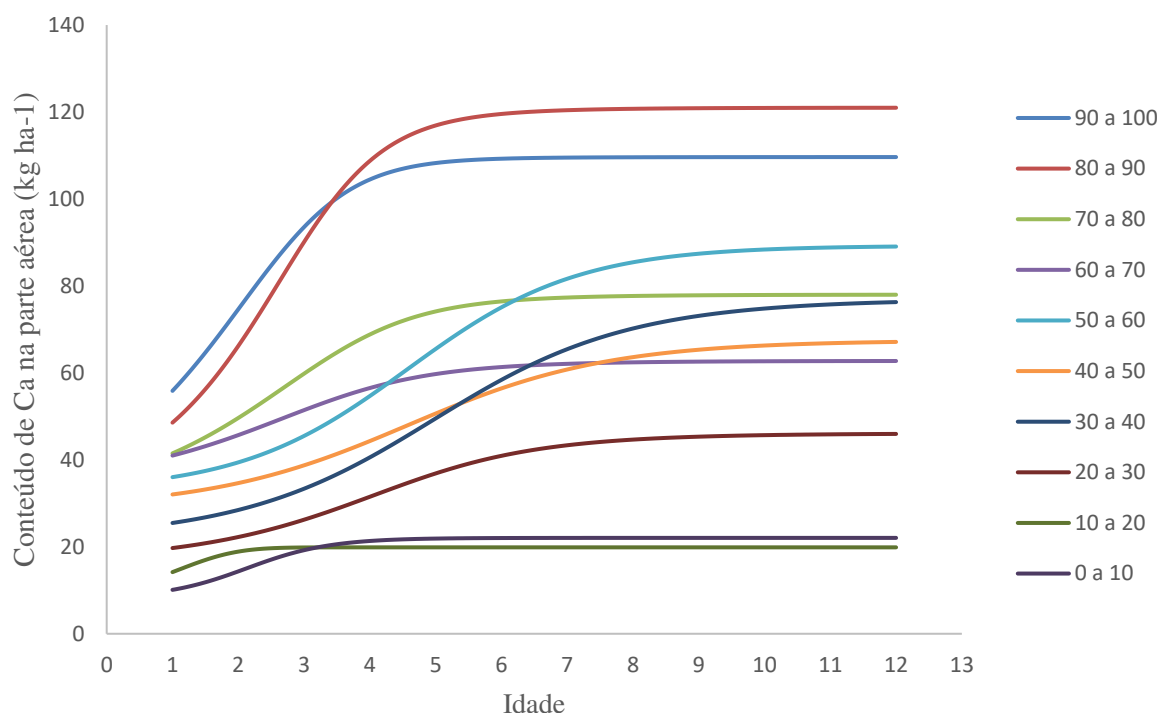


Figura 14 - Conteúdo de Ca na parte aérea em função da idade, nas 10 classes de produtividade



A produtividade teve mais influência sobre o conteúdo de todos os nutrientes no tronco do que na parte aérea, seguindo a ideia de que quanto maior a produção de madeira, maior a demanda por nutrientes no tronco. As situações em que ocorre a estabilização de nutrientes na parte aérea em idades anteriores à no tronco indicam que a demanda do tronco por nutrientes é suprida pela ciclagem bioquímica. Quando ocorre o contrário, isto é, quando a curva de conteúdo de nutrientes no tronco se estabiliza antes da curva de nutrientes na parte aérea, assume-se que os nutrientes absorvidos após a estabilização de seus conteúdos no tronco são direcionados para os outros compartimentos das árvores, podendo retornar ao solo por ciclagem biogeoquímica, caso os resíduos sejam deixados no campo.

Alocação de nutrientes

A alocação de nutrientes foi calculada para a LFS, por não haver fatores limitantes à produtividade para esta população, assumindo-se, então, que problemas como disponibilidade de água, tipo de solo, clima, dentre outros, não influenciaram nos padrões de alocação. Portanto, os resultados obtidos são os esperados em situações em que as necessidades das plantas são plenamente atendidas (Tabela 16).

Maior porcentagem de N foi alocada na copa até a idade de 03 anos. A partir daí, ele foi direcionado, prioritariamente, ao tronco, que abriga 60% do N da planta, dos quais 30% estão presente na casca e 60% no lenho.

A maior porcentagem de P se encontra na copa até 02 anos de idade, quando começa a diminuir, chegando a 33%. A alocação de P no tronco cresceu desde 01 ano de idade, chegando a 51%, dos quais 50% se encontram no lenho e 50% na casca. A porcentagem de P presente na raiz reduz, sutilmente, com a idade.

O tronco foi o compartimento com a maior proporção de K durante todo o ciclo. O K na copa cai drasticamente ao longo do plantio devido às ciclagens bioquímicas e biogeoquímicas, se estabilizando aos 10 anos de idade, possuindo 16% de K. Este nutriente, em particular, possui alta velocidade de ciclagem, sendo facilmente desprendidos dos tecidos, tornando-se disponível às plantas em um intervalo de tempo muito curto (Andrade, 1997, Neves, 2000, Cavalcante et al., 2020). A porcentagem de K alocado no tronco aumenta até a idade de 10 anos, quando alcança 71% no K total, sendo 66% alocados no lenho e 44% na casca. A porcentagem de K nas raízes se mantém constante ao longo da rotação.

O Ca está, em sua maior proporção, localizado na casca. O seu conteúdo no tronco aumenta consideravelmente com a idade, chegando a 88%, que se divide em 58% localizados na casca e 42% no lenho. O Ca na copa cai drasticamente com a idade, chegando a somente 6%. O Ca nas raízes se reduz à metade da idade inicial à idade final. Apesar de não ser muito aproveitado por ciclagem bioquímica, devido a sua reduzida mobilidade no floema, o Ca pode ser aproveitado em futuras plantações por ciclagem biogeoquímica (Zaia e Gama-Rodrigues, 2004).

Assim como o Ca, a maior porcentagem de Mg se encontra no tronco, mais especificamente na casca. A alocação de Mg no tronco chega à 75%; desses, 64% estão na casca e 36% no lenho. A alocação deste nutriente na copa cai drasticamente com a idade, se estabilizando em 19%. O Mg alocado nas raízes diminui sutilmente com a idade, se estabilizando em 7%.

Tabela 16 - Alocação (%) de nutrientes nos compartimentos das árvores para a LFS

(Continua)

	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
N	1	48	29	21	8	23
	2	45	33	25	9	22
	3	40	39	30	10	21

Tabela 16 - Alocação (%) de nutrientes nos compartimentos das árvores para a LFS

(Continuação)

	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
N	4	33	47	36	11	21
	5	26	53	41	12	20
	6	23	57	44	13	20
	7	21	59	45	14	20
	8	21	59	46	14	20
	9	21	60	46	14	19
	10	21	60	46	14	19
	11	21	60	46	14	19
	12	21	60	46	14	19
	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
P	1	47	30	20	10	24
	2	43	36	24	12	21
	3	37	44	30	14	20
	4	30	51	34	17	19
	5	28	54	34	20	18
	6	29	54	31	23	17
	7	30	53	29	24	17
	8	32	52	27	24	17
	9	32	51	27	25	16
	10	33	51	26	25	16
	11	33	51	26	25	16
	12	33	51	26	25	15
	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
K	1	43	44	30	14	13
	2	40	47	30	17	13
	3	36	51	31	20	13
	4	31	56	32	24	13
	5	26	61	35	26	13
	6	22	65	39	26	13
	7	19	68	42	25	13
	8	18	69	45	25	13
	9	17	70	46	24	13
	10	16	71	47	24	13
	11	16	71	47	24	13
	12	16	71	47	24	13

Tabela 16 - Alocação (%) de nutrientes nos compartimentos das árvores para a LFS

(Conclusão)						
	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
Ca	1	34	51	8	42	15
	2	32	56	12	44	12
	3	28	62	17	44	11
	4	21	69	24	45	10
	5	15	76	31	45	9
	6	10	82	35	47	9
	7	7	84	36	48	8
	8	6	86	37	49	8
	9	6	87	37	50	7
	10	6	87	37	50	7
	11	6	87	37	50	7
	12	6	88	37	51	7
	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
Mg	1	41	48	18	29	11
	2	39	51	19	31	10
	3	36	55	21	34	9
	4	32	60	23	37	8
	5	27	65	24	41	8
	6	23	69	25	44	8
	7	21	71	26	46	8
	Idade	Copa	Tronco	Lenho	Casca	Raiz
Mg	8	20	73	26	47	7
	9	19	74	26	48	7
	10	19	74	26	48	7
	11	19	74	26	48	7
	12	19	75	26	48	7

A colheita florestal ocasiona grande exportação de nutrientes do sistema solo-plantios, bem como pode ter impactos significativos na compactação do solo, principalmente se feita com o solo com elevado teor de água, e, assim, fora da faixa de friabilidade, se considerado o baldeio. A fim de reduzir esses impactos, é importante que os resíduos sejam deixados no campo, pois além de conferirem barreira física, reduzindo a compactação causada pelas máquinas de colheita, a exportação de nutrientes é reduzida e ocorre maior estabilização de carbono na fração humina da matéria orgânica do solo (Demolinari, 2008).

Se todos os resíduos fossem deixados no campo no momento da colheita, além de haver grandes ganhos em relação à estrutura física do solo, contribuindo para a sua conservação, seria de grande contribuição econômica no que diz respeito a custos com fertilizantes, pois grande porcentagem dos nutrientes retornaria ao solo, tornando-se disponíveis para as plantas à medida que os resíduos sofressem ações de intempéries e de organismos, se decompondo e liberando os nutrientes. Aproximadamente 54% de N, 74% de P, 53% de K, 63% de Ca e 74% de Mg retornariam ao solo por meio dos resíduos.

Outro ponto importante é a economia de nutrientes obtida ao se conduzir a talhadia, devido ao fato de as raízes já estarem formadas. Nesse caso, seria economizado 19% de N, 15% de P, 13% de K e 7% de Ca e Mg.

3.1.3 Eficiência de uso de nutrientes

O CUB compartimentalizado e o CUB integralizado aumentam com a idade, como apresentado nas tabelas de 17 a 26, com exceção do CUB compartimentalizado de Ca, devido ao fato de o conteúdo de Ca no tronco aumentar proporcionalmente à biomassa de tronco.

O aumento dos CUBs indica que os nutrientes são utilizados de forma mais eficiente em idades mais avançadas. A eficiência de utilização de nutrientes é importante para manter o potencial produtivo do sítio, pois otimiza a ciclagem de nutrientes, garantindo a sustentabilidade em longo prazo e reduzindo a quantidade de insumos necessários para a rotação atual e para as futuras. Quanto maior o valor de CUB, menor a quantidade de nutrientes necessária para a síntese de uma mesma quantidade de biomassa.

Segundo Valadares (2015), o CUB é influenciado pelo clima, pela textura do solo, pela densidade de plantio e também por fatores genéticos, motivo pelo qual os CUBs não seguem perfeitamente a ordem das classes de produtividade. Das variáveis que influenciam a eficiência de uso e a alocação de nutrientes, destaca-se a textura dos solos por ter influência sobre a retenção e disponibilidade de água, o estabelecimento da matéria orgânica, a CTC, e por se relacionar diretamente com a disponibilidade de todos os nutrientes e com a capacidade de absorção das plantas.

Os padrões de variação dos valores de CUB e da alocação de nutrientes nas diferentes partes da planta são de extrema importância nos modelos de balanço nutricional, pois possibilitam o cálculo das quantidades de nutrientes extraídas e exportadas pelas árvores.

O CUB integralizado traz uma concepção da eficiência nutricional geral da planta para a produção do tronco, o que faz sentido, já que as plantas necessitam de nutrientes em todos os seus compartimentos para produzirem o tronco. No entanto, é interessante avaliar os dois tipos de CUB, uma vez que eles se complementam.

Ao se pensar no balanço de nutrientes, nas ocasiões em que os resíduos são deixados no campo, é importante ter um maior valor de CUB compartimentalizado, mesmo que os valores de CUB integralizado sejam baixos, pois por mais que a árvore absorva muitos nutrientes ao longo de sua rotação, os altos valores de CUB compartimentalizados indicam que a madeira retirada não será tão rica em nutrientes, visto que estes estarão em outros compartimentos da planta e retornarão, eventualmente, ao solo. O contrário acontece se uma população possuir um alto CUB integralizado e baixo CUB compartimentalizado, indicando que, por mais que as árvores necessitem de um baixo conteúdo de nutrientes para a sua síntese, a alocação de nutrientes no tronco é grande, ocasionando a retirada de uma madeira rica em nutrientes no momento de colheita, característica indesejável dos pontos de vista ambiental e econômico.

É desejável que ambos, o CUB compartimentalizado e o CUB integralizado, sejam altos. Assim, os plantios necessitam de um baixo conteúdo de nutrientes em seus compartimentos para a produção de madeira e a retirada de nutrientes do campo é baixa.

Tabela 17 - CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹) de N em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	644,9	717,0	611,4	918,9	334,8	691,6	652,9	613,9	532,7	498,4
2	537,6	665,5	586,8	798,9	511,5	688,6	754,2	746,6	726,0	651,0
3	463,0	542,0	505,9	582,1	646,0	578,7	729,1	771,1	716,8	635,7
4	507,7	540,2	496,3	509,7	701,0	522,6	648,3	748,1	663,7	636,4
5	630,3	641,9	581,4	574,7	718,9	579,8	628,4	790,4	722,2	637,9
6	764,9	752,2	699,5	670,1	732,7	684,1	683,9	904,9	808,0	638,3
7	877,6	831,6	803,1	745,4	744,4	778,1	763,8	1030,9	864,4	638,4
8	959,5	879,8	877,6	793,8	752,0	844,3	832,0	1129,9	893,1	638,4
9	1013,9	906,4	925,7	821,9	756,1	885,5	879,4	1195,5	906,2	638,4
10	1048,0	920,5	954,7	837,4	758,2	909,6	908,9	1235,2	911,9	638,4
11	1068,6	927,8	971,5	845,7	759,2	923,1	926,4	1258,0	914,3	638,4
12	1080,8	931,5	981,1	850,0	759,7	930,5	936,4	1270,7	915,4	638,4

Tabela 18 - CUB integralizado (kg kg⁻¹) de N em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	218,8	171,7	173,9	182,8	96,2	102,7	83,8	77,1	49,6	31,9
2	218,9	192,5	214,3	222,8	170,3	148,8	132,7	120,5	92,7	61,6
3	237,0	214,9	244,1	245,4	261,0	198,2	192,7	174,8	149,9	81,5
4	300,7	272,7	283,6	278,6	341,8	253,4	254,2	231,9	216,9	89,6
5	390,7	350,4	344,5	332,2	395,3	316,8	306,7	280,1	283,4	91,9
6	479,7	418,6	413,8	388,0	424,5	380,2	346,3	311,6	332,5	92,7
7	552,7	465,9	474,1	431,1	439,3	432,3	374,2	327,8	360,8	93,0
8	605,9	494,5	518,1	459,2	446,9	468,7	392,9	334,6	374,9	93,2
9	641,6	510,7	547,0	475,9	450,9	491,8	404,9	337,3	381,7	93,4
10	664,4	519,7	564,9	485,5	453,2	505,6	412,4	338,4	385,0	93,6
11	678,6	524,7	575,6	491,0	454,6	513,7	417,0	339,0	386,7	93,7
12	687,3	527,6	582,1	494,2	455,6	518,4	419,8	339,4	387,7	93,9

Tabela 19 - CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹) de P em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	6285,2	7531,6	4349,2	6614,0	4359,7	5221,4	7387,7	6306,4	5728,3	4693,0
2	6307,1	7533,4	5350,9	7341,6	6225,4	6571,3	6261,1	7435,1	7204,1	6954,8
3	6186,0	6261,5	6057,8	7173,2	7428,0	7182,3	7313,7	7479,9	6485,8	6564,5
4	6819,8	5722,7	6897,2	7368,8	8169,1	7396,6	8870,4	7321,2	6018,5	6227,6
5	8235,4	6315,7	8200,2	8400,2	9022,5	7922,4	10234,6	8057,4	6912,1	6137,9
6	9865,4	7203,3	9721,1	9667,5	9859,4	8812,8	10986,9	9514,7	7934,7	6117,7
7	11272,2	7895,9	11059,9	10678,8	10444,7	9704,0	11146,3	10988,0	8564,5	6113,2
8	12307,4	8327,0	12037,3	11337,0	10778,7	10374,8	10994,2	12106,7	8876,7	6112,3
9	12998,4	8568,5	12672,9	11722,1	10950,5	10807,6	10774,0	12837,6	9018,0	6112,1
10	13432,2	8696,8	13058,6	11935,1	11034,5	11064,3	10593,4	13276,6	9079,6	6112,0
11	13694,5	8763,3	13283,2	12049,3	11074,6	11209,7	10471,8	13528,0	9106,0	6112,0
12	13849,7	8797,2	13411,1	12109,7	11093,5	11290,0	10397,3	13668,2	9117,3	6112,0

Tabela 20 - CUB integralizado (kg kg⁻¹) de P em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	3215,5	2565,9	1878,5	1997,8	1278,9	1143,1	1036,2	1056,7	744,4	398,6
2	2688,0	2705,6	2338,8	2700,9	2239,2	1846,3	1711,5	1602,3	1327,6	860,1
3	2726,9	2651,8	2890,9	3321,0	3334,1	2706,0	2582,4	2271,7	2076,5	1132,3
4	3554,5	3060,6	3803,9	4066,8	4255,9	3633,1	3519,6	3146,3	3067,6	1223,4
5	4692,1	3829,0	5022,2	4998,3	4876,0	4537,9	4321,4	4249,4	4131,3	1252,6
6	5793,1	4558,4	6250,8	5895,2	5254,8	5337,7	4863,0	5410,3	4928,1	1265,4
7	6697,5	5078,8	7261,8	6577,4	5475,6	5964,0	5165,1	6405,7	5389,6	1273,4
8	7360,7	5401,5	7986,8	7024,7	5600,9	6400,8	5317,1	7132,3	5625,6	1279,6
9	7810,8	5589,2	8463,1	7296,1	5673,1	6681,4	5394,3	7609,2	5743,4	1284,9
10	8102,6	5697,0	8761,5	7456,6	5717,1	6854,2	5437,6	7904,2	5805,3	1289,5
11	8288,2	5760,6	8945,5	7552,6	5746,6	6960,0	5465,8	8082,7	5841,5	1293,6
12	8406,7	5800,3	9060,0	7612,4	5768,4	7026,3	5486,6	8191,4	5865,8	1297,3

Tabela 21 - CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹) de K em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	722,1	478,2	514,2	405,2	246,5	432,5	442,3	414,1	360,3	305,9
2	674,4	557,6	574,6	570,3	440,9	476,6	507,4	488,6	502,2	410,6
3	592,9	571,9	615,9	734,2	688,6	512,7	555,7	504,8	526,6	417,5
4	613,7	612,1	720,0	856,5	910,0	623,3	666,5	528,0	535,7	424,8
5	736,0	709,6	900,2	916,4	1038,4	804,4	861,3	619,9	616,2	427,5
6	884,9	815,3	1098,3	927,9	1086,4	991,2	1082,7	754,4	701,6	428,1
7	1013,1	894,0	1264,4	918,7	1098,1	1139,8	1274,4	880,0	754,5	428,3
8	1107,1	942,5	1382,7	906,5	1099,3	1240,7	1414,4	972,9	780,9	428,3
9	1169,6	969,6	1458,6	897,4	1098,6	1302,8	1505,8	1032,9	792,9	428,3
10	1208,8	984,0	1504,4	891,8	1098,0	1338,9	1561,5	1068,8	798,1	428,3
11	1232,5	991,5	1531,0	888,7	1097,6	1359,0	1593,9	1089,3	800,3	428,3
12	1246,5	995,3	1546,2	887,0	1097,4	1370,1	1612,3	1100,7	801,3	428,3

Tabela 22 - CUB integralizado (kg kg⁻¹) de K em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

(Continua)										
Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	324,1	213,8	207,5	193,2	108,8	179,0	140,1	109,1	75,2	45,9
2	307,0	264,0	284,9	284,8	207,6	211,5	193,7	161,2	139,1	84,3
3	313,3	309,9	378,0	389,5	355,4	277,9	268,6	222,4	215,4	115,1

Tabela 22 - CUB integralizado (kg kg⁻¹) de K em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	(Conclusão)									
	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
4	380,5	385,6	500,9	488,9	519,7	395,3	380,2	296,0	283,0	128,1
5	485,6	484,2	650,4	565,8	646,1	537,2	521,5	385,5	335,8	131,5
6	592,3	572,2	799,0	615,5	715,6	669,3	664,6	480,0	372,2	132,3
7	680,3	633,5	920,7	643,9	746,8	771,4	784,5	561,3	393,0	132,5
8	744,0	670,3	1006,8	659,1	759,8	840,2	871,3	620,4	403,1	132,5
9	786,2	690,6	1062,0	667,1	765,4	882,5	927,8	658,4	407,7	132,5
10	812,6	701,4	1095,3	671,2	767,9	906,9	962,1	681,1	409,7	132,5
11	828,6	706,9	1114,7	673,3	769,0	920,6	982,1	694,1	410,6	132,5
12	838,0	709,8	1125,7	674,4	769,5	928,1	993,5	701,3	410,9	132,5

Tabela 23 - CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹) de Ca em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	427,9	275,2	406,6	313,0	274,0	382,2	361,0	327,7	331,0	265,2
2	486,1	378,6	401,9	449,8	411,2	516,5	511,2	501,7	482,4	390,3
3	502,4	436,4	368,3	551,5	494,1	595,1	635,5	677,0	591,9	374,9
4	517,0	439,8	386,6	573,8	482,8	590,3	686,3	769,2	755,4	360,9
5	564,0	426,8	467,8	532,6	428,2	541,6	666,4	725,3	975,6	357,2
6	635,3	421,6	567,6	475,6	383,2	499,8	621,9	604,2	1149,1	356,4
7	706,0	423,2	653,0	431,0	357,6	478,6	586,6	506,6	1248,1	356,2
8	761,6	426,2	714,0	402,9	344,8	470,4	566,4	466,4	1296,2	356,2
9	800,0	428,4	753,2	386,9	338,6	467,8	556,3	462,2	1317,8	356,2
10	824,5	429,8	776,9	378,2	335,7	467,1	551,3	469,9	1327,2	356,2
11	839,4	430,5	790,6	373,5	334,3	466,9	548,8	478,1	1331,2	356,2
12	848,3	430,9	798,4	371,1	333,7	466,9	547,6	483,9	1332,9	356,2

Tabela 24- CUB integralizado (kg kg⁻¹) de Ca em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)

Idade	(Continua)									
	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	241,3	143,0	213,7	168,0	150,3	139,1	122,8	110,8	80,7	46,3
2	289,0	209,7	233,5	250,7	243,0	207,8	195,6	181,0	146,4	89,0
3	317,7	254,8	237,3	321,0	315,6	273,0	280,9	268,3	258,6	109,7
4	353,3	266,7	263,2	351,3	335,0	314,2	354,4	350,6	422,3	116,2
5	411,5	261,9	321,6	342,8	318,4	327,6	392,4	397,5	586,6	118,1

Tabela 24 - CUB integralizado (kg kg⁻¹) de Ca em função da idade (anos), nas 10 classes de produtividade (%)
(Conclusão)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
6	481,5	257,4	390,6	319,2	297,9	326,5	394,3	398,7	703,4	118,8
7	545,4	256,3	449,9	298,0	284,9	322,6	378,5	371,8	768,8	119,2
8	594,4	256,8	492,8	284,0	278,3	320,0	360,7	340,1	801,2	119,5
9	628,2	257,7	520,8	276,0	275,4	318,7	347,4	315,4	816,5	119,7
10	650,2	258,5	538,0	271,7	274,4	318,3	338,9	299,4	824,0	119,9
11	664,2	259,2	548,4	269,5	274,2	318,3	334,0	289,9	827,8	120,1
12	672,9	259,9	554,6	268,6	274,4	318,5	331,3	284,6	830,1	120,3

Tabela 25 - CUB compartimentalizado de Mg em função da idade, nas 10 classes de produtividade

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	1684,9	1423,5	1315,7	44,0	1091,2	1401,9	1572,0	1551,5	1393,0	1720,0
2	1915,9	1668,2	1744,4	1794,7	1805,8	1917,6	2059,9	2053,2	2071,9	1539,2
3	2112,0	1817,9	2127,2	2407,3	2518,5	2330,3	2369,6	2371,1	2526,1	2129,3
4	2456,3	2141,3	2518,1	2943,1	2934,9	2632,3	2508,3	2534,7	3088,8	2420,6
5	2984,5	2634,4	2996,8	3393,5	3028,9	2942,6	2668,6	2769,1	3881,1	2496,9
6	3563,3	3096,0	3518,1	3759,1	2986,5	3292,9	2944,9	3146,1	4531,1	2514,1
7	4062,2	3421,9	3974,3	4024,6	2932,6	3611,0	3259,1	3544,4	4908,2	2517,8
8	4430,6	3618,8	4309,2	4195,0	2897,7	3845,3	3521,5	3859,8	5092,2	2518,7
9	4677,1	3727,8	4528,1	4294,9	2879,0	3995,9	3704,3	4070,9	5175,2	2518,8
10	4832,1	3785,4	4661,3	4350,3	2869,7	4085,2	3819,2	4199,2	5211,2	2518,9
11	4925,9	3815,2	4739,1	4380,1	2865,2	4135,8	3887,2	4273,2	5226,7	2518,9
12	4981,4	3830,4	4783,3	4395,9	2863,1	4163,8	3926,2	4314,6	5233,2	2518,9

Tabela 26 - CUB integralizado de Mg em função da idade, nas 10 classes de produtividade
(Continua)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
1	869,4	627,2	701,9	21,7	516,9	501,6	506,2	466,5	359,8	214,6
2	1032,5	836,0	994,6	39,5	919,0	808,8	780,3	726,7	588,2	416,6
3	1220,3	1026,2	1318,3	53,1	1401,9	1184,5	1086,7	1025,9	1094,2	498,2
4	1540,3	1277,1	1701,1	64,8	1800,4	1564,2	1361,8	1324,0	1822,0	517,2
5	1971,5	1587,5	2152,4	77,0	2011,8	1881,6	1564,0	1605,5	2536,2	522,7
6	2407,6	1868,4	2609,1	90,2	2085,6	2112,5	1701,3	1868,0	3041,8	525,2
7	2770,5	2067,8	2992,3	104,3	2103,9	2266,6	1797,5	2092,5	3325,1	526,7
8	3035,9	2190,1	3269,2	118,8	2107,9	2363,7	1865,4	2260,1	3464,9	527,9
9	3214,1	2259,7	3450,3	133,6	2109,8	2422,6	1911,2	2371,7	3531,0	529,0

Tabela 26 - CUB integralizado de Mg em função da idade, nas 10 classes de produtividade
(Conclusão)

Idade	90 a 100	80 a 90	70 a 80	60 a 70	50 a 60	40 a 50	30 a 40	20 a 30	10 a 20	0 a 10
10	3327,7	2298,2	3562,1	148,5	2111,9	2457,5	1940,6	2440,8	3562,7	529,9
11	3398,1	2319,6	3629,1	163,4	2114,3	2478,3	1959,1	2481,9	3579,1	530,7
12	3441,4	2331,8	3669,1	178,5	2116,8	2491,0	1970,6	2506,2	3588,6	531,4

Um fato que ilustra o aumento do CUB com a idade e, conseqüentemente, a otimização da ciclagem bioquímica, é a diferença entre a acumulação relativa de nutrientes e de biomassa no tronco. A acumulação relativa de nutrientes no tronco precede a acumulação relativa de biomassa, com exceção do cálcio, por seu conteúdo aumentar proporcionalmente à biomassa de tronco, como já explicado anteriormente (Figuras 15 a 24).

Em idades mais avançadas, com as curvas de acumulação de nutrientes já estáveis, ainda ocorre incremento em biomassa. Assim, se uma floresta é cortada em idades anteriores à estabilização da curva de biomassa, significa que ocorre uma maior exportação de nutrientes relativa à massa de matéria seca.

A velocidade de acumulação dos nutrientes depende muito da condição de crescimento da floresta. As classes superiores em produtividade representam o modelo de uma planta que trabalha mais perto ou em seu potencial produtivo.

Figura 15 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na LFS

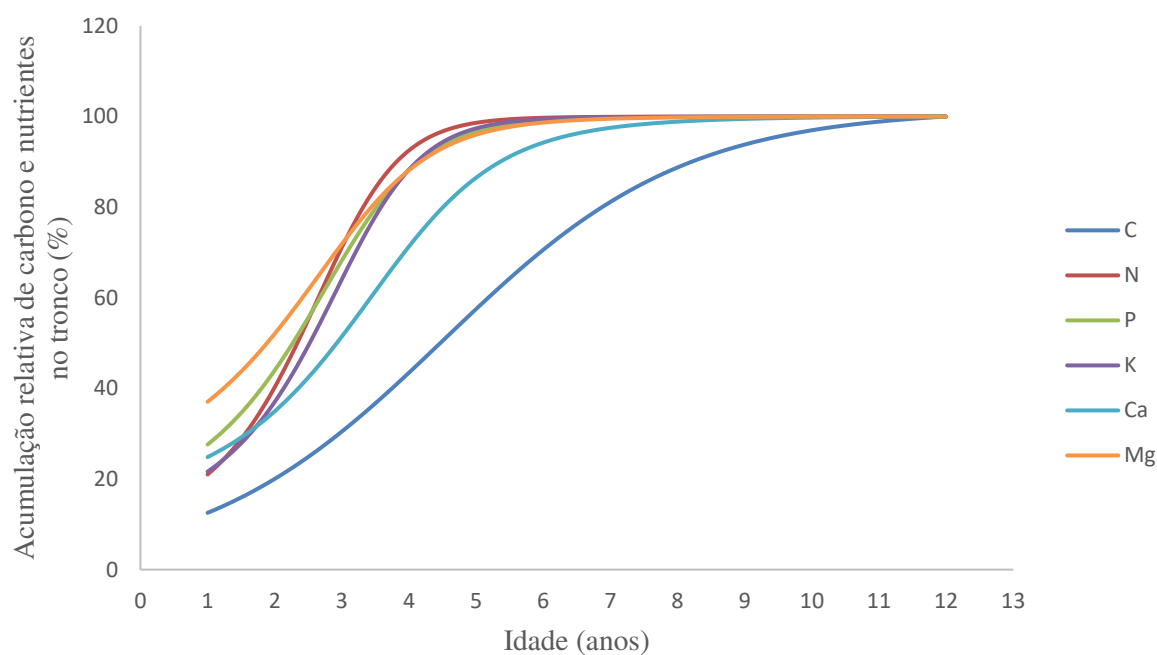


Figura 16 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 80 a 90 de produtividade

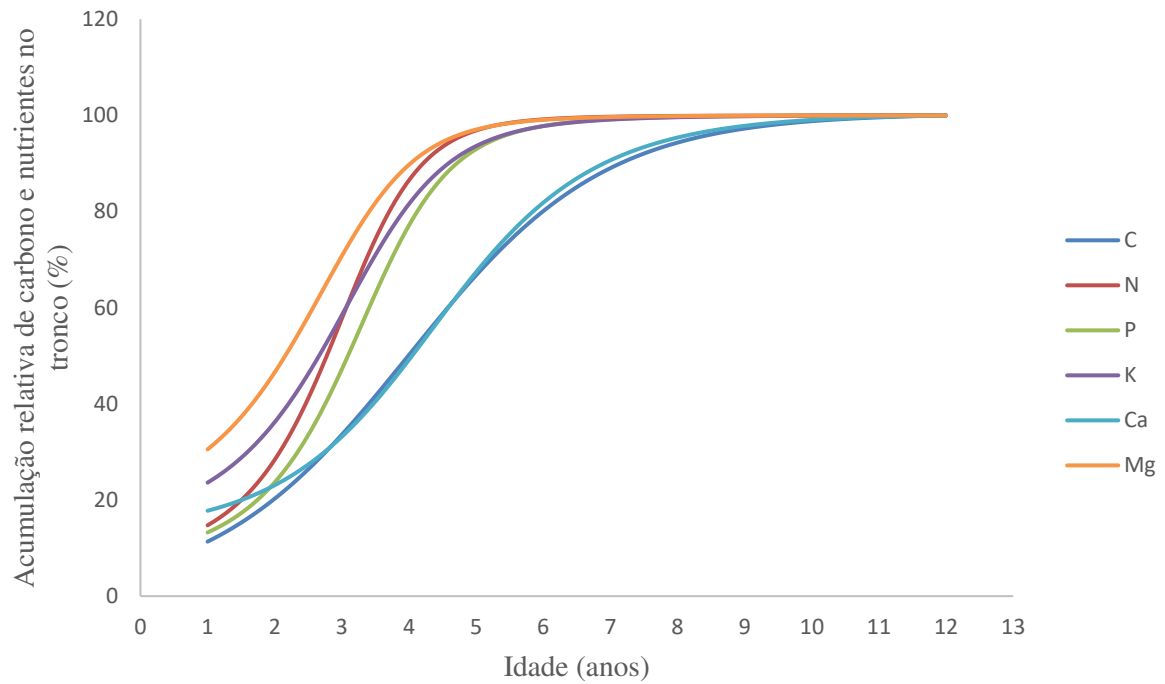


Figura 17 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 70 a 80 de produtividade

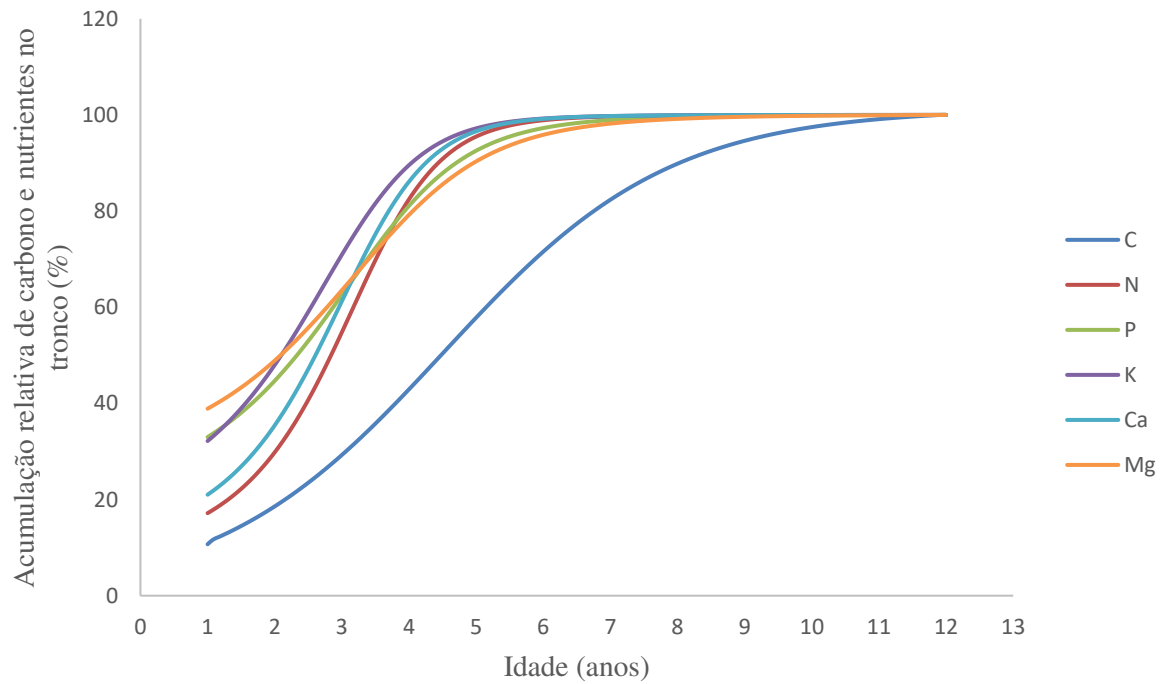


Figura 18 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 60 a 70 de produtividade

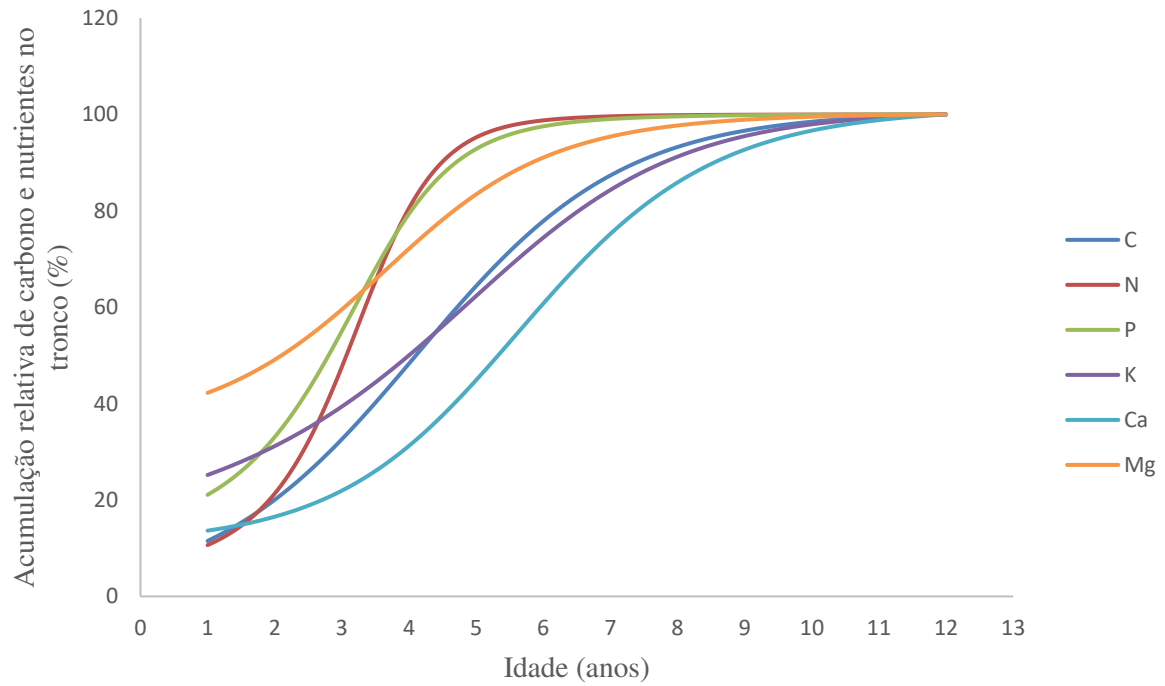


Figura 19 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 50 a 60 de produtividade

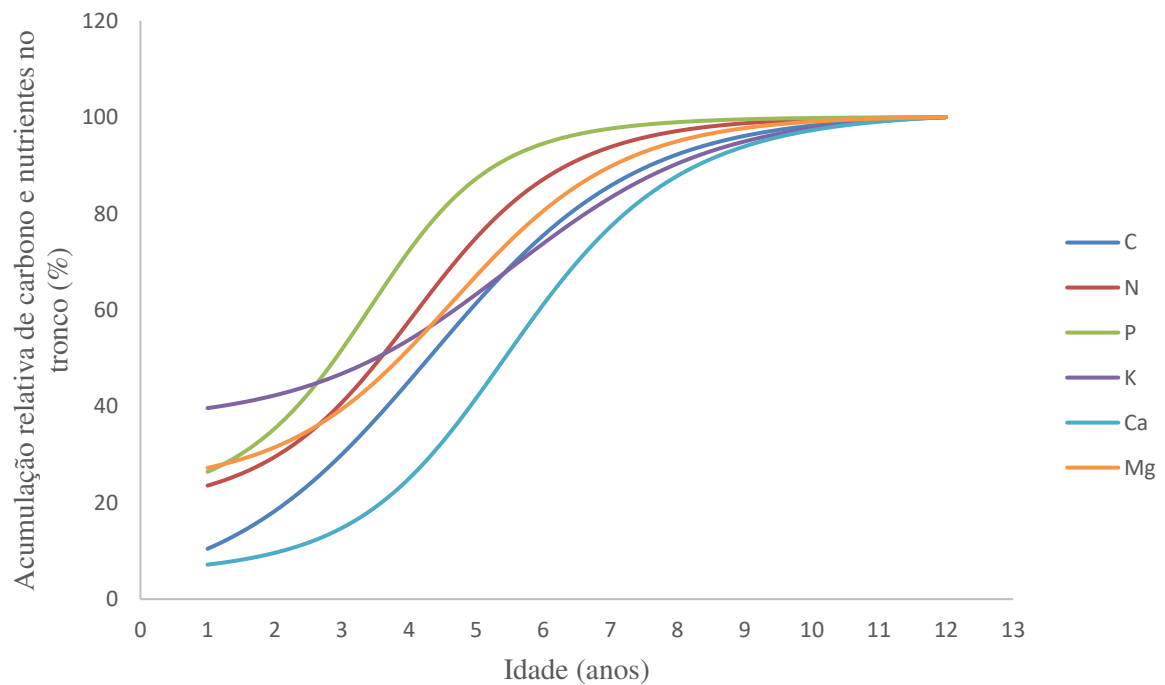


Figura 20 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 40 a 50 de produtividade

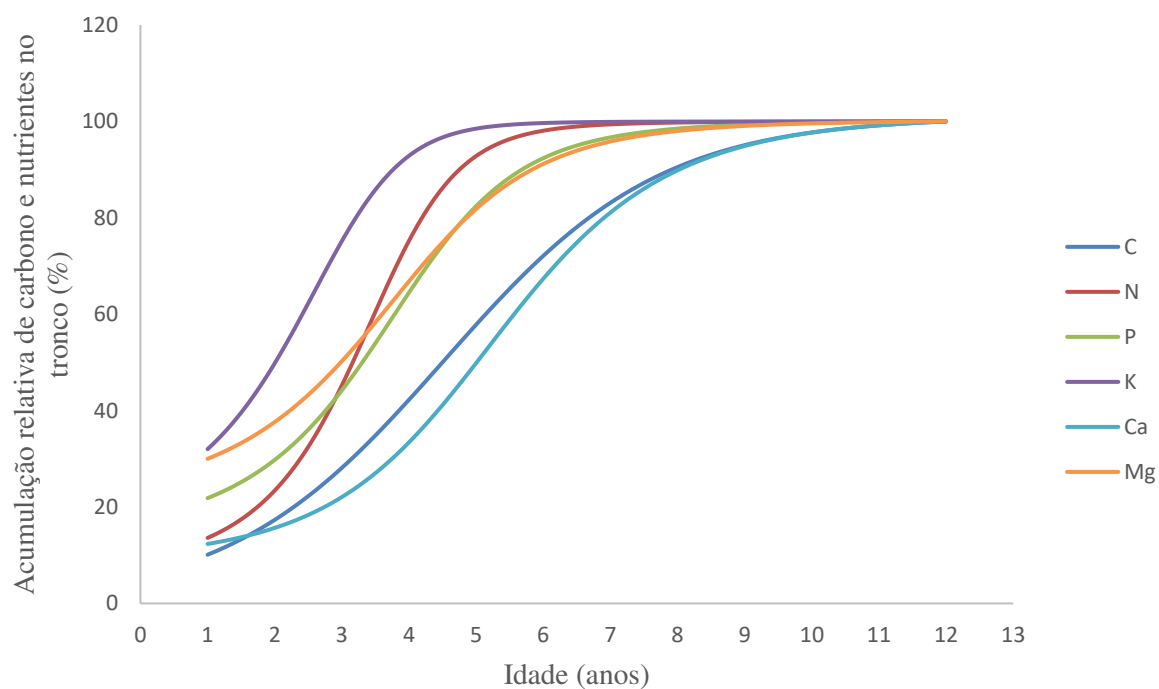


Figura 21 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 30 a 40 de produtividade

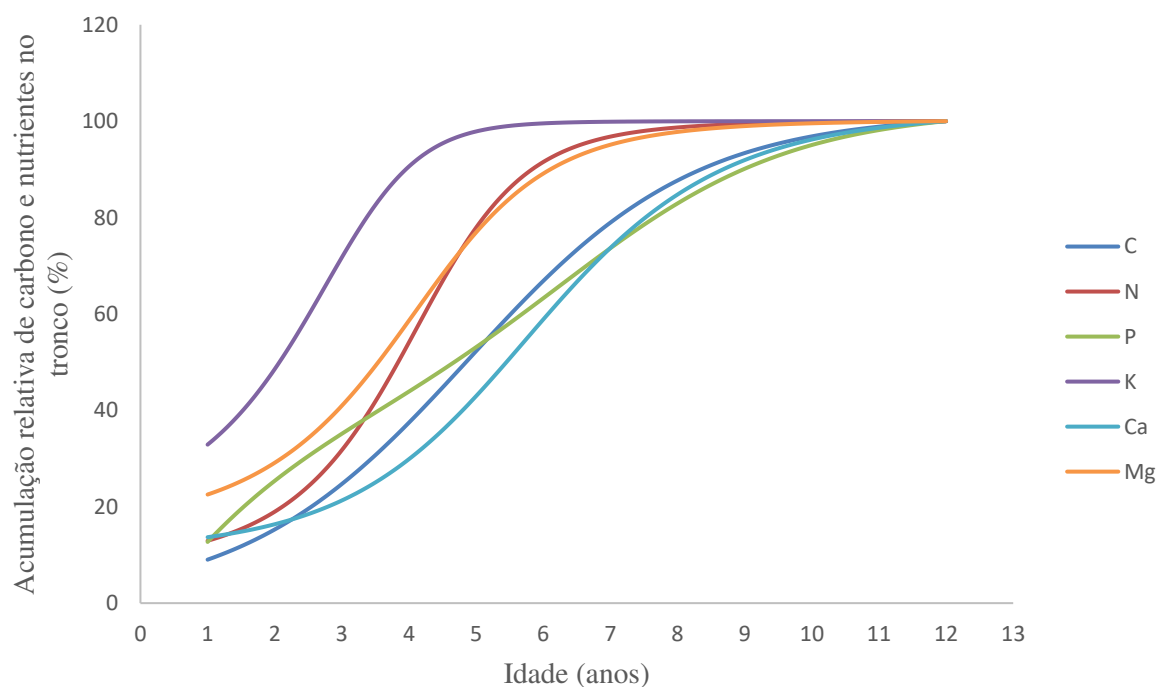


Figura 22 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 20 a 30 de produtividade

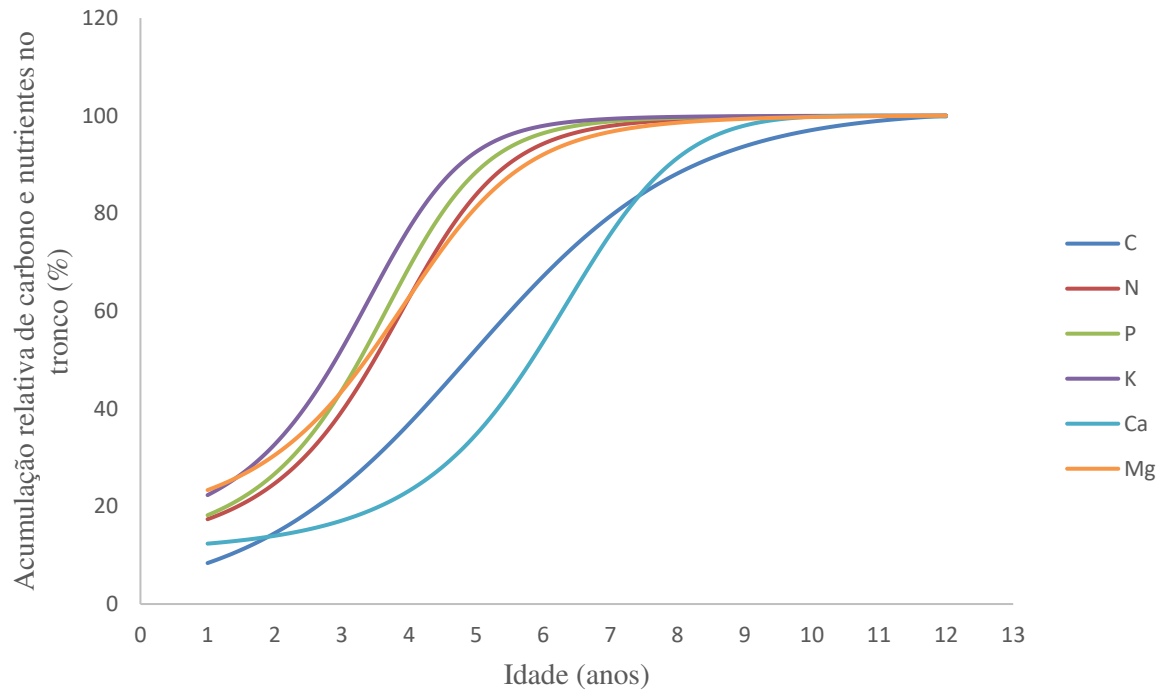


Figura 23 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na classe de 10 a 20 de produtividade

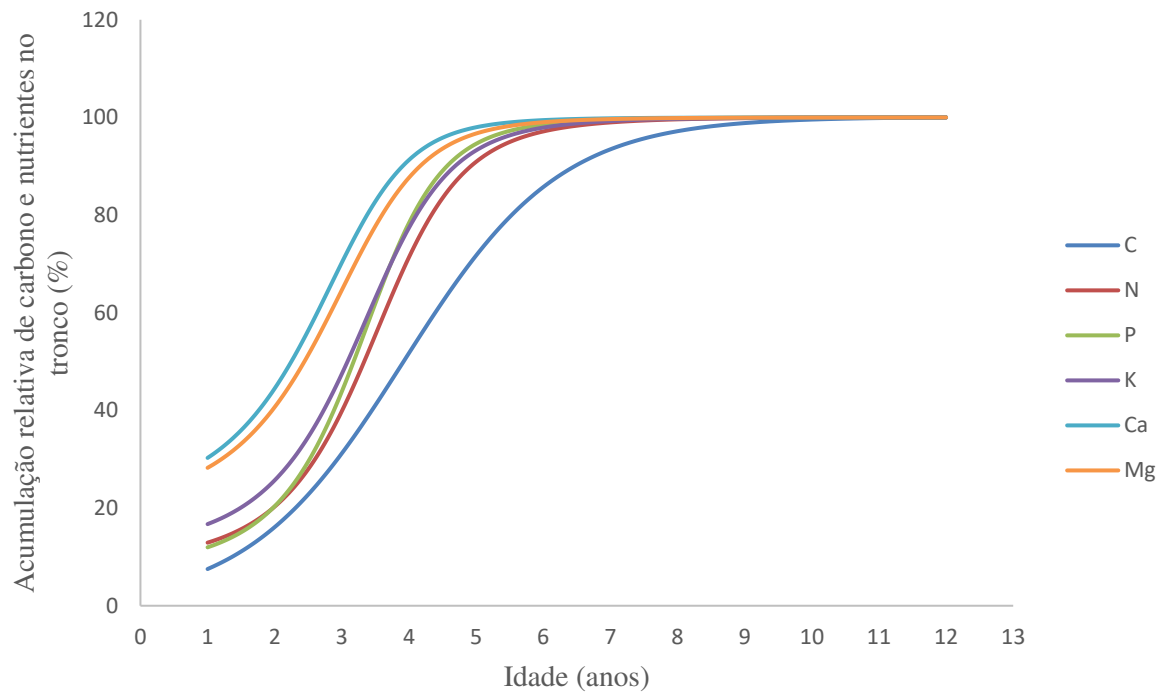
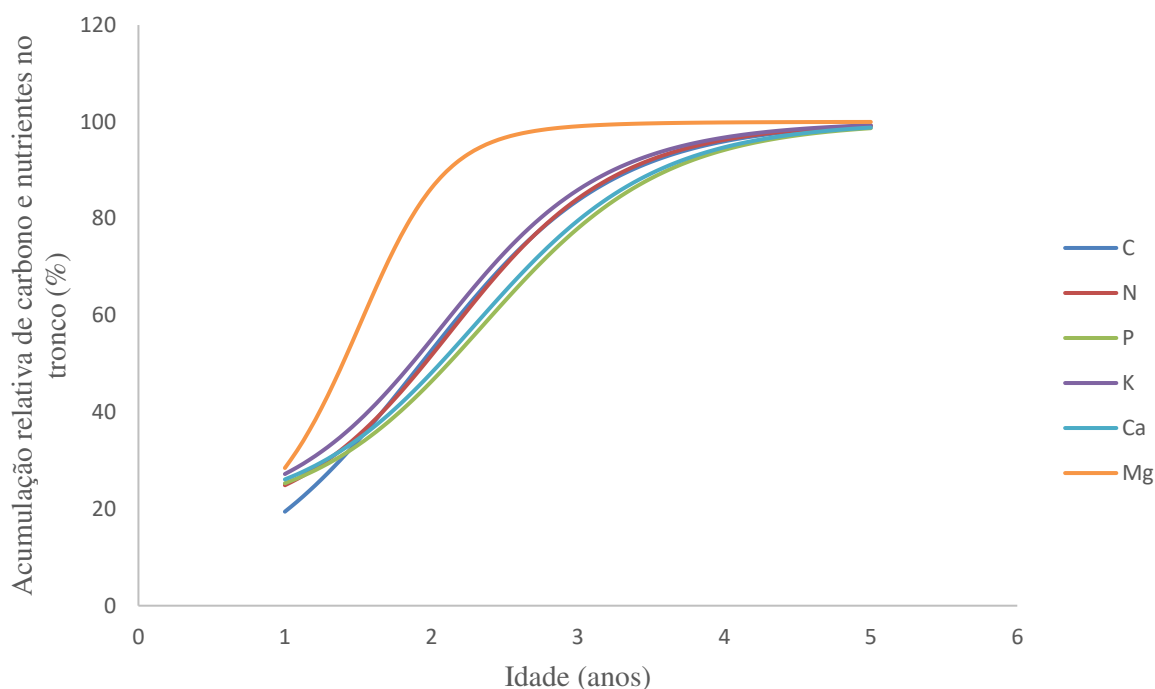


Figura 24 - Acumulação de carbono e nutrientes no tronco na LFI



3.2 Modelagem dos parâmetros

3.2.1 Parâmetro α , β e γ

Na modelagem dos parâmetros da equação logística (que descreve a dinâmica de crescimento em volume de tronco de cada classe de produtividade), a equação linear foi a que melhor descreveu o comportamento de α em função da produtividade. Já para o parâmetro β , o modelo utilizado para descrever seu comportamento foi o Modified Exponential. Visto que γ não apresenta variações significativas entre as classes de produtividade, optou-se por um valor constante, definido pela média aritmética dos valores de γ , 0,83.

As figuras 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente, a disposição dos parâmetros α , β e γ , observados e estimados, em função da produtividade.

Figura 25 - α observado e estimado em função do potencial produtivo

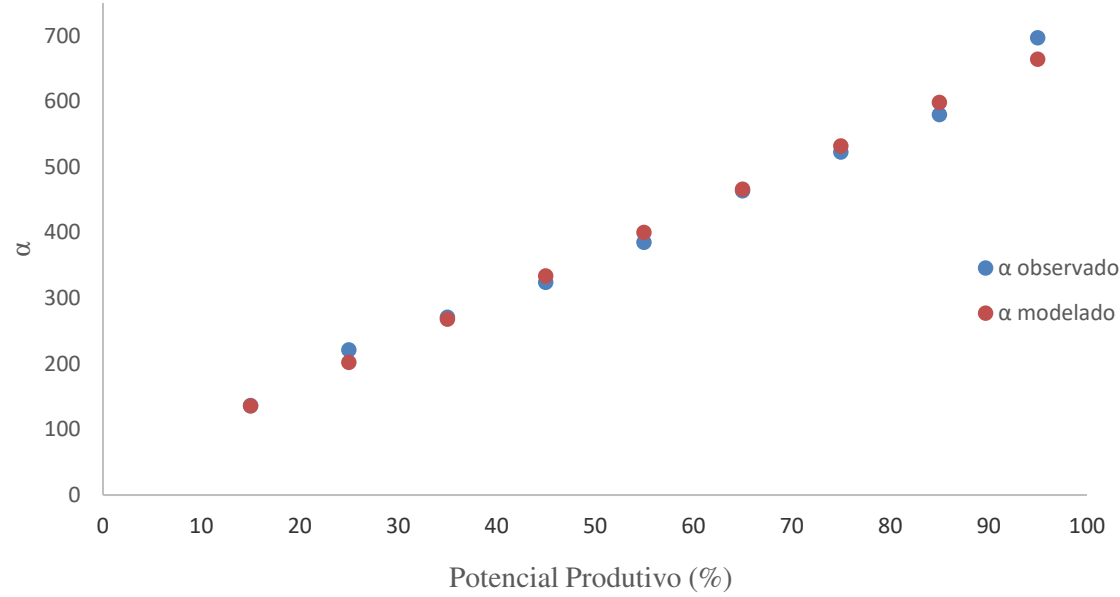


Figura 26 - β observado e estimado em função do potencial produtivo

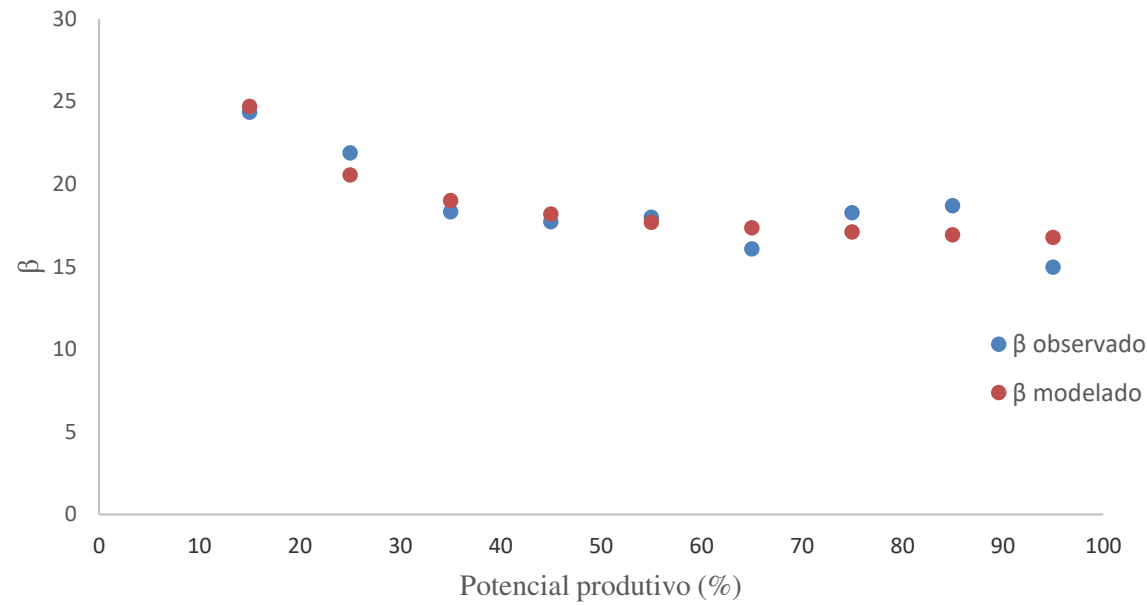
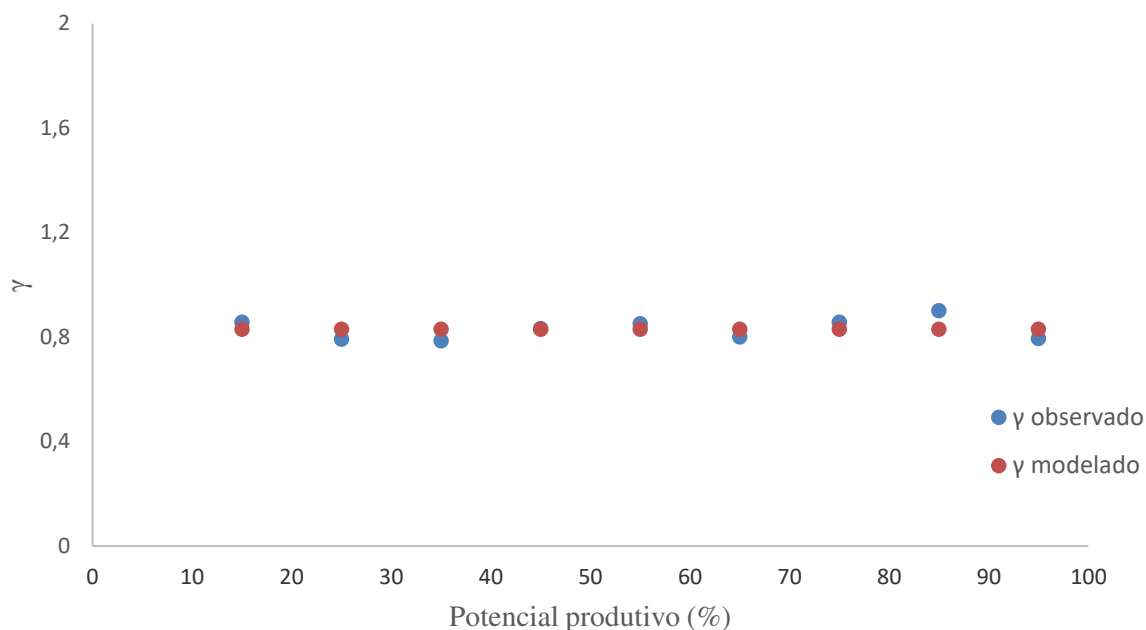


Figura 27 - γ observado e estimado em função do potencial produtivo

Os coeficientes de correlação da modelagem de α e β foram próximos de 1 e estão demonstrados na tabela 27, assim como os parâmetros da equação Linear e da Modified Exponential.

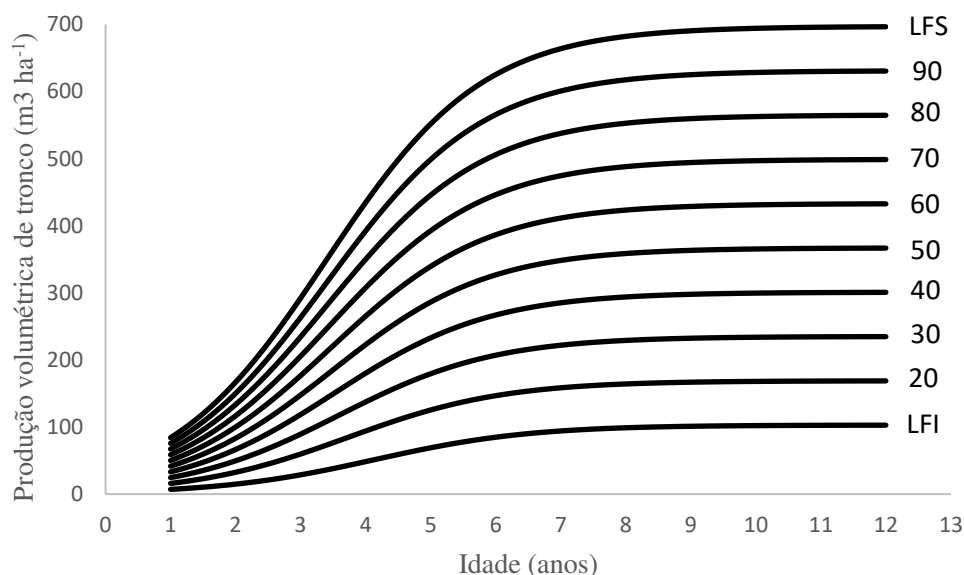
Tabela 27 - Modelagem dos parâmetros das equações logísticas utilizadas para representar o crescimento em volume das 10 classes de produtividade.

Parâmetros dos modelos: linear e modified Exponential				
Modelo	Equação	α	β	R
Linear	$y = \alpha + \beta \cdot x$	36,873	660,241	0,9958
Modified Exponential	$y = \alpha \cdot e^{(\beta/x)}$	15,6032	0,06893	0,9028

Nota: Todos os parâmetros foram modelados em função das classes de produtividade (x , 0 a 1)

Com os parâmetros modelados, é possível fazer a predição de volume, em função da idade, de qualquer classe de produtividade. Como apresentado na figura 28, foi desenvolvida a predição de volume com os parâmetros modelados para as seguintes classes de produtividade (A): LFS, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 e LFI.

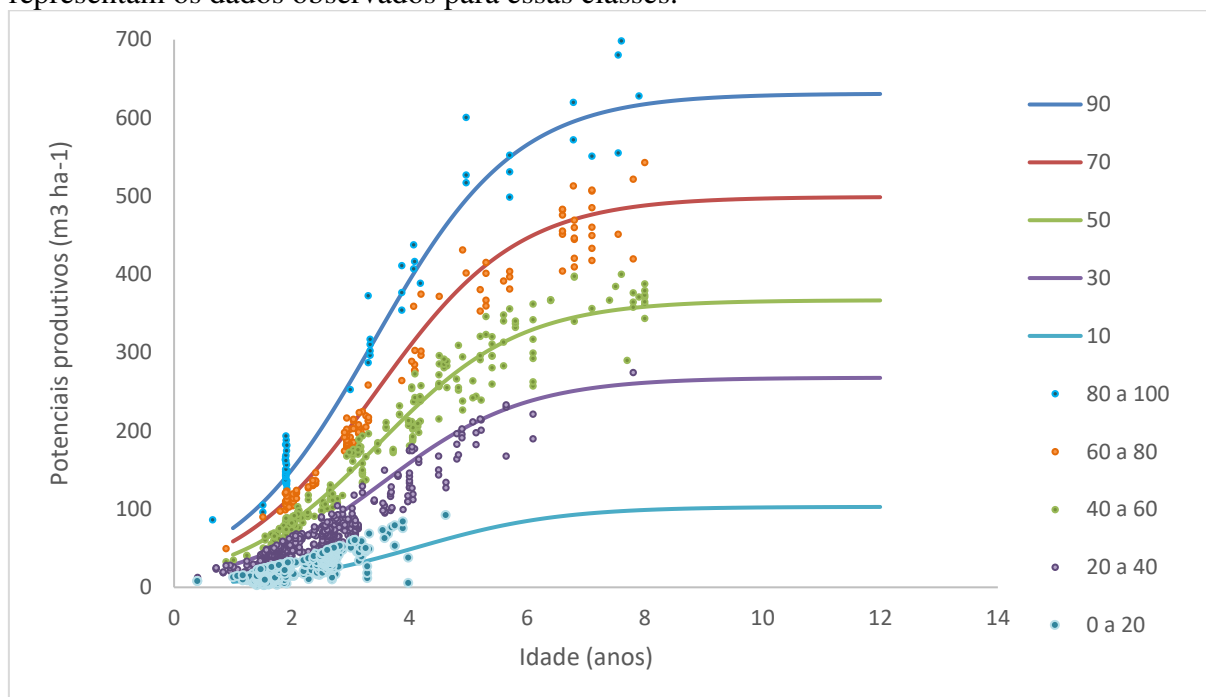
Figura 28 - Produção volumétrica de tronco estimadas a partir dos parâmetros da equação logística modelados, considerando diferentes classes de produtividade



As estimativas de volume de tronco feitas a partir dos parâmetros modelados apresentam grande similaridade com os volumes observados.

Para a demonstração da eficiência da modelagem, foi elaborado um gráfico dos volumes preditos a partir destes parâmetros, para as classes: 90, 70, 50, 30 e 10. Foram plotados os dados observados de volume encontrados nas seguintes classes de produtividade: 80 a 100, 60 a 80, 40 a 60, 20 a 40, 0 a 20, como demonstrado na figura 29. Observa-se que as linhas que representam os volumes preditos se encontram perfeitamente no centro dos pontos que representam os volumes observados.

Figura 29 - Produção volumétrica de tronco estimada e observada em função da idade. As linhas representam os dados estimados das classes de produtividade de 90, 70, 50, 30 e 10%. Os pontos representam os dados observados para essas classes.



3.2.2 Pontos P1, P2 e P3

A modelagem dos parâmetros possibilita a classificação de qualquer plantio de eucalipto do Brasil, em relação à produtividade, e a predição de volume de tronco para idades futuras. Além disso, os pontos que dividem a curva de crescimento da cultura de eucalipto, P1, P2 e P3, variam em função da produtividade.

A tabela 28 apresenta os parâmetros das equações logísticas ajustadas aos dados observados nas 09 classes de produtividade, seus coeficientes de correlação, P1, P2, P3, e as idades em que ocorrem o IMA e o ICA máximos. A tabela 29 evidencia essas mesmas variáveis calculadas a partir dos parâmetros modelados. A classe inferior em produtividade foi retirada para a realização da modelagem dos parâmetros, pois não possuía dados suficientes em idades mais avançadas, prejudicando a qualidade da modelagem.

Tabela 28 – Parâmetros das equações logísticas ajustadas aos dados de volume de tronco e idade observados em 9 classes de produtividade. P1, P2, P3 e idade (ano) para ICA e IMA máximos encontrados em cada classe

A	α	β	γ	r	P1 (ano)	P2 (ano)	P3 (ano)	Idade para	
								ICA máx	IMA máx
95	696,84	14,97	0,79	0,993	1,8	3,4	5,1	3,4	4,7
85	579,70	18,69	0,90	0,998	1,8	3,3	4,7	3,3	4,5
75	522,54	18,27	0,86	0,997	1,8	3,4	4,9	3,4	4,7
65	463,51	16,08	0,80	0,996	1,8	3,5	5,1	3,5	4,8
55	385,15	18,00	0,85	0,995	1,9	3,4	5,0	3,4	4,7
45	324,29	17,72	0,83	0,992	1,9	3,5	5,1	3,5	4,8
35	270,92	18,31	0,79	0,989	2,0	3,7	5,3	3,7	5,1
25	220,91	21,88	0,79	0,973	2,2	3,9	5,6	3,9	5,4
15	136,18	24,35	0,86	0,919	2,2	3,7	5,2	3,7	5,1

Tabela 29 - Parâmetros modelados das equações logísticas utilizadas para descrever o volume de tronco em função da idade, em 9 classes de produtividade. P1, P2, P3 e idade (ano) para ICA e IMA máximos de cada classe

A	α	β	γ	P1 (ano)	P2 (ano)	P3 (ano)	Idade para	
							ICA máx	IMA máx
95	664,10	16,78	0,83	1,8	3,4	5,0	3,4	4,7
85	598,08	16,92	0,83	1,8	3,4	5,0	3,4	4,7
75	532,05	17,11	0,83	1,8	3,4	5,0	3,4	4,7
65	466,03	17,35	0,83	1,9	3,4	5,0	3,4	4,7
55	400,01	17,69	0,83	1,9	3,5	5,0	3,5	4,8
45	333,98	18,19	0,83	1,9	3,5	5,1	3,5	4,8
35	267,96	19,00	0,83	2,0	3,5	5,1	3,5	4,9
25	201,93	20,56	0,83	2,1	3,6	5,2	3,6	5,0
15	135,91	24,70	0,83	2,3	3,9	5,5	3,9	5,4

Os parâmetros observados tiveram alta similaridade com os estimados, assim como os valores de P1, P2, P3, e as idades em que ocorrem o ICA e o IMA máximos. Observa-se que o P2 coincide com a idade em que ocorre o ICA máximo e o P3, se aproxima da idade em que ocorre o IMA máximo, ultrapassando, neste caso, sutilmente estas idades.

P1, P2 e P3 são maiores em classes de produtividade menores, pois plantios mais produtivos, normalmente, possuem alta velocidade de crescimento em volume, devido, principalmente, aos clones utilizados. É comum ocorrer um “estirão de crescimento”, principalmente em idades iniciais. Este estirão de crescimento em volume, muitas vezes não é positivo, pois o crescimento em biomassa não acompanha esta velocidade, resultando em madeiras de baixa densidade.

A tabela 30 apresenta a variação dos parâmetros modelados e de P1, P2 e P3 entre diversos valores de produtividade relativa. O parâmetro α é menor em classes de produtividade menores, pois ele indica a produtividade máxima que uma população pode alcançar, ou a produtividade quando a idade tende a infinito. O parâmetro β , assim como P1, P2 e P3, demonstrou aumento com a diminuição do potencial produtivo.

Tabela 30 - Parâmetros e P1, P2 e P3 modelados em função da produtividade relativa
(Continua)

Produtividade relativa	α	β	γ	P1 (ano)	P2 (ano)	P3 (ano)
1	697,11	16,72	0,83	1,8	3,4	5
0,98	683,91	16,74	0,83	1,8	3,4	5
0,96	670,70	16,76	0,83	1,8	3,4	5
0,95	664,10	16,78	0,83	1,8	3,4	5
0,92	644,29	16,82	0,83	1,8	3,4	5
0,9	631,09	16,85	0,83	1,8	3,4	5
0,88	617,89	16,87	0,83	1,8	3,4	5
0,85	598,08	16,92	0,83	1,8	3,4	5
0,84	591,48	16,94	0,83	1,8	3,4	5
0,82	578,27	16,97	0,83	1,8	3,4	5
0,8	565,07	17,01	0,83	1,8	3,4	5
0,78	551,86	17,04	0,83	1,8	3,4	5
0,75	532,05	17,11	0,83	1,8	3,4	5
0,74	525,45	17,13	0,83	1,8	3,4	5
0,72	512,25	17,17	0,83	1,8	3,4	5
0,7	499,04	17,22	0,83	1,8	3,4	5
0,68	485,84	17,27	0,83	1,8	3,4	5
0,66	472,63	17,32	0,83	1,8	3,4	5
0,65	466,03	17,35	0,83	1,9	3,4	5
0,62	446,22	17,44	0,83	1,8	3,4	5
0,6	433,02	17,50	0,83	1,8	3,4	5
0,58	419,81	17,57	0,83	1,9	3,5	5
0,55	400,01	17,69	0,83	1,9	3,5	5
0,54	393,40	17,73	0,83	1,9	3,5	5,1
0,52	380,20	17,81	0,83	1,9	3,5	5,1
0,5	366,99	17,91	0,83	1,9	3,5	5,1
0,48	353,79	18,01	0,83	1,9	3,5	5,1
0,45	333,98	18,19	0,83	1,9	3,5	5,1
0,44	327,38	18,25	0,83	1,9	3,5	5,1
0,42	314,17	18,39	0,83	1,9	3,5	5,1
0,4	300,97	18,54	0,83	1,9	3,5	5,1
0,38	287,76	18,71	0,83	1,9	3,5	5,1

Tabela 30 - Parâmetros e P1, P2 e P3 modelados em função da produtividade relativa
(Conclusão)

Produtividade relativa	α	β	γ	P1 (ano)	P2 (ano)	P3 (ano)
0,36	274,56	18,90	0,83	2	3,5	5,1
0,35	267,96	19,00	0,83	2	3,5	5,1
0,32	248,15	19,35	0,83	2	3,6	5,2
0,3	234,95	19,63	0,83	2	3,6	5,2
0,28	221,74	19,96	0,83	2	3,6	5,2
0,26	208,54	20,34	0,83	2	3,6	5,2
0,25	201,93	20,56	0,83	2,1	3,6	5,2
0,22	182,13	21,34	0,83	2,1	3,7	5,3
0,2	168,92	22,02	0,83	2,1	3,7	5,3
0,18	155,72	22,88	0,83	2,2	3,8	5,4
0,16	142,51	24,01	0,83	2,2	3,8	5,4
0,15	135,91	24,70	0,83	2,3	3,9	5,5
0,12	116,10	27,71	0,83	2,4	4	5,6
0,1	102,90	31,09	0,83	2,6	4,1	5,7
0,05	69,89	61,93	0,83	3,4	5	6,6

As idades que dividem a curva de crescimento da cultura de eucalipto estão diretamente relacionadas à tomada de decisões em povoamentos florestais, como técnicas de adubação, desbaste, tratos silviculturais, idade técnica de corte, entre outras. Esses valores variam em função do sítio em que a planta se encontra, evidenciando, mais uma vez, a necessidade de ajustes de modelos a fim de prever e projetar os dados dos povoamentos de forma individual (Fernandes et al., 2017).

3.3 Idade técnica de corte: uma abordagem alternativa

3.3.1 ITC Volumétrico e Gravimétrico

Ao comparar a ITC volumétrica com a ITC gravimétrica, observa-se que, quando considerado somente o volume na decisão, a colheita acontece mais cedo do que quando se inclui uma característica qualitativa da madeira na decisão, neste caso a biomassa. Para a classe superior (LFS) a diferença entre as ITCs foi de 01 ano e 11 meses. Já para a classe central de produtividade, a diferença foi de 01 ano e 01 mês (Figuras 30, 31, 32 e 33). O motivo pelo qual os plantios mais produtivos têm maior distância entre a ITC volumétrica e gravimétrica do que os plantios menos produtivos é que os pontos que separam a curva de crescimento da cultura de eucalipto acontecem mais tarde em plantios menos produtivos, como já discutido anteriormente. Como o P2 é igual ao ICA máximo e o P3 se aproxima ao IMA máximo, a ITC volumétrica dos plantios menos produtivos normalmente acontece mais tarde.

Figura 30 - Incremento Corrente Anual (ICA) e Médio Anual (IMA) em biomassa do tronco de povoamentos de eucalipto em função da idade, para a população da linha de fronteira superior

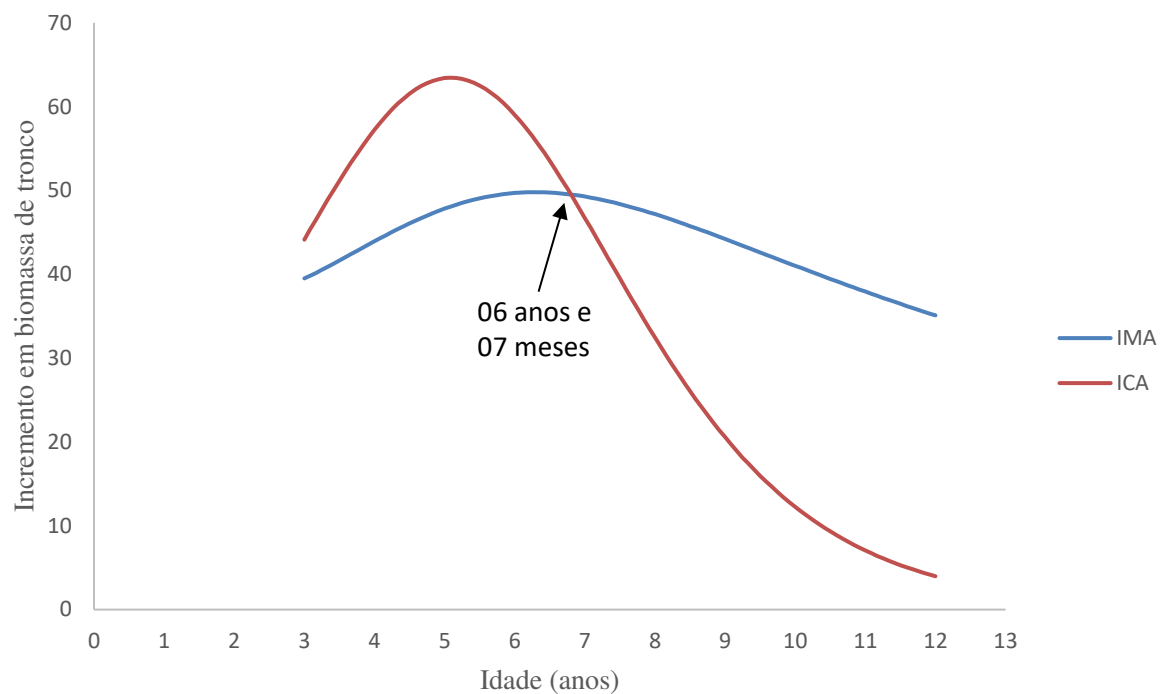


Figura 31 - Incremento Corrente Anual (ICA) e Médio Anual (IMA) em volume do tronco de povoamentos de eucalipto em função da idade, para a população da linha de fronteira superior

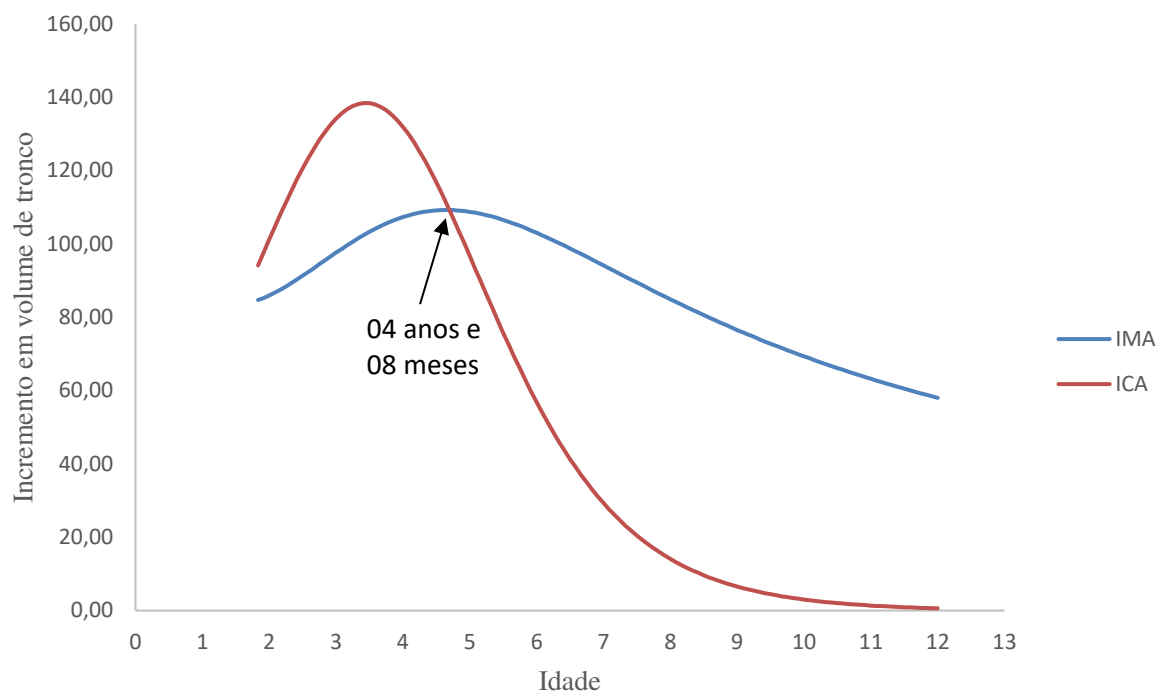


Figura 32 - Incremento Corrente Anual (ICA) e Médio Anual (IMA) em biomassa do tronco de povoamentos de eucalipto em função da idade, para a população central de produtividade

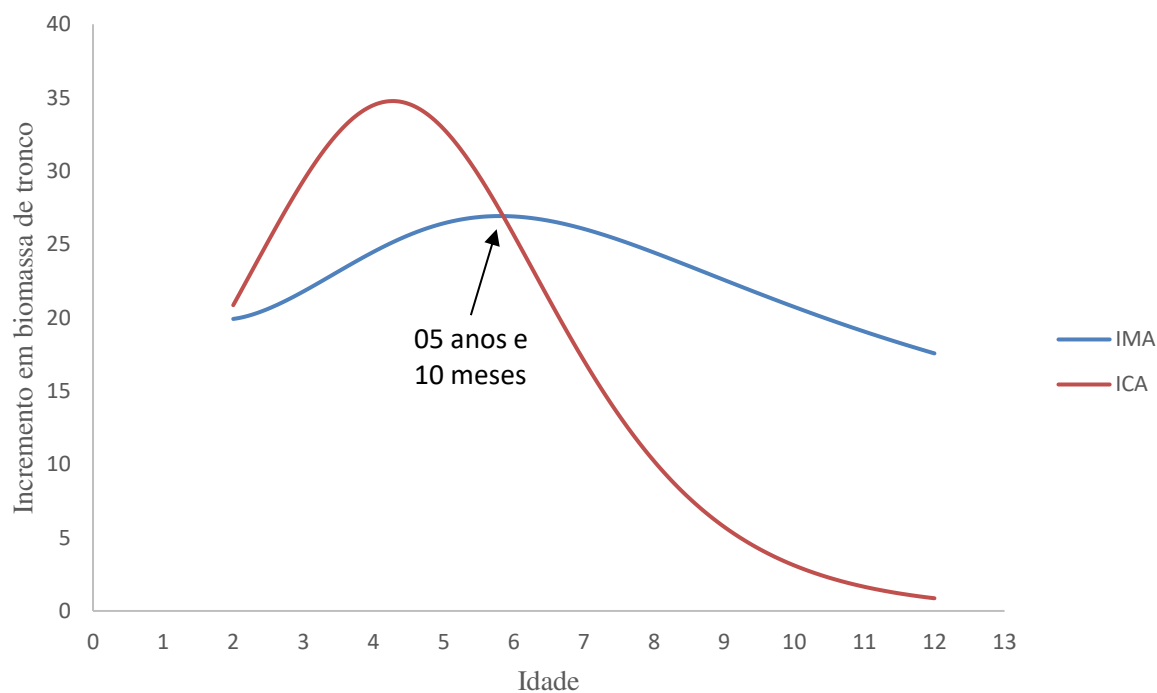
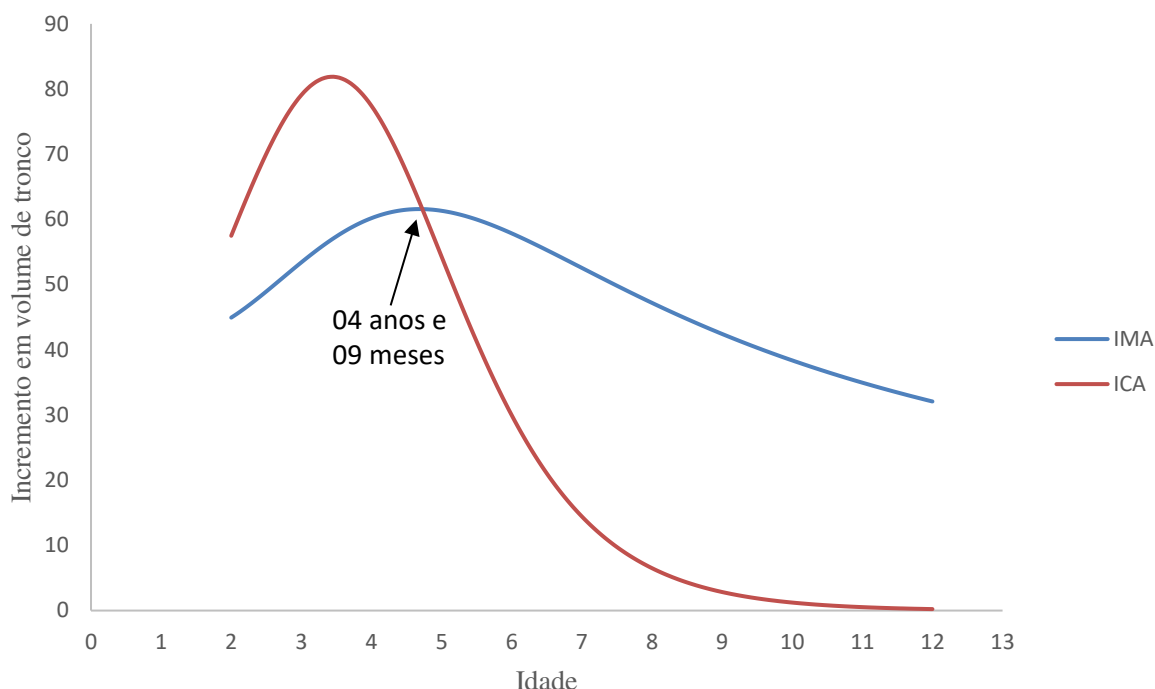


Figura 33 - Incremento Corrente Anual (ICA) e Médio Anual (IMA) em volume do tronco de povoamentos de eucalipto em função da idade, para a população central de produtividade



Na cultura do eucalipto, normalmente, no Brasil, os plantios são cortados muito cedo, ocorrendo grande exportação relativa dos nutrientes do solo. Cabe destacar que, na maioria das vezes, os solos sob plantios de eucalipto são de baixa fertilidade. Como consequência, faz-se necessário o uso de grande quantidade de fertilizantes para manter a fertilidade do solo em níveis adequados para os futuros plantios (Laclau et al., 2010).

Os métodos mais usados para a definição da idade técnica de corte (ITC) de povoamentos de eucalipto, em essência a idade em que ocorre o máximo IMA, não consideram outros aspectos, de natureza qualitativa, em relação ao solo e às árvores, que variam em função da idade do povoamento.

Santana et al. (2012) constataram que o aumento da idade tem influência positiva na densidade. Esta é uma das características mais importantes de qualidade da madeira e está diretamente relacionada à produção de massa de matéria seca (biomassa) e às propriedades físico-mecânicas, além de influenciar positivamente na qualidade dos produtos (Palermo et al., 2004).

Valores mais elevados de densidade aperfeiçoam a produção de carvão por proporcionarem maior resistência e maior quantidade de energia estocada por metro cúbico.

Quanto maior a densidade básica da madeira, maior a produção de energia (Carneiro et al., 2014). O aumento da densidade é positivo também na produção de celulose, pois apresenta maior quantidade de fibras de celulose em um determinado volume e reduz o consumo específico de madeira (Bison, 2004). Além disso, madeiras com alta densidade possuem maior resistência mecânica, o que é vantajoso, por exemplo, na construção civil (Josino, 2014).

3.3.2 Extração e Exportação relativas à produção e seus respectivos custos

Além de ter influência positiva na densidade, o aumento da idade influencia positivamente também os valores de CUB, devido à otimização da ciclagem bioquímica e à alocação de biomassa para o tronco, o que resulta em menor exportação relativa de nutrientes por ocasião da colheita, se feita mais tardiamente, e maior ciclagem biogeoquímica, como constatado anteriormente. A integração de informações relacionadas à acumulação de nutrientes minerais, à deposição de litter e sua liberação de nutrientes, num balanço nutricional intra-rotação contribui para a avaliação da idade de corte sobre a sustentabilidade nutricional do solo do sítio, como proposto por Neves (2000). Estes aspectos são importantes para a manutenção da capacidade produtiva do sítio, reduzindo a quantidade de insumos necessários para a próxima rotação e contribuindo para a sustentabilidade da produção florestal.

O termo extração refere-se ao conteúdo de nutrientes que as plantas retiraram do solo ao longo de seus ciclos de vida e exportação, refere-se ao conteúdo de nutrientes que é retirado do campo, juntamente com o tronco, na colheita. Tanto a extração quanto a exportação aumentam com a idade do povoamento, como mostrado nas tabelas 31 e 32, para o LFS, e 33 e 34 para a classe central. Se o solo fosse incapaz de suprir parte da demanda das plantas, o cálculo da quantidade de fertilizantes necessária seria a razão entre a soma de nutrientes nos compartimentos das árvores, incluindo a serrapilheira, e a taxa de recuperação de nutrientes pela planta.

Tabela 31 - Extração de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a LFS

(Continua)					
Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg
1	261,3	18,7	158,9	212,4	62,9
2	399,4	33,4	266,9	282,4	82,7
3	530,1	46,0	394,7	389,1	102,7
4	584,4	49,4	461,9	497,5	114,1

Tabela 31 - Extração de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a LFS

(Conclusão)					
Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg
5	594,7	49,6	478,8	564,7	117,7
6	594,9	49,3	481,8	592,4	118,4
7	593,7	49,0	482,4	601,5	118,4
8	592,4	48,8	482,5	603,8	118,2
9	591,3	48,6	482,6	603,8	118,0
10	590,2	48,4	482,6	603,0	117,8
11	589,3	48,2	482,6	602,0	117,7
12	588,4	48,1	482,6	600,9	117,5

Tabela 32 - Exportação de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a LFS

Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg
1	78,6	8,1	79,4	118,4	30,1
2	150,6	12,8	132,9	166,6	42,3
3	266,2	19,9	216,5	245,3	58,3
4	346,2	25,8	286,4	340,0	71,6
5	369,0	28,2	314,5	412,4	77,9
6	373,2	28,9	321,8	449,3	80,1
7	373,9	29,1	323,6	464,8	80,8
8	374,1	29,2	324,1	471,3	81,0
9	374,2	29,2	324,3	474,2	81,1
10	374,2	29,2	324,3	475,6	81,2
11	374,2	29,2	324,4	476,3	81,2
12	374,2	29,2	324,4	476,7	81,2

Tabela 33- Extração de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a classe central de produtividade

(Continua)					
Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg
1	219,9	16,6	192,8	126,0	40,9
2	235,3	17,9	193,3	151,5	43,6
3	262,8	20,5	196,3	205,0	48,8
4	301,9	24,1	203,8	300,4	56,9
5	346,8	28,0	216,5	438,7	67,3
6	387,5	31,3	231,9	590,3	77,9
7	417,6	33,5	246,1	715,8	86,7
8	436,5	34,8	256,7	799,8	92,8

Tabela 33 -Extração de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a classe central de produtividade

Idade (anos)	N	P	K	Ca	(Conclusão)
					Mg
9	447,3	35,5	263,6	849,0	96,4
10	452,9	35,8	267,6	875,5	98,5
11	455,6	35,9	269,8	888,8	99,5
12	456,7	35,9	271,0	895,1	100,0

Tabela 34 - Exportação de nutrientes em função da idade, em kg ha⁻¹, para a classe central de produtividade.

Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg
1	64,0	4,9	85,6	63,9	19,5
2	78,2	6,4	90,9	84,4	22,2
3	103,3	8,9	99,9	126,5	26,9
4	141,3	12,3	113,6	207,3	34,2
5	185,0	15,1	131,3	334,7	43,7
6	221,8	16,9	150,1	481,5	53,7
7	245,8	17,7	166,3	604,6	61,9
8	259,6	18,1	177,9	686,9	67,6
9	267,0	18,2	185,1	735,4	71,1
10	270,9	18,3	189,4	762,1	73,0
11	272,9	18,4	191,7	776,4	74,1
12	274,0	18,4	192,9	783,9	74,7

É de se esperar o aumento da extração e de exportação, assim como seus respectivos custos, com a idade. Se ocorre maior produção de madeira com a idade, ocorre, também, maior demanda nutricional. Visto que os CUBs também aumentam com a idade, os cálculos de extração e exportação relativos à produção são importantes para evidenciar se o aumento da necessidade nutricional, causado pelo aumento da idade, é vantajoso em relação à quantidade de madeira produzida.

Os custos de extração e de exportação relativos à produção diminuem com a idade, pois ocorre aumento de produção de madeira e o requerimento de nutrientes em idades mais avançadas é proporcionalmente menor. Assim, com o decorrer dos anos, se produz madeira com uma menor quantidade de nutrientes e, conseqüentemente, a um menor custo.

Os custos de extração relativos à produção se relacionam diretamente aos CUBs integralizados, pois ambos são calculados levando em conta o conteúdo total de nutrientes

absorvidos pelas árvores. Os custos de exportação relativos à produção estão diretamente relacionados aos CUBs compartimentalizados, pois ambos são calculados com base no conteúdo de nutrientes alocados no tronco. Nota-se que os decréscimos dos custos de extração e exportação relativos seguem a mesma dinâmica dos acréscimos dos CUBs integralizados e compartimentalizados, respectivamente, para todos os nutrientes, nas duas classes, como apresentado nas tabelas 35 a 44 para a classe de produtividade central; e nas tabelas 45 a 56 para o LFS.

Em alguns casos, no início do ciclo, os decréscimos dos custos e os acréscimos dos CUBs são negativos. Isso acontece, pois nos primeiros anos do plantio, a acumulação de nutrientes é alta e se obtém baixo retorno em biomassa de tronco. O carbono produzido pela planta é direcionado primeiramente às raízes e às folhas, para, então, ser direcionado ao tronco.

Tabela 35 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para N na classe central

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	89,54		96,2	
2	54,68	39	170,3	77
3	37,2	32	261	53
4	28,52	23	341,8	31
5	24,28	15	395,3	16
6	22,21	9	424,5	7
7	21,19	5	439,3	4
8	20,66	3	446,9	2
9	20,37	1	450,9	1
10	20,21	1	453,2	1
11	20,11	0	454,6	0
12	20,05	0	455,6	0

Tabela 36 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para N na classe central

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	26,05		334,8	
2	18,16	30	511,5	53
3	14,63	19	646	26
4	13,35	9	701	9

Tabela 36 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para N na classe central

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
5	12,95	3	718,9	3
6	12,71	2	732,7	2
7	12,47	2	744,4	2
8	12,28	2	752	1
9	12,16	1	756,1	1
10	12,09	1	758,2	0
11	12,05	0	759,2	0
12	12,03	0	759,7	0

Tabela 37 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para P na classe central

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	27,26		1278,9	
2	16,78	38	2239,2	75
3	11,69	30	3334,1	49
4	9,18	21	4255,9	28
5	7,92	14	4876,0	15
6	7,25	9	5254,8	8
7	6,87	5	5475,6	4
8	6,65	3	5600,9	2
9	6,52	2	5673,1	1
10	6,44	1	5717,1	1
11	6,40	1	5746,6	1
12	6,36	1	5768,4	0

Tabela 38 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para P na classe central

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	8,13		4359,7	
2	6,02	26	6225,4	43
3	5,11	15	7428,0	19
4	4,68	8	8169,1	10

Tabela 38 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para P na classe central

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
5	4,28	8	9022,5	10
6	3,90	9	9859,4	9
7	3,62	7	10444,7	6
8	3,45	5	10778,7	3
9	3,35	3	10950,5	2
10	3,30	2	11034,5	1
11	3,27	1	11074,6	0
12	3,26	0	11093,5	0

Tabela 39 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para K na classe central

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	82,78		108,8	
2	47,34	43	207,6	91
3	29,29	38	355,4	71
4	20,29	31	519,7	46
5	15,97	21	646,1	24
6	14,01	12	715,6	11
7	13,16	6	746,8	4
8	12,80	3	759,8	2
9	12,65	1	765,4	1
10	12,58	1	767,9	0
11	12,55	0	769,0	0
12	12,54	0	769,5	0

Tabela 40 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para K na classe central

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	36,74		246,5	
2	22,27	39	440,9	79
3	14,91	33	688,6	56
4	11,31	24	910,0	32

Tabela 40 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para K na classe central

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
5	9,69	14	1038,4	14
6	9,07	6	1086,4	5
7	8,89	2	1098,1	1
8	8,87	0	1099,3	0
9	8,89	0	1098,6	0
10	8,91	0	1098,0	0
11	8,92	0	1097,6	0
12	8,93	0	1097,4	0

Tabela 41 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para Ca na classe central

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	4,44		150,3	
2	3,04	31	243,0	62
3	2,51	18	315,6	30
4	2,45	2	335,0	6
5	2,66	-8	318,4	-5
6	2,93	-10	297,9	-6
7	3,14	-7	284,9	-4
8	3,27	-4	278,3	-2
9	3,34	-2	275,4	-1
10	3,38	-1	274,4	0
11	3,39	0	274,2	0
12	3,40	0	274,4	0

Tabela 42 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Ca na classe central

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	2,25		274,0	
2	1,70	25	411,2	50
3	1,55	9	494,1	20
4	1,69	-9	482,8	-2

Tabela 42 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Ca na classe central

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
5	2,03	-20	428,2	-11
6	2,39	-18	383,2	-11
7	2,65	-11	357,6	-7
8	2,81	-6	344,8	-4
9	2,90	-3	338,6	-2
10	2,94	-2	335,7	-1
11	2,96	-1	334,3	0
12	2,98	0	333,7	0

Tabela 43 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para Mg na classe central

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	2,88		516,9	
2	1,75	39	919,0	78
3	1,20	32	1401,9	53
4	0,93	22	1800,4	28
5	0,81	12	2011,8	12
6	0,77	5	2085,6	4
7	0,76	2	2103,9	1
8	0,76	0	2107,9	0
9	0,76	0	2109,8	0
10	0,76	0	2111,9	0
11	0,76	0	2114,3	0
12	0,76	0	2116,8	0

Tabela 44 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Mg na classe central

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	1,37		1091,2	
2	0,89	35	1805,8	65
3	0,66	26	2518,5	39

Tabela 44 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Mg na classe central

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	0,56	15	2934,9	17
5	0,53	5	3028,9	3
6	0,53	-1	2986,5	-1
7	0,54	-2	2932,6	-2
8	0,55	-2	2897,7	-1
9	0,56	-1	2879,0	-1
10	0,56	-1	2869,7	0
11	0,57	0	2865,2	0
12	0,57	0	2863,1	0

Tabela 45 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para N na LFS

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	2,88		516,9	
2	1,75	39	919,0	78
3	1,20	32	1401,9	53
4	0,93	22	1800,4	28
5	0,81	12	2011,8	12
6	0,77	5	2085,6	4
7	0,76	2	2103,9	1
8	0,76	0	2107,9	0
9	0,76	0	2109,8	0
10	0,76	0	2111,9	0
11	0,76	0	2114,3	0
12	0,76	0	2116,8	0

Tabela 46 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para N na LFS

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	14,34		644,9	
2	17,21	-20	537,6	-17
3	19,98	-16	463,0	-14

Tabela 46 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para N na LFS

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	18,22	9	507,7	10
5	14,68	19	630,3	24
6	12,09	18	764,9	21
7	10,54	13	877,6	15
8	9,64	9	959,5	9
9	9,12	5	1013,9	6
10	8,83	3	1048,0	3
11	8,66	2	1068,6	2
12	8,56	1	1080,8	1

Tabela 47 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para P na LFS

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	13,80		3215,5	
2	15,38	-11	2688,0	-16
3	13,95	9	2726,9	1
4	10,50	25	3554,5	30
5	7,95	24	4692,1	32
6	6,44	19	5793,1	23
7	5,57	13	6697,5	16
8	5,07	9	7360,7	10
9	4,78	6	7810,8	6
10	4,61	4	8102,6	4
11	4,50	2	8288,2	2
12	4,44	1	8406,7	1

Tabela 48 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para P na LFS

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	5,94		6285,2	
2	5,92	0	6307,1	0
3	6,04	-2	6186,0	-2

Tabela 48 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para P na LFS

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	5,47	9	6819,8	10
5	4,53	17	8235,4	21
6	3,78	17	9865,4	20
7	3,31	12	11272,2	14
8	3,03	8	12307,4	9
9	2,87	5	12998,4	6
10	2,78	3	13432,2	3
11	2,73	2	13694,5	2
12	2,70	1	13849,7	1

Tabela 49 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para K na LFS

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	30,58		324,1	
2	32,14	-5	307,0	-5
3	31,23	3	313,3	2
4	25,62	18	380,5	21
5	20,07	22	485,6	28
6	16,46	18	592,3	22
7	14,33	13	680,3	15
8	13,11	9	744,0	9
9	12,40	5	786,2	6
10	12,00	3	812,6	3
11	11,77	2	828,6	2
12	11,63	1	838,0	1

Tabela 50 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para K na LFS

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	15,27		722,1	
2	16,00	-5	674,4	-7
3	17,13	-7	592,9	-12

Tabela 50 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para K na LFS

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	15,89	7	613,7	4
5	13,18	17	736,0	20
6	10,99	17	884,9	20
7	9,61	13	1013,1	14
8	8,80	8	1107,1	9
9	8,33	5	1169,6	6
10	8,06	3	1208,8	3
11	7,91	2	1232,5	2
12	7,82	1	1246,5	1

Tabela 51 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para Ca na LFS

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	3,35		241,3	
2	2,79	17	289,0	20
3	2,53	9	317,7	10
4	2,26	10	353,3	11
5	1,94	14	411,5	16
6	1,66	15	481,5	17
7	1,47	12	545,4	13
8	1,35	8	594,4	9
9	1,27	5	628,2	6
10	1,23	3	650,2	4
11	1,20	2	664,2	2
12	1,19	1	672,9	1

Tabela 52 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Ca na LFS

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	1,87		427,9	
2	1,65	12	486,1	14
3	1,59	3	502,4	3

Tabela 52 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Ca na LFS

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	1,55	3	517,0	3
5	1,42	8	564,0	9
6	1,26	11	635,3	13
7	1,13	10	706,0	11
8	1,05	7	761,6	8
9	1,00	5	800,0	5
10	0,97	3	824,5	3
11	0,95	2	839,4	2
12	0,94	1	848,3	1

Tabela 53 - Custo de extração relativo à produção e CUB integralizado para Mg na LFS

Idade (anos)	Custo de extração relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB integralizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	1,99		869,4	
2	1,63	18	1032,5	19
3	1,33	18	1220,3	18
4	1,04	22	1540,3	26
5	0,81	22	1971,5	28
6	0,66	18	2407,6	22
7	0,58	13	2770,5	15
8	0,53	9	3035,9	10
9	0,50	6	3214,1	6
10	0,48	3	3327,7	4
11	0,47	2	3398,1	2
12	0,46	1	3441,4	1

Tabela 54 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Mg na LFS

(Continua)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
1	0,95		1684,9	
2	0,84	12	1915,9	14
3	0,76	9	2112,0	10

Tabela 54 - Custo de exportação relativo à produção e CUB compartimentalizado para Mg na LFS

(Conclusão)				
Idade (anos)	Custo de exportação relativo à produção (R\$ t⁻¹)	Decréscimo (%)	CUB compartimentalizado (kg kg⁻¹)	Acréscimo (%)
4	0,65	14	2456,3	16
5	0,54	18	2984,5	22
6	0,45	16	3563,3	19
7	0,39	12	4062,2	14
8	0,36	8	4430,6	9
9	0,34	5	4677,1	6
10	0,33	3	4832,1	3
11	0,32	2	4925,9	2
12	0,32	1	4981,4	1

A menor extração e exportação relativas importam muito, pois interferem diretamente no custo da madeira produzida.

3.3.3 Economia nutricional ao se atrasar a idade de corte

Além de produzir mais madeira com um menor custo nutricional ao atrasar a idade de corte, o conteúdo de nutrientes retirado do campo no momento da colheita é menor. Assim, tem-se um menor custo de fertilização para futuros plantios.

Se a colheita ocorresse na ITC gravimétrica ao invés de ser feita na ITC volumétrica, considerando que somente o tronco saia do campo por ocasião da colheita, tem-se uma economia nutricional de 1.079,71 R\$ ha⁻¹ no plantio da classe de produtividade central, e de 8.971,30 R\$ ha⁻¹ no plantio da LFS. Ao se comparar a idade de corte de 12 anos com a ITC gravimétrica, obtém-se uma economia nutricional de 1.165,31 R\$ ha⁻¹ para a classe central e de 6.256,13 R\$ ha⁻¹ para a LFS (Tabelas 55 e 56).

Tabela 55 - Economia obtida ao se atrasar a idade corte da ITC volumétrica à ITC gravimétrica; e da ITC gravimétrica aos 12 anos, calculada para a classe central

Idade de corte	Economia	R\$ t⁻¹ Tronco	R\$ ha⁻¹	Economia (R\$ ha⁻¹)
Atrasando de 04 anos e 09 meses a	Custo de Extração	5,73	900,61	
05 anos e 10 meses	Custo de Exportação	1,14	179,11	1079,71
Atrasando de 05 anos e 10 meses	Custo de Extração	4,59	966,26	
a 12 anos	Custo de Exportação	0,94	199,04	1165,31

Tabela 56 - Economia obtida ao se atrasar a idade corte da ITC volumétrica à ITC gravimétrica; e da ITC gravimétrica aos 12 anos, calculada para a LFS

Idade de corte	Economia	R\$ t⁻¹ Tronco	R\$ ha⁻¹	Economia (R\$ ha⁻¹)
Atrasando de 04 anos e 08 meses a	Custo de Extração	18,27	5695,65	
06 anos e 07 meses	Custo de Exportação	10,51	3275,66	8971,30
Atrasando de 06 anos e 07 meses	Custo de Extração	9,54	3859,86	
a 12 anos	Custo de Exportação	5,93	2396,28	6256,13

As empresas florestais gastam entre 30 e 45% do custo total de silvicultura com fertilização e as estratégias para a redução desses custos é um tema muito discutido.

A fertilização florestal é essencial para o alcance de boas taxas de produtividade. O seu ponto central, visto como grande pilar da sustentabilidade florestal, é o bom entendimento do balanço entre as quantidades de nutrientes que o solo é capaz de suprir para as árvores e as quantidades que elas demandam para atingir uma determinada produtividade. A necessidade nutricional depende do material genético utilizado e sua eficiência de uso de nutrientes. Materiais genéticos mais eficientes nutricionalmente demandam menor quantidade de nutrientes para a produção da mesma quantidade de biomassa, diminuindo os custos com fertilizantes.

Evidentemente, a manutenção dos resíduos florestais na área é outra estratégia importante para reduzir os custos com fertilização, pois propicia a ciclagem biogeoquímica (a qual ocorre com a intermediação do solo), em que os resíduos vegetais, a exemplo de folhas e galhos, são depositados no solo, ocorrendo a ação de organismos integrantes da mesofauna e da microbiota, e liberação dos nutrientes em ritmo compatível com as condições de clima, de solo e com a qualidade do resíduo, tornando-se disponíveis novamente para as plantas. Este

processo constitui uma adubação orgânica natural, de modo que a adubação mineral seja um suplemento, o que, portanto, torna a produção menos onerosa.

Não se pode considerar somente os custos de insumos fertilizantes; é preciso levar em conta, também, os custos de operações de entrada na área. Em algumas situações, por exemplo, é possível fazer a adubação de base junto a uma adubação de cobertura. Já em outras situações, no caso de alguns solos mais arenosos, deve-se fazer a adubação de base somada a um número maior de adubações de cobertura, duas, ou até, em casos críticos, três. A utilização de fertilizantes com tecnologias avançadas de controle de liberação e de recuperação pelas plantas pode otimizar o manejo nutricional com ganhos importantes na redução do número de operações e na homogeneidade do povoamento, o que reflete positivamente no rendimento da colheita.

Outra forma de reduzir o número de operações é a talhadia, importante estratégia quando já se dispõe de um material genético e de toda silvicultura adequada. A condução das brotações normalmente implica a redução de custo de fertilização, além da redução de custos de mudas e de algumas operações, como por exemplo, a subsolagem (Guedes, 2015). Além disso, as árvores de segundas rotações resistem mais e melhor a períodos de déficit hídrico.

Todas essas estratégias são muito importantes na redução dos custos, porém, pouco se discute sobre a importância do ajuste fino da idade de corte.

O alongamento da idade de corte da floresta contribui para a redução das operações de entrada no campo, reduz o custo da colheita devido ao aumento em volume de madeira, causa o enriquecimento nutricional dos resíduos e um maior suprimento de nutrientes para plantios futuros através da ciclagem biogeoquímica, além da produção de uma madeira mais rica em biomassa e mais pobre em nutrientes.

A contribuição dos resíduos no aumento de nutrientes disponíveis no solo é muito discutida, porém, a variação na composição nutricional dos resíduos e a diminuição da exportação relativa à produção causadas pelo aumento da idade do povoamento, normalmente, não entram na conta do balanço nutricional. A economia gerada por esse alongamento da idade em que se pratica a colheita não é levada em consideração na decisão da idade de corte e nunca foi quantificada. É importante salientar que a decisão da idade de corte e o cálculo da economia nutricional devem ser ajustados para cada situação particular de sítio, de material genético e de manejo.

3.3.4 Análise econômica

As análises econômicas foram elaboradas a fim de harmonizar os benefícios biológicos e silviculturais com melhores resultados econômicos.

Os custos com adubação são diferentes para o LFS e para a classe central. As tabelas 57 e 58 mostram os custos de fertilização para a LFS e para a classe central, respectivamente.

Tabela 57 - Custos com fertilização simulados para diferentes idades de corte, para a LFS
Plano e custo de adubação (LFS)

Idade de corte	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Total (R\$ ha ⁻¹)
	40 %	20 %	20 %	20 %	
4	2168,71	1084,36	1084,36	1084,36	5421,79
5	2363,58	1181,79	1181,79	1181,79	5908,95
6	2405,40	1202,70	1202,70	1202,70	6013,50
7	2414,58	1207,29	1207,29	1207,29	6036,45
8	2417,11	1208,55	1208,55	1208,55	6042,76
9	2417,99	1208,99	1208,99	1208,99	6044,96
10	2418,36	1209,18	1209,18	1209,18	6045,90
11	2418,53	1209,27	1209,27	1209,27	6046,34
12	2418,62	1209,31	1209,31	1209,31	6046,55

Tabela 58 - Custos com fertilização simulados para diferentes idades de corte, para a classe central de produtividade

(Continua)

Plano e custo de adubação (Central)					
Idade de corte	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Total (R\$ ha ⁻¹)
	40 %	20 %	20 %	20 %	
4	958,32	479,16	479,16	479,16	2395,79
5	1196,09	598,05	598,05	598,05	2990,23
6	1377,73	688,87	688,87	688,87	3444,34

Tabela 58 - Custos com fertilização simulados para diferentes idades de corte, para a classe central de produtividade

					(Conclusão)
Plano e custo de adubação (Central)					
Idade de corte	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Total (R\$ ha ⁻¹)
	40%	20%	20%	20%	
7	1488,94	744,47	744,47	744,47	3722,36
8	1548,80	774,40	774,40	774,40	3872,00
9	1578,83	789,41	789,41	789,41	3947,07
10	1593,36	796,68	796,68	796,68	3983,39
11	1600,26	800,13	800,13	800,13	4000,64
12	1603,51	801,75	801,75	801,75	4008,77

Quando a intenção é comparar diferentes cenários, os métodos de análise econômica indicam a situação mais recomendável da seguinte forma: os projetos que possuem o maior VPL e menor CMP são os mais viáveis economicamente (Silva et al., 2005).

Alguns resultados foram similares nos dois métodos de análise econômica. De acordo com as tabelas 59 e 60, observa-se que quanto menores as taxas de juros, mais tarde é a indicação de idade de corte. O cenário de taxa de juros de 0% é abstrato e conceitual e foi incluído para uma situação empírica em que a empresa tem capital próprio e deseja investir em seu plantio, não precisando retirar o recurso de outro investimento. Assim, é possível magnificar os efeitos da idade nos processos biológicos, como o crescimento da floresta e aquisição de nutrientes, sem restrições de ordem econômica que a taxa de juros impõe, que, apesar de serem reais, é interessante ter uma visibilidade dos resultados sem elas.

Na classe de produtividade superior, na maioria das vezes, os projetos mais viáveis apresentam indicação de idades de corte mais tardias que na classe de produtividade central. Nos casos em que isso não acontece, as idades de corte indicadas foram iguais para as duas classes. Em nenhum caso, o cenário mais viável para LFS aconteceu em idades anteriores à classe central.

Tanto para o VPL, quanto para CMP, os projetos mais viáveis apresentaram idades de corte maiores que a ITC definida pelo método tradicional, o que prioriza o máximo IMA

volumétrico. Este resultado indica que, além de favorecer a sustentabilidade da área de plantio, de gerar uma maior economia com fertilização em rotações futuras, o alongamento da idade de corte é, também, economicamente viável, independente da taxa de juros.

Tabela 59 - VPL calculado para a LFS e para a classe central, em diferentes idades

(Continua)

Taxa de juros 0			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	24138,0	4	12089,0
5	32720,6	5	16672,9
6	38486,5	6	19374,5
7	41637,91	7	20671,3
8	43162,83	8	21206,3
9	43837,16	9	21385,7
10	44100,66	10	21410,0*
11	44172,85*	11	21368,6
12	44157,44	12	21299,8
Taxa de juros 0,02			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	22338,7	4	11088,9
5	29607,5	5	14936,3
6	34034,5	6	16906,6
7	35952,5	7	17540,3*
8	36361,5*	8	17477,6
9	36009,3	9	17105,8
10	35307,5	10	16609,8
11	34456,9	11	16069,4
12	33549,9	12	15517,8
Taxa de juros 0,04			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	20678,1	4	10166,3
5	26791,6	5	13366,4
6	30086,8	6	14720,0
7	31010,3*	7	14821,2*
8	30565,4	8	14303,7
9	29469,5	9	13535,1
10	28105,9	10	12684,4
11	26656,1	11	11822,0
12	25201,0	12	10975,5
Taxa de juros 0,06			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	19143,1	4	9313,8
5	24239,9	5	11944,5

Tabela 59 - VPL calculado para a LFS e para a classe central, em diferentes idades

(Conclusão)

Taxa de juros 0,06			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
6	26578,8	6	12778,5*
7	26703,3*	7	12454,1
8	25612,2	8	11595,0
9	23989,2	9	10547,3
10	22188,0	10	9464,2
11	20370,2	11	8406,0
12	18604,2	12	7394,1

Taxa de juros 0,08			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	17722,2	4	8525,2
5	21923,6	5	10654,5
6	23455,0*	6	11051,0*
7	22941,2	7	10388,8
8	21368,1	8	9277,2
9	19383,1	9	8040,3
10	17309,4	10	6814,7
11	15287,8	11	5650,2
12	13373,0	12	4561,2

Taxa de juros 0,1			
Idade	VPL LFS	Idade	VPL Central
4	16405,1	4	7794,4
5	19817,4	5	9482,2
6	20667,9*	6	9511,1*
7	19647,6	7	8582,8
8	17722,5	8	7289,3
9	15501,3	9	5931,4
10	13275,8	10	4628,9
11	11165,4	11	3420,4
12	9210,7	12	2313,6

Nota: As análises marcadas com * indicam maior viabilidade econômica

Tabela 60 - CMP calculado para a LFS e para a classe central, em diferentes idades

(Continua)

Taxa de juros 0			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	23,80	4	29,8
5	19,80	5	25,6
6	17,70	6	24,2
7	16,80	7	23,82*
8	16,50	8	23,84

Tabela 60 - CMP calculado para a LFS e para a classe central, em diferentes idades

(Continuação)

Taxa de juros 0			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
9	16,40*	9	24,0
10	16,40*	10	24,2
11	16,50	11	24,4
12	16,60	12	24,7
Taxa de juros 0,02			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	24,77	4	31,13
5	21,06	5	27,27
6	19,21	6	26,23*
Taxa de juros 0,02			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
7	18,56	7	26,32
8	18,50*	8	26,83
9	18,74	9	27,52
10	19,13	10	28,27
11	19,58	11	29,06
12	20,07	12	29,87
Taxa de juros 0,04			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	25,81	4	32,51
5	22,35	5	29,00
6	20,79	6	28,41*
7	20,45*	7	29,03
8	20,78	8	30,15
9	21,44	9	31,49
10	22,29	10	32,95
11	23,24	11	34,49
12	24,27	12	36,10
Taxa de juros 0,06			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	26,88	4	33,93
5	23,71	5	30,82
6	22,46*	6	30,74*
7	22,52	7	31,99
8	23,30	8	33,83
9	24,49	9	35,98
10	25,92	10	38,33
11	27,52	11	40,85
12	29,26	12	43,53

Tabela 60 - CMP calculado para a LFS e para a classe central, em diferentes idades
(Conclusão)

Taxa de juros 0,08			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	27,99	4	35,40
5	25,14	5	32,72*
6	24,25*	6	33,23
7	24,75	7	35,20
8	26,08	8	37,89
9	27,91	9	41,03
10	30,08	10	44,50
11	32,52	11	48,28
12	35,21	12	52,37

Taxa de juros 0,1			
Idade	CMP LFS	Idade	CMP Central
4	29,13	4	36,91
5	26,63	5	34,72*
6	26,15*	6	35,88
7	27,18	7	38,68
8	29,15	8	42,38
9	31,76	9	46,71
10	34,84	10	51,56
11	38,34	11	56,93
12	42,25	12	62,85

Nota: As análises marcadas com * indicam maior viabilidade econômica

CONCLUSÕES

A equação logística descreve distintamente o comportamento do volume e da biomassa de tronco em função da idade, em qualquer classe de produtividade, sendo recomendável para a modelagem dessas duas variáveis. Além disso, ela também descreve com sucesso, na maioria das vezes, o comportamento de macronutrientes em função da biomassa de tronco.

De maneira geral, a aquisição de nutrientes pela planta acontece até a idade de 5 anos, com exceção do cálcio, que acompanha o aumento de C no tronco. Após essa idade, a ciclagem bioquímica torna-se o principal mecanismo de suprimento nutricional.

A produtividade tem mais influência sobre o conteúdo de nutrientes no tronco do que na parte aérea. Quanto maior a produção de madeira, maior a demanda por nutrientes no tronco.

O CUB compartimentalizado e o CUB integralizado aumentam com a idade.

A acumulação relativa de nutrientes no tronco precede a acumulação relativa de biomassa, com exceção do cálcio.

Os parâmetros modelados da equação logística, utilizada para a modelagem de volume em função da idade, são eficientes para estimar volumes de tronco, pois apresentaram grande similaridade com dados de volumes de tronco observados.

O parâmetro α é menor em classes de produtividade menores. O parâmetro β , assim como P1, P2 e P3, aumenta com a diminuição do potencial produtivo. O γ não varia significativamente com as mudanças no potencial produtivo.

A ITC gravimétrica acontece após a ITC volumétrica.

Além de influência positiva na densidade, o aumento da idade influencia positivamente também os valores de CUB, o que resulta em menor extração e exportação relativas de nutrientes e, conseqüentemente, menor custo de extração e exportação relativos à produção.

Os custos de extração relativos à produção se relacionam diretamente aos CUBs integralizados e os custos de exportação relativos à produção estão diretamente relacionados aos CUBs compartimentalizados.

Quanto menores as taxas de juros, mais tarde é a indicação de idade de corte. Em classes de produtividade superiores, os projetos mais viáveis apresentam indicação de idades de corte mais tardias que em classes de produtividade centrais.

Além de favorecer a sustentabilidade da área de plantio, de gerar uma maior economia com fertilização em rotações futuras, o alongamento da idade de corte é, também, economicamente viável, independente da taxa de juros.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. G. **Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas**. 1997. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, 1997.
- 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., NEVES, J.C.L., NOVAIS, R.F. (2000) Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: Gonçalves, J.L.M. e BenedettiI, W. (eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, p. 269-286.
- BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Fertilidade de solos, nutrientes e produção florestal. **Visão Agrícola**, N°4, p. 76-79, 2005.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., CARMO, D.N., NEVES, J.C.L. (1986) Classificação nutricional de sítios florestais - Descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**,.10: 112-120.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., TEIXEIRA, J.L., FERNANDES Filho, E.I. (1995) NUTRICALC 2.0 - Sistema para calculo del balance nutricional y recomendacion de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque** 16:129-131.
- Binoti, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2010.
- BISON, O. **Melhoramento de eucalipto visando a obtenção de clones para a indústria de celulose**. 2004. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) -Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, 2004.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; HELTON, M. L.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of cerrado in Minas Gerais state. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567-578, 2012.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. atualizada e ampliada. Viçosa: Editora UFV, 2017.
- CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; SANTOS, R.C.; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, R.A.P.; VITAL, B.R. Potencial Energético da Madeira de Eucalyptus sp. em Função da Idade e de Diferentes Materiais Genéticos, **Revista Árvore**, Viçosa: UFV, v.38, n.2, 2014.
- CARVALHO, L. R. **Métodos para comparação de curvas de crescimento**. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP), Botucatu, 1996.

CATERINA, G. L. **Curvas de crescimento de Eucalyptus spp em plantios de diferentes espaçamentos**. 2017. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP), Botucatu, 2017.

CAVALCANTE, V.S., SANTOS, M.L., COTTA, L.C., NEVES, J.C.L., SOARES, E.M.B. Clonal teak litter in tropical soil: decomposition, nutriente cycling, and biochemical composition. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.45 e 0200071, 2021

CORDIDO, J.P.B.R. **Eficiências nutricionais máximas e mínimas em povoamentos de eucalipto**. 2019. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2019.

DEMOLINARI, M. S. M.; SILVA, I. R., LIMA, A. M. N.; VERGUTZ, L.; MENDONÇA, E.S. Efeito da Solução de Separação Densimétrica na Quantidade e Qualidade da Matéria Orgânica Leve e na Quantificação do Carbono Orgânico da Fração Pesada, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.871-879, 2008.

FERNANDES, M.; CANAL, G. B.; CANAL, D.; SANTOS, L. G.; FRAGA, F. C. V. **Modelos para crescimento e produção florestal**. In: **XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**, nº17, São José dos Campos. UNIVAP, 2017, v. 14, p 1-5.

GUEDES, I. C. L. Análise econômica da reforma e da talhadia de povoamentos de eucalipto em condições de risco. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 21, n. 42, 2015.

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 2.ed. New York: Ronald Press, 1972.

JOSINO, M. N. **Relação da resistência com a umidade e com a densidade da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla***. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2014.

LACLAU, J. P.; RANGER, J.; De MORAES GONÇALVES, J. L.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A. V.; THONGO, M'BOU A.; NOUVELLON, Y., SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J. P.; De CASSIA PICCOLO, M.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1771-1785, 2010.

LU, C.; TIAN, H.: Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance, **Earth System Science Data**, v.9, n.1, p. 181-192, 2017.

NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goitacazes, 2000.

- NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, R. A.; ALVAREZ, V., V. H.; SILVA, I. R. Monitoramento Nutricional e Recomendação de Adubação. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 2008, Curitiba. Encontro Brasileiro de Silvicultura, v. 1, p. 51-60, 2008.
- PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J.V.F.; SEVERO, E.T.D.; REZENDE, M.A.; ABREU, H.S. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Englm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.11, n.1, p. 1-6, 2004.
- PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Quím. Nova**. vol.39, n.6, p.732-740, 2016.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.3, p. 911-920, 2008.
- ROBAZZA, W. S.; TELEKEN, J. T.; GOMES, G. A. Modelagem matemática do crescimento de microrganismos em alimentos. **Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional**. v.11, No. 1, p. 101-110, 2010.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, número especial, p. 2723-2733, 2008.
- SANTANA, W. M. S. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of Age and Diameter Class on the Properties of Wood from Clonal Eucalyptus Clonal, **CERNE**, Lavras, v.18, n.1, 2012.
- SANTORO, K. R.; BARBOSA, S. B. P.; BRASIL, L. H.A.; SANTOS, E. S. Estimativas de Parâmetros de Curvas de Crescimento de Bovinos Zebu, Criados no Estado de Pernambuco. **Revista brasileira de zootecnia**. v.34, n.6, p. 2262-2279, 2005.
- SANTOS, M.L. **Partição de Biomassa e Nutrientes em Plantios Clonais e Seminais de teca**. 2015, Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), UFV, Viçosa, 60p.
- SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005.
- SOARES, F., S. **Produtividade de plantios florestais de eucalipto sob diferentes materiais genéticos e espaçamentos no município de Morada Nova de Minas/MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paraná, 2015.
- WITSCHORECK, R. **Fertilizers recommendation for *Eucalyptus saligna* Sm. based on the nutritional balance in the region of Guaíba - RS**. 2014. Tese (Doutorado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2014.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, V. 25, n.5, p. 843-852, 2004.