

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Claudinei Garlet

**BALANÇO NUTRICIONAL E SUSTENTABILIDADE DA
PRODUTIVIDADE DE POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN
EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA DA MADEIRA**

Santa Maria, RS
2021

Claudinei Garlet

**BALANÇO NUTRICIONAL E SUSTENTABILIDADE DA
PRODUTIVIDADE DE POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN
EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA DA MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Titular Dr.nat.techn. Mauro Valdir Schumacher

Santa Maria, RS
2021

Garlet, Claudinei
Balanço nutricional e sustentabilidade da
produtividade de povoamentos de *Eucalyptus dunnii* Maiden
em função do método de colheita da madeira / Claudinei
Garlet.- 2021.
72 p.; 30 cm

Orientador: Mauro Valdir Schumacher
Coorientadora: Maristela Machado Araújo
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2021

1. Solos florestais 2. Resíduos florestais 3. Nutrição
florestal 4. Ciclagem de nutrientes I. Schumacher, Mauro
Valdir II. Araújo, Maristela Machado III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2021

Todos os direitos autorais reservados a **Claudinei Garlet**. A reprodução de partes ou todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: claudineigarlet@gmail.com

Claudinei Garlet

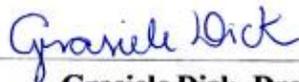
BALANÇO NUTRICIONAL E SUSTENTABILIDADE DA PRODUTIVIDADE DE POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA DA MADEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

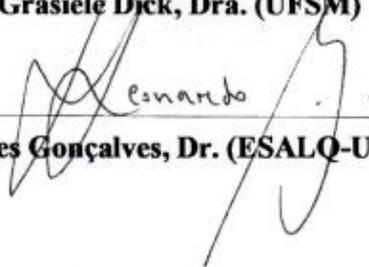
Aprovado em 22 de fevereiro de 2021:



Mauro Valdir Schumacher, Dr. nat. techn. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Grasielle Dick, Dra. (UFSM)



José Leonardo de Moraes Gonçalves, Dr. (ESALQ-USP) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, fonte dos meus valores, a minha namorada Thaís, por todo amor e companheirismo e aos meus “avós” Terezinha e João (*in memoriam*), exemplos de caráter e simplicidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

A minha família, pelo apoio e incentivo incondicionais.

À Universidade Federal de Santa Maria, por ter me acolhido nestes últimos 7 anos, fornecendo-me o suporte necessário à minha formação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e à CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Montes Del Plata, na pessoa do Engenheiro Florestal Cláudio Silva, por todo suporte logístico fornecido para a realização deste trabalho.

Ao professor Titular Dr.nat.techn. Mauro Valdir Schumacher, pela orientação, apoio e confiança depositados e por todo o conhecimento repassado, o qual, certamente, contribuiu significativamente para minha formação pessoal e profissional.

Aos membros da banca de defesa de dissertação, Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves e Dr^a Grasielle Dick, por terem aceitado o convite e pelas valiosas contribuições de melhoria para o trabalho.

Ao Engenheiro Florestal Dr. Rudi Witschoreck, funcionário do Laboratório de Ecologia Florestal, pelos conselhos e amizade.

Aos colegas do Laboratório de Ecologia Florestal, em especial a Aline Aparecida Ludvichack, Dione Richer Momolli, Gian Carlos Poletto, Kristiana Fiorentin dos Santos, Matheus Severo de Souza Kulmann e Túlio Barroso Queiroz, pela amizade e pelos momentos vivenciados ao longo desta jornada.

A todos, meu muito obrigado!

*“A boa madeira não cresce com sossego:
quanto mais forte o vento, mais fortes as
árvores”.*

J. Willard Marriot

RESUMO

BALANÇO NUTRICIONAL E SUSTENTABILIDADE DA PRODUTIVIDADE DE POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE COLHEITA DA MADEIRA

AUTOR: Claudinei Garlet

ORIENTADOR: Mauro Valdir Schumacher

Em plantios florestais, a manutenção da capacidade produtiva do solo está diretamente relacionada às técnicas utilizadas ao longo do processo produtivo. Dentro desta perspectiva, a colheita florestal é uma das mais impactantes, devido à sua grande exportação de nutrientes através da remoção da biomassa. Dessa forma, a seleção do método de colheita mais adequado é essencial para garantir a produtividade das futuras rotações e a sustentabilidade dos solos. Diante deste contexto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o impacto de diferentes sistemas de colheita sobre o estoque e a exportação de nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii*, com 11 anos de idade estabelecido no Uruguai. Para isso, foi realizada a quantificação da biomassa acima do solo das árvores de eucalipto. Inicialmente, delimitou-se, na área de estudo, três parcelas, nas quais foram medidos os diâmetros à altura do peito (DAPs) de todas as árvores. Com essas informações, dividiram-se os diâmetros em cinco classes, sendo seccionadas duas árvores por classe, ao nível do solo. A biomassa foi fracionada nos componentes: folhas, galhos, lenho do fuste, casca do fuste, lenho do ponteiro e casca do ponteiro. Estes componentes foram pesados e obteve-se uma amostra representativa de cada um deles, para verificação do teor de umidade e análise das concentrações dos nutrientes. Para a quantificação da serapilheira acumulada sobre o solo, foram coletadas 24 amostras, com auxílio de uma moldura de 25 cm x 25 cm, as quais foram pesadas e encaminhadas para determinação das concentrações dos nutrientes. Com base nas quantidades de nutrientes em cada um desses compartimentos da biomassa e serapilheira, foi realizada a simulação da exportação de nutrientes em diferentes sistemas de colheita – *full tree* (remoção de toda a biomassa da árvore acima do solo), *RMa + Ca* (remoção da madeira com casca) e *cut-to-length* (remoção apenas da biomassa da madeira do fuste) – sendo determinados o Coeficiente de Utilização Biológica – CUB e o Número Potencial de Rotações - NPR para cada sistema e, com base nestes resultados, foram realizadas inferências quanto à sustentabilidade da produção. A biomassa acima do solo foi de 256,2 Mg ha⁻¹, dos quais 79,6% foi representado pelo componente lenho do fuste, 11,3% pela casca do fuste, 6,0% pelos galhos, 2,4% pelas folhas, 0,6% pelo lenho do ponteiro e 0,1% pela casca do ponteiro. O estoque total dos macronutrientes na biomassa foi de 1202,1 para o Ca; 587,5 para o N; 302,7 para o Mg; 301,3 para o K e 71,2 kg ha⁻¹ para o P, já o estoque de micronutrientes foi de 55692,7 para o Mn; 21387,0 para o Fe; 1563,8 para o B; 1517,2 para o Zn e 907,6 g ha⁻¹ para o Cu. No lenho do fuste houve maior estoque de nutrientes, exceto para os elementos K, Ca e Mn, os quais alocaram-se em maiores proporções na casca. A quantidade de serapilheira acumulada sobre o solo foi de 18,2 Mg ha⁻¹. Nesta biomassa, verificou-se um acúmulo de 142,4; 123,5; 72,7; 24,5 e 7,0 kg ha⁻¹ para os macronutrientes Ca, N, Mg, K e P, respectivamente, e 22197,3; 4562,0; 392,4; 361,2 e 242,1 g ha⁻¹ para os micronutrientes Mn, Fe, Zn, B e Cu, respectivamente. Considerando o sistema *cut-to-length*, em comparação ao *full tree*, houve uma redução na exportação de nutrientes de 78,2% para Mn; 71,4% para K; 64,2% para Ca; 56,5% para B; 55,1% para Mg; 49,6% para Zn; 45,1% para Cu; 44,1% para N; 31,2% para P e 30,2% para Fe. Quanto ao CUB, verificou-se que, de maneira geral, os micronutrientes apresentaram os maiores valores e, considerando os componentes da árvore, o lenho foi o elemento que obteve a maior taxa de conversão de

nutrientes em biomassa, seguido pelos componentes casca, galhos e folhas. Analisando os resultados do NPR, observou-se que a colheita apenas da madeira do fuste proporcionou aumento deste parâmetro, em comparação à colheita da árvore inteira, especialmente para o Ca, que passou de 5,4 para 17,0, e Mg, que foi de 11,8 para 27,4, nos sistemas *full tree* e *cut-to-length*, respectivamente. O *cut-to-length* foi o sistema que apresentou menor exportação de nutrientes, devido à manutenção dos resíduos, sendo este o mais indicado à manutenção da sustentabilidade nutricional do solo.

Palavras-chaves: Solos florestais. Resíduos florestais. Nutrição florestal. Ciclagem de Nutrientes.

ABSTRACT

NUTRITIONAL BALANCE AND SUSTAINABILITY OF THE PRODUCTIVITY OF *Eucalyptus dunnii* MAIDEN STANDS AS A FUNCTION OF THE WOOD HARVEST METHOD

AUTHOR: Claudinei Garlet

ADVISOR: Mauro Valdir Schumacher

In forest stands, the maintenance of the productive capacity of the soil is directly related to the techniques used throughout the production process. Within this perspective, the forest harvest is one of the most impactful, due to its large export of nutrients through the removal of biomass. Therefore, the selection of the most appropriate harvesting method is essential to ensure the productivity of future rotations and the sustainability of the soils. In this context, the objective of the present study was to evaluate the impact of different harvesting systems on the stock and export of nutrients in *Eucalyptus dunnii* stands, with 11 years of age established in Uruguay. For this purpose, quantification of the biomass above ground of eucalyptus trees was carried out. Initially, three plots were delimited in the study area, in which the diameters at breast height (DBH) of all trees were measured. With this information, the diameters were divided into five classes, with two trees being divided per class, at ground level. The biomass was fractionated in the components: leaves, branches, stem wood, stem bark, pointer wood and pointer bark. These components were weighed and a representative sample was obtained from each of them, to check the moisture content and analyze the concentrations of nutrients. For the quantification of the litter accumulated on the soil, 24 samples were collected, with the aid of a 25 cm x 25 cm frame, which were weighed and sent to determine the concentrations of nutrients. Based on the amounts of nutrients in each of these biomass and litter compartments, a simulation of the export of nutrients in different harvesting systems was carried out - full tree (removal of all biomass from the tree above the ground), RMa + Ca (removal wood with bark) and cut-to-length (removing only the biomass from the stem wood) - the Biological Utilization Coefficient and the Potential Number of Rotations for each system were determined and, based on these results, were inferences were made regarding the sustainability of production. Above-ground biomass was 256.2 Mg ha⁻¹, of which 79.6% was represented by the stem wood component, 11.3% by the stem bark, 6.0% by the branches, 2.4% by the branches. leaves, 0.6% for the pointer's wood and 0.1% for the pointer's bark. The total stock of macronutrients in the biomass was 1202.1 for Ca; 587.5 for N; 302.7 for Mg; 301.3 for K and 71.2 kg ha⁻¹ for P, the micronutrient stock was 55692.7 for Mn; 21387.0 for Fe; 1563.8 for B; 1517.2 for Zn and 907.6 g ha⁻¹ for Cu. In the stem wood there was a greater stock of nutrients, except for the elements K, Ca and Mn, which were allocated in greater proportions in the bark. The amount of litter was 18.2 Mg ha⁻¹. In this biomass, there was an accumulation of 142.4; 123.5; 72.7; 24.5 and 7.0 kg ha⁻¹ for the macronutrients Ca, N, Mg, K and P, respectively, and 22197.3; 4562.0; 392.4; 361.2 and 242.1 g ha⁻¹ for the micronutrients Mn, Fe, Zn, B and Cu, respectively. Considering the cut-to-length system, compared to the full tree, there was a reduction in the export of nutrients of 78.2% to Mn; 71.4% for K; 64.2% for Ca; 56.5% for B; 55.1% for Mg; 49.6% for Zn; 45.1% for Cu; 44.1% for N; 31.2% for P and 30.2% for Fe. As for Biological Utilization Coefficient, it was found that, in general, micronutrients had the highest values and, considering the components of the tree, the wood was the element that obtained the highest rate of conversion of nutrients into biomass, followed by the components bark, branches and leaves. Analyzing the results of the NPR, it was observed that the harvesting only of the stem wood provided an increase in this parameter, in comparison to the harvesting of the whole tree, especially for Ca, which went from 5.4 to 17.0, and Mg, which was 11.8 to 27.4, in full tree and

cut-to-length systems, respectively. Cut-to-length was the system that presented the least export of nutrients, due to the maintenance of residues, which is the most suitable for maintaining the nutritional sustainability of the soil.

Key-words: Forest soils. Forest waste. Forest nutrition. Productivity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos atributos físico-químicos do solo na área de estudo.	30
Tabela 2. Valores das quantidades de nutrientes disponíveis no solo na área de estudo.	36
Tabela 3. Variáveis dendrométricas do povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	37
Tabela 4. Parâmetros e estatística de ajuste do modelo de regressão utilizado para estimar a biomassa acima do solo de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.....	39
Tabela 5. Biomassa dos componentes das árvores (Mg ha ⁻¹) em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	40
Tabela 6. Concentrações de nutrientes nos componentes da biomassa acima do solo em povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	42
Tabela 7. Estoque de nutrientes nos componentes das árvores em povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	43
Tabela 8. Concentrações de nutrientes na serapilheira acumulada em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.....	46
Tabela 9. Estoque de nutrientes na serapilheira acumulada em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade	46
Tabela 10. Quantidade de biomassa e nutrientes removidos e mantidos no solo em função do sistema de colheita de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	49
Tabela 11. Coeficiente de utilização biológica (CUB) de nutrientes para um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.....	53
Tabela 12. Estimativa do número potencial de rotações (NPR) com base no estoque de nutrientes na biomassa acima do solo, na serapilheira e no solo (até 60 cm de profundidade) e na exportação via colheita da biomassa.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo, no município de Durazno, Departamento de Durazno – Uruguai.	28
Figura 2. Diagrama climático da região de estudo (valores médios entre os anos de 2008 e 2019).	29
Figura 3. Caracterização das frações fuste comercial e ponteiro.	31
Figura 4. Metodologia para coleta de amostras de lenho e casca.	32
Figura 5. Distribuição das árvores de eucalipto nas diferentes classes diamétricas em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	38
Figura 6. Distribuição relativa da biomassa acima do solo nos diferentes componentes das árvores de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	41
Figura 7. Partição relativa (%) dos nutrientes nos componentes da biomassa em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	44
Figura 8. Estoque de nutrientes disponíveis no solo, na serapilheira acumulada e nos componentes da biomassa em um povoamento de <i>Eucalyptus dunnii</i> , aos 11 anos de idade.	48

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Seleção de árvores para quantificação da biomassa e amostragem em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* no Uruguai. A) Seleção da árvore com o diâmetro de interesse; B) Abate da árvore selecionada; C) Árvore abatida; D) Seccionamento do fuste da árvore selecionada.

Apêndice B - Separação das frações da árvore e pesagem em povoamento de *Eucalyptus dunnii* no Uruguai. A) Separação das frações folhas e galhos; B) Pesagem do fuste com casca; C) Remoção da casca do fuste; D) Pesagem do fuste sem casca.

Apêndice C - Amostragem dos componentes da biomassa para análise química. A) Materiais utilizados; B) Amostragem dos discos de madeira; C) Amostragem de casca.

Apêndice D - Amostragem de serapilheira acumulada. A) Aspecto da moldura para coleta das amostras; B) Coleta do material e acondicionamento em sacos de papel.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo geral	19
2.2. Objetivos específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. A silvicultura do eucalipto	20
3.2. Produção de biomassa	22
3.3. Colheita florestal	24
3.4. Sustentabilidade em plantios florestais	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1. Caracterização geral da área experimental	28
4.1.1. Localização	28
4.1.2. Características climáticas	29
4.1.3. Características de solo	29
4.2. Biomassa do eucalipto	30
4.2.1. Amostragem e determinação da biomassa	30
4.2.2. Estimativa da biomassa acima do solo	32
4.3. Serapilheira acumulada	32
4.4. Estoque de nutrientes no solo	33
4.5. Quantificação do estoque de nutrientes totais na biomassa	33
4.6. Simulação da exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita	33
4.7. Coeficiente de Utilização Biológica (CUB) e Número Potencial de Rotações (NPR)	34
4.8. Análise estatística	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. Estoque de nutrientes no solo	36
5.2. Características dendrométricas	37
5.3. Biomassa	39
5.4. Nutrientes na biomassa	42
5.4.1. Concentração de nutrientes	42
5.4.2. Estoque de nutrientes	43
5.5. Nutrientes na serapilheira acumulada	44
5.7. Exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita	49
5.8. Inferências quanto à sustentabilidade da produção	52

6. CONCLUSÕES	55
7. RECOMENDAÇÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÊNDICES	68

1. INTRODUÇÃO

A população mundial, segundo relatórios recentes, continua a crescer, podendo chegar a 9,7 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (UNITED NATIONS, 2019), impulsionando a demanda por *commodities* e bioenergia (IBÁ, 2017). Atrelado ao crescimento populacional está o aumento da demanda de madeira e seus subprodutos como matéria-prima. Para atender esse volume crescente, dentro de um cenário de baixas emissões de carbono e desmatamento líquido zero, deve-se priorizar a utilização de fontes renováveis, pautadas na sustentabilidade, competitividade e inovação.

Dentro deste contexto, de suprimento dos produtos e subprodutos de origem florestal, a silvicultura é uma alternativa viável, a qual, concomitantemente ao atendimento dessa demanda, reduz as pressões exercidas sobre as florestas nativas para extração desta matéria-prima (CARMO, 2010). Ademais, os serviços ambientais e os benefícios indiretos proporcionados pelas florestas, como a regularização dos mananciais, fixação do gás carbônico e amenização do clima, têm sido colocados como externalidades fundamentais (FERREIRA; SILVA, 2008).

Dados recentes da *Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO* (2020) refletem esta tendência com relação à implementação de plantações florestais, os quais relatam um acréscimo de 123 milhões de hectares nos últimos 30 anos. No Brasil, esta tendência é comprovada pelo aumento anual da área plantada, onde, no ano de 2019, em comparação a 2018, houve um aumento de 2,4% no setor de florestas plantadas, alcançando uma receita setorial de R\$ 97,4 bilhões (IBÁ, 2020).

Considerando os gêneros utilizados na silvicultura, o *Eucalyptus* apresenta destaque, devido, principalmente às diversidades de características das espécies. Dentre elas destacam-se o rápido crescimento, alta produtividade, facilidade de manejo, diversidade de espécies adaptadas às diferentes condições climáticas, utilização para distintas finalidades, além de apresentar uma alta produção de sementes e grande aptidão na propagação vegetativa (FERNANDES et al., 2012; MORA; GARCIA, 2000).

Em geral, plantações de eucalipto em larga escala foram cultivadas em solos indesejáveis para a agricultura, ou seja, áreas que apresentavam algum tipo de limitação, principalmente as condições hídricas e de fertilidade (SILVA et al., 1983; POGGIANI, et al., 1983; GONÇALVES, 2002; STAPE et al., 2014). Somado a isso, a intensificação da produção florestal, ocasionada pelo encurtamento do tempo das rotações, uso de material genético de alta produtividade e aplicação de técnicas silviculturais que maximizam o crescimento

(ERICSSON, 1994), pode favorecer os processos de esgotamento do sistema, especialmente aqueles que envolvem os recursos nutricionais.

Nesses ambientes, há um grande desafio para se desenvolver técnicas silviculturais e de manejo que visem a manutenção da sustentabilidade em longo prazo, nos mais diferentes sistemas de produção florestal (RESQUIN et al., 2020). Sendo o objetivo principal da silvicultura moderna a obtenção da maior produção econômica possível por unidade de área, o trabalho do silvicultor deverá ser acompanhado, na prática, de medidas que possibilitem melhorar as condições do meio físicos (MELLO et al., 1970).

Dentre as técnicas que impactam a sustentabilidade dos sistemas silviculturais, a colheita da biomassa florestal é uma das mais significativas. Segundo Sant'ana (1999), em povoamentos manejados para produção de madeira, a colheita é o principal meio de exportação de nutrientes, tanto diretamente, pela retirada destes da biomassa das árvores, quanto indiretamente, fornecendo condições para a ocorrência de erosão, lixiviação, volatilização e perda da manta orgânica. A quantidade dos nutrientes removidos irá depender de vários fatores, como espécie, idade de corte do povoamento, das características do nutriente, das condições edafoclimáticas e, especialmente, do sistema da colheita florestal (CALDEIRA et al., 2002).

O sistema de colheita florestal envolve as metodologias e procedimentos utilizados para a extração da madeira de um povoamento. Dentre estes, os mais utilizados são o *full tree*, ou seja, a remoção da biomassa acima do solo (madeira, casca, folhas e galhos) e processamento em outro local, e o *cut-to-length*, cujo método baseia-se no processamento das árvores dentro do talhão, sendo exportada somente a madeira comercialmente aproveitável (NORDFJELL et al., 2019; SOMAN et al., 2020). A seleção do sistema de colheita da madeira tem forte influência nos custos operacionais, produtividade, receita gerada, viabilidade econômica (NYLAND, 2016) e, principalmente, na sustentabilidade do meio, o que pode interferir no estoque de nutrientes e comprometer a sua produtividade contínua (BARICHELLO, 2003).

Dessa forma, avaliar os impactos dos diferentes sistemas de colheita na exportação de nutrientes se torna necessário a fim de compreender os processos inerentes ao meio e selecionar o manejo mais adequado do ponto de vista nutricional (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993). A partir disso, as hipóteses fundamentais do presente trabalho são: I. A utilização do sistema de colheita *full tree* irá reduzir significativamente os estoques de nutrientes, em comparação à remoção da madeira com casca e ao sistema *cut-to-length*; II. A remoção apenas da madeira do fuste, mantendo-se os resíduos da colheita, irá proporcionar maiores estimativas do NPR em comparação aos demais sistemas de colheita e; III. A serapilheira contribui significativamente à manutenção dos estoques nutricionais no solo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar as implicações nutricionais, por meio da quantificação da exportação de nutrientes, em diferentes sistemas de colheita florestal em povoamento de *Eucalyptus dunnii* com 11 anos de idade.

2.2. Objetivos específicos

- Quantificar a biomassa dos componentes folhas, galhos, lenho do fuste, casca do fuste, lenho do ponteiro e casca do ponteiro;
- Quantificar a biomassa na serapilheira acumulada sobre o solo;
- Quantificar o estoque de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn e Zn) nos componentes da árvore e na serapilheira acumulada e no solo.
 - Estimar a exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita florestal;
 - Determinar o Coeficiente de Utilização Biológica para cada nutriente em cada componente da biomassa; e
- Estimar o Número Potencial de Rotações, com base nas quantidades de nutrientes mantidos e exportados em cada um dos sistemas de colheita.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A silvicultura do eucalipto

A silvicultura vem sendo desenvolvida em diversos países do mundo (PIRES et al., 2020). Segundo Ribaski (2018), o setor florestal contribui significativamente à economia, a partir da geração de impostos, fornecimento de produtos, geração de empregos e da conservação e preservação dos recursos naturais.

Dentre os inúmeros gêneros arbóreos existentes com potencial silvicultural, as espécies de *Eucalyptus* têm um elevado patamar quanto à utilização em plantações comerciais, principalmente por apresentar características como o rápido crescimento, boa produtividade, fácil implantação em amplos maciços e grande capacidade de adaptação às diferentes condições ecológicas (MORA; GARCIA, 2000; BATISTA, 2015; FLORES et al., 2016). Além disso, a alta tecnologia silvicultural desenvolvida para o eucalipto favorece a sua utilização, além de servir como base para o desenvolvimento da silvicultura de outras espécies pouco conhecidas (TONELLO, 2010; MELO et al., 2014).

As espécies do gênero *Eucalyptus*, pertencentes à família Myrtaceae, ocorrem naturalmente na Austrália, Papua-Nova Guiné, Timor Leste, Indonésia e Filipinas, abrangendo distintos nichos ecológicos, após milhões de anos de evolução (FLORES et al., 2016). Esse gênero abrange numerosas espécies, com características fisiológicas e anatômicas distintas, possibilitando sua utilização nas mais diferentes finalidades, como fabricação de papel, celulose, siderurgia, indústria moveleira, produção de energia, chapas e óleos (HIGA et al., 2006; SANTOS et al., 2001).

No Uruguai, a área coberta por plantações de eucalipto vem se expandindo, principalmente para produção de celulose e madeira (HERNÁNDEZ et al., 2009). Tal constatação surge considerando a presença de terras planas, situação desejada para a silvicultura devido à possibilidade de utilização da mecanização em seus processos, fazendo com que o Uruguai apresente grande potencial na implementação da silvicultura do eucalipto e na utilização industrial da madeira como matéria-prima (FOELKEL, 2008).

Neste país, a introdução de espécies do gênero *Eucalyptus* iniciou-se em 1896 (REDO et al., 2012), no entanto, devido às disposições incompletas e falta de financiamento, a tentativa de aumentar a cobertura florestal do país fracassou (SNOECK et al., 2007; OLMOS & SIRY, 2009). Foi apenas em 1987, após a aprovação e implementação da Lei Florestal 15939, que a área plantada com espécies exóticas aumentou rapidamente (MENDELL et al., 2007;

ANDRADE-NUÑEZ & AIDE, 2010), a qual teve por objetivo substituir as práticas de agricultura e pecuária instaladas em solos pobres por plantações para geração de madeira (SNOECK et al., 2007). De acordo com Mendell et al. (2007), essa lei forneceu incentivos financeiros, como subsídios, redução de impostos e empréstimos, os quais encorajaram a introdução de plantações em grande escala, tendo, esta, efeitos imediatos, considerando que, no clima subtropical temperado e úmido do Uruguai, o eucalipto apresentou crescimento elevado (REDO et al., 2012).

Aliada à Lei 15939, para alavancar o crescimento do setor de florestas plantadas no Uruguai, sancionou-se, em 1998, a Lei Florestal 16906, a qual promoveu o investimento direto nacional e estrangeiro, permitindo, também, aos investidores remeter livremente os lucros e realizar transferências de capital para o exterior (MENDELL et al. 2007). Segundo este mesmo autor, esta lei favoreceu ainda mais a chegada de investidores no país, atraídos juntamente a outros benefícios fornecidos, como, por exemplo, a estabilidade política, altas taxas de crescimento das árvores, custos relativamente baixos e boa infraestrutura viária.

Entre os anos de 1990 e 1998, houve um aumento acima de 1000% na área plantada com florestas no Uruguai, instaladas, principalmente, nos Departamentos de Rivera, Tacuarembó, Paysandú, Río Negro, Soriano, Durazno, Flórida, Lavalleja, Maldonado e Cerro Largo (REDO et al., 2012). Dados recentes da Oficina de Estadísticas Agropecuarias – DIEA (2020) informam que, no ano de 2019, a área coberta com florestas plantadas no Uruguai esteve acima de 1,03 milhões de hectares, sendo representadas, basicamente, por espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Dentre as espécies de eucalipto mais utilizadas nestes reflorestamentos, destacam-se o *E. globulus*, *E. grandis* e o *E. dunnii* (HERNÁNDEZ, et al. 2009).

Além do Uruguai, outros países da América Latina, como o Brasil e o Chile, também são casos de sucesso quanto ao desenvolvimento da silvicultura do eucalipto, fruto de seus investimentos neste setor e também às políticas governamentais de incentivo (LIMA-TOIVANEN, 2013; KATZ et al., 1999). No caso do Brasil, o plantio de espécies florestais de rápido crescimento teve grande impulso com a publicação da Lei 5106/66, de 2 de setembro de 1966, que trata dos incentivos fiscais a empreendimentos florestais (PAIVA; LEITE, 2015). A adoção desses programas teve por objetivo suprir a indústria de celulose e papel, por meio da utilização da madeira das plantações e, posteriormente, outros segmentos, como a produção de painéis, siderurgia e secagem de grãos (MOREIRA, 2017). Arelado a isso, as espécies de *Eucalyptus* encontraram no território brasileiro condições edafoclimáticas favoráveis para o seu desenvolvimento (ALMEIDA et al., 2013), caracterizando este como sendo o gênero mais

plantado no Brasil, correspondendo, no ano de 2019, a uma área equivalente a 6,97 milhões de hectares dos 9,0 milhões de hectares cultivados (IBÁ, 2020).

Dentre as espécies de *Eucalyptus*, *E. dunnii* apresenta-se como uma das mais produtivas (RESQUIN et al., 2019). Além disso, é uma espécie de rápido crescimento com boa adaptação ao frio (TURNBULL; PRYOR, 1984; MORA; GARCIA, 2000; LORENZI, 2003), sendo sua madeira adequada à produção de celulose e com alguns usos para a madeira sólida (JOVANOVIC et al., 2000). Segundo dados levantados por Paludzyszyn Filho et al. (2006), as espécies de *Eucalyptus* economicamente importantes para condições mais frias constituem um grupo muito restrito, e dentre estas o *Eucalyptus dunnii* apresenta boa aptidão, sobretudo no que se refere à produção de madeira para fins energéticos e sólidos madeiráveis. No Uruguai, o *E. dunnii* foi, no ano de 2019, a espécie mais plantada, representando 48,6% (36.265 ha) da área total plantada neste respectivo ano (DIEA, 2020).

A região de ocorrência natural desta espécie na Austrália restringe-se a pequenas áreas no nordeste de Nova Gales do Sul e no Sudeste de Queensland, em latitudes que variam de 28 a 30° 15' Sul e altitudes de 300 a 780 m, aproximadamente. O clima é subtropical úmido com temperatura do mês mais quente variando entre 27 e 30 °C e com as mínimas do mês mais frio entre 0 °C e 3 °C, ocorrendo de 20 a 60 geadas por ano. A precipitação média anual é de 1000 a 1750 mm, com as máximas no verão, sendo que a precipitação mensal é sempre superior a 40 mm (EMBRAPA, 1986).

3.2. Produção de biomassa

O crescimento da população global trouxe consigo o aumento da demanda mundial de energia (FERREIRA et al., 2018). Grande parte desta energia é, ainda, oriunda de fontes não renováveis e com reservas limitadas, como é o caso dos combustíveis fósseis (GUO et al., 2015; BARRETO, 2018). Considerando a busca constante por novas fontes de energia, que sejam renováveis e que minimizem os impactos ambientais, a biomassa é uma alternativa interessante (KUMAR, et al., 2010).

Em termos florestais, a biomassa é a quantidade do material vegetal existente nos povoamentos florestais, ou apenas a fração arbórea da mesma, podendo esta ser chamada de fitomassa florestal ou fitomassa arbórea (SANQUETTA; BALBINOT, 2004), a qual distribui-se, geralmente, nos diferentes componentes da planta de maneira distinta (CURLIN, 1970). Este material é composto, principalmente, de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), além de

outros elementos químicos, como por exemplo aqueles denominados nutrientes, os quais são essenciais ao desenvolvimento das plantas (RATUCHNE, 2010).

A produção de biomassa pode variar significativamente de acordo com a disponibilidade de recursos naturais que influenciam na fotossíntese, na compartimentalização do carbono, na produção de folhas, respiração, entre outros (RYAN et al., 2010). Dessa forma, considerando que a fotossíntese e a respiração são os processos responsáveis pela produção de biomassa nas plantas, fatores que afetam tais processos irão, conseqüentemente, influenciar o acúmulo deste material (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1996). Dentre estes fatores, estão aqueles relacionados às condições ambientais, como a luz, temperatura, concentração de CO₂, umidade, fertilidade do solo e doenças, e aqueles inerentes às características das plantas, também denominados fatores internos, como a idade, estrutura e disposição das folhas, distribuição e comportamento dos estômatos, teor de clorofila e acumulação de carboidratos (KRAMER; KOZLOWSKI, 1972; BARICHELLO et al., 2005).

Segundo Souza e Fiorentin (2013), a biomassa pode ser expressa em peso verde ou peso seco, onde o primeiro refere-se ao material fresco, contendo uma proporção variável de água, e o segundo faz referência aos componentes obtidos após secagem. Considerando o peso seco do material vegetal, as concentrações dos constituintes minerais variam com a espécie, fase de desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com a parte do vegetal considerada (LARCHER, 2000).

A partir do conhecimento da quantidade de biomassa acumulada nas diferentes frações das árvores, bem como de suas respectivas concentrações de nutrientes, é possível indicar quais delas são passíveis de serem retiradas e quais podem permanecer sobre o solo, visando minimizar o impacto da colheita florestal sobre os nutrientes, auxiliando na adoção de estratégias de mitigação e perdas nutricionais (MONTAGNINI; SANCHO, 1994). Além disso, a avaliação da exportação de nutrientes pela colheita pode funcionar como uma ferramenta auxiliar de indicação da quantidade e qualidade da adubação de reposição a ser realizada na rotação seguinte (POGGIANI et al., 1984).

A silvicultura, em seu conceito moderno, busca aumentar a produção de biomassa florestal de forma sustentável, devendo seus estudos reconsiderar as práticas tradicionais e buscar alternativas para manter uma colheita energética equilibrada e eficiente (JUNIOR et al., 2016). Sendo assim, a manutenção da capacidade produtiva de um sítio só poderá ser mantida, a longo prazo, quando a biomassa exportada pela colheita e as perdas pela erosão forem repostas de forma eficiente, sendo esta alcançada por meio da quantificação do material vegetal e dos nutrientes removidos do sistema (SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001).

Objetivando-se alcançar uma melhor percepção acerca da estrutura de um ecossistema, bem como prever a capacidade produtiva de um determinado sítio, torna-se imprescindível avaliar e quantificar a biomassa acumulada nesse ambiente (CONSENSA, 2017; SIXEL, 2012). A partir dessa avaliação, é possível realizar inferências quanto à produtividade do sistema florestal, os fluxos de energia, os balanços nutricionais e o ciclo do carbono (SOARES et al., 2005).

3.3. Colheita florestal

A colheita florestal caracteriza-se pelo conjunto de operações efetuadas no povoamento florestal para explorar e extrair a madeira até o local de transporte ou utilização (BANTEL, 2010). Para Malinovski (2007), a colheita, considerada a parte mais importante do ponto de vista técnico-econômico, é composta pelas etapas de corte (derrubada, desgalhamento e traçamento ou processamento), descascamento (quando executado no campo), extração e carregamento.

Para a realização destas operações, existe uma série de atividades integradas entre si, denominadas sistemas de colheita, as quais permitem o fluxo constante de madeira, evitam os pontos de estrangulamento e levam os equipamentos a sua máxima utilização (MACHADO, 2002). Estes sistemas são condicionados a diversos fatores, como por exemplo, a espécie florestal, idade do povoamento, condições gerais da área de colheita e finalidade a que se destina o produto (SILVA et al., 2003).

Os sistemas de colheita, de acordo com Machado (2002), são classificados quanto ao comprimento das toras e à forma como a madeira é extraída do povoamento. Dentre estes, os mais utilizados são:

- Sistema de árvore inteira (*full tree*): a árvore é derrubada e levada para a margem da estrada ou para o pátio de processamento, onde é inteiramente processada.
- Sistema de toras curtas (*cut-to-length*): a árvore é processada no local de derrubada, sendo extraída para a margem da estrada ou para o pátio temporário somente a madeira, em forma de pequenas toras com menos de 6 metros de diâmetro. Nesse sistema, os resíduos do processamento (folhas, galhos, casca e ponteiro) são mantidos sobre o solo, no local de derrubada da árvore.

O *cut-to-length*, segundo Malinovski et al. (2002), é o sistema mais antigo empregado no Brasil, além de ser considerado o mais “amigável” do ponto de vista ambiental

(NURMINEN et al., 2006). Já o *full tree* apresenta maior aderência quando se busca a utilização de biomassa para energia, devido às potencialidades de uso da casca, folhas e ramos (MALINOVSKI et al., 2002). Além destes dois sistemas, de maior conhecimento, há também a possibilidade da remoção apenas da madeira com casca. Segundo Viera (2012), a utilização deste sistema de colheita da madeira é empregada quando se tem por objetivo utilizar a matéria-prima para a produção de celulose e papel e a casca a ser utilizada como fonte energética.

O uso de resíduos florestais como fonte de energia se tornou comum, principalmente em países subtropicais (ACHAT et al., 2015). Isto se deve ao fato desta matéria-prima ser utilizada como fonte de energia na indústria de celulose, bem como pela sua contribuição como fonte renovável de recursos energéticos (CHUM et al., 2011; ROCHA et al., 2018). No entanto, a utilização destes resíduos como fonte energética requer atenção especial, principalmente no que diz respeito às questões ambientais e a manutenção da capacidade produtiva do sítio.

O manejo dos resíduos orgânicos da colheita pode impactar fortemente o funcionamento do ecossistema, com consequências diretas nas propriedades físicas do solo, estoques de nutrientes, ciclo do carbono, crescimento das plantas, comunidade microbiana e fauna do solo (SAYER, 2006). Em sistemas de colheita mais intensivos, que promovem a remoção deste material residual, pode haver perda de rendimento da futura rotação em cerca de 20%, sendo intensificada em climas tropicais úmidos e solos pouco férteis (LACLAU et al., 2010; HUANG et al., 2013; KUMARASWAMY et al., 2014; NAMBIAR; HARWOOD, 2014; ACHAT et al., 2015; ROCHA et al., 2016). Sendo assim, há necessidade de entendimento do potencial produtivo dos vários sítios, em particular das características nutricionais e seu efeito na sustentabilidade da produção florestal.

3.4. Sustentabilidade em plantios florestais

Em florestas naturais, podemos observar uma “autossuficiência” no que diz respeito às questões de sustentabilidade, devido aos fatores inerentes ao próprio meio, como, por exemplo, a diversidade genética, características edáficas, dinâmica nutricional e ciclo hidrológico (POGGIANI et al., 1998). Em contrapartida, segundo este mesmo autor, em plantações comerciais a sustentabilidade se fundamenta em algumas premissas básicas: manutenção da produção de madeira, equilíbrio entre a entrada e saída de nutrientes e a conservação da capacidade de regeneração do ecossistema. A manutenção da capacidade produtiva de um sítio só poderá ser mantida em longo prazo, quando a utilização da biomassa e as perdas pela erosão forem repostas de forma eficiente (SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001).

A biomassa florestal, dentro do contexto da utilização de energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis, torna-se uma alternativa viável (ACHAT et al., 2015). No entanto, intensificar a colheita da biomassa, principalmente pela remoção dos componentes das árvores que eram, convencionalmente, deixados no sítio, coloca os benefícios oriundos desta prática em pauta (ACHAT et al., 2018). Atualmente no Brasil, já existem empresas florestais que, além do aproveitarem toda a biomassa acima do solo, também estão realizando a colheita do toco juntamente com grande parte das raízes.

Quando se trata de colheita florestal, a sustentabilidade é definida como a capacidade de assegurar ou aumentar a produtividade do povoamento, seguindo o princípio básico: a colheita não pode exceder a capacidade produtiva do sítio, considerando-se o povoamento florestal como uma unidade individual de manejo (SCHLICH, 1925). A colheita, por apresentar uma elevada exportação de nutrientes, pode impactar na produtividade das sucessivas rotações (SANT'ANA et al., 1999). Segundo Viera (2010), as explorações intensivas em rotações curtas, sem previsão de um período mínimo necessário para reposição de nutrientes, têm sido apontadas como as maiores responsáveis pelo exaurimento nutricional do solo.

Antes de avaliar o impacto da colheita do ponto de vista nutricional, deve-se determinar em quais componentes a planta prioriza a alocação de nutrientes (HARRISON et al., 2000). Essa determinação se dará por meio da quantificação da biomassa e suas respectivas concentrações de nutrientes, a qual irá fornecer informações acerca da quantidade de nutrientes que ficará sobre o solo alocado nos resíduos da colheita.

Os resíduos da colheita, apresentam maiores concentrações de nutrientes do que nos caules (AUGUSTO et al., 2008; ANDRÉ et al., 2010), sendo estas ainda maiores quando se trata das folhas (RANGER et al., 1995; AUGUSTO et al., 2008). Dessa forma, a remoção desses resíduos pode afetar as propriedades do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes às árvores. Isso ocorre porque, em comparação à colheita convencional (somente a madeira), a remoção da madeira + resíduo ocasiona uma maior exportação de nutrientes, reduzindo sua disponibilidade no solo (ACHAT et al., 2015).

Sendo assim, a seleção do sistema de colheita adequado se torna imprescindível para se alcançar elevadas e constantes produtividades ao longo das rotações em plantios florestais. Para auxiliar na seleção do melhor sistema, alguns parâmetros podem ser utilizados, como por exemplo o coeficiente de utilização biológica (CUB) e o número potencial de rotações (NPR).

O CUB corresponde à taxa de conversão de nutrientes em biomassa (BARROS et al., 1986). Este coeficiente representa, conjuntamente, os fatores que influenciam a concentração de nutrientes, como por exemplo a espécie (capacidade de absorção, distribuição e utilização

dos nutrientes), o componente da biomassa, características edáficas, idade da floresta, entre outros (PEREIRA et al., 1984; BINKLEY, 1986; REIS; BARROS, 1990; PALLARDY, 2008). São essas informações que tornam o CUB um dos parâmetros fundamentais para definir de técnicas de manejo adequadas e, conseqüentemente, manter a capacidade produtiva do sítio florestal (SANTANA et al., 2002).

O segundo parâmetro, que também serve como subsídio para a tomada de decisão quanto à seleção de sistemas de colheita, é o número potencial de rotações. O NPR, obtido pela razão entre a quantidade de nutrientes que é removida pela quantidade de nutrientes que é mantida no sistema, possibilita determinar o número de rotações que certa área poderá suportar, baseado no sistema de extração utilizado.

Aliado a isso, a quantificação da serapilheira depositada no piso florestal durante o curto ciclo da floresta é outro fator relevante a ser considerado na manutenção da produtividade do sítio (SALVADOR, 2015). Tal elemento se torna ainda mais importante quando se considera solos de baixa fertilidade natural, com alto risco de degradação física, como é o caso dos solos predominantes no bioma Pampa, o qual abrange as regiões sul do Brasil, norte do Uruguai e nordeste da Argentina (PALLARÉS et al., 2005). Nesses solos, por apresentarem uma baixa retenção de nutrientes, associada a uma alta condutividade hidráulica (maior capacidade de perda de nutrientes por lixiviação), a deposição de serapilheira tem papel fundamental (SILVA et al., 2013; LUDVICHAK et al., 2016). Neste material, são acumuladas quantidades significativas de nutrientes, que após a sua decomposição, retornam ao solo e são absorvidos novamente pelas árvores (BELLOTE et al., 2008).

Dessa forma, a realização de estudos que quantifiquem os nutrientes exportados pela colheita da biomassa, bem como o estoque que é mantido no sistema, se torna essencial para desenvolver estratégias de uso sustentado desses ecossistemas, servindo como base para entender a dinâmica nutricional em plantações florestais (VIERA et al., 2011).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização geral da área experimental

4.1.1. Localização

O estudo foi realizado em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, pertencente à empresa Montes Del Plata, localizado na cidade de Durazno, Departamento de Durazno – Uruguai, sob a coordenada geográfica central: 32°42'01.01" de latitude sul e 55°38'56.26" de longitude oeste (Figura 1).

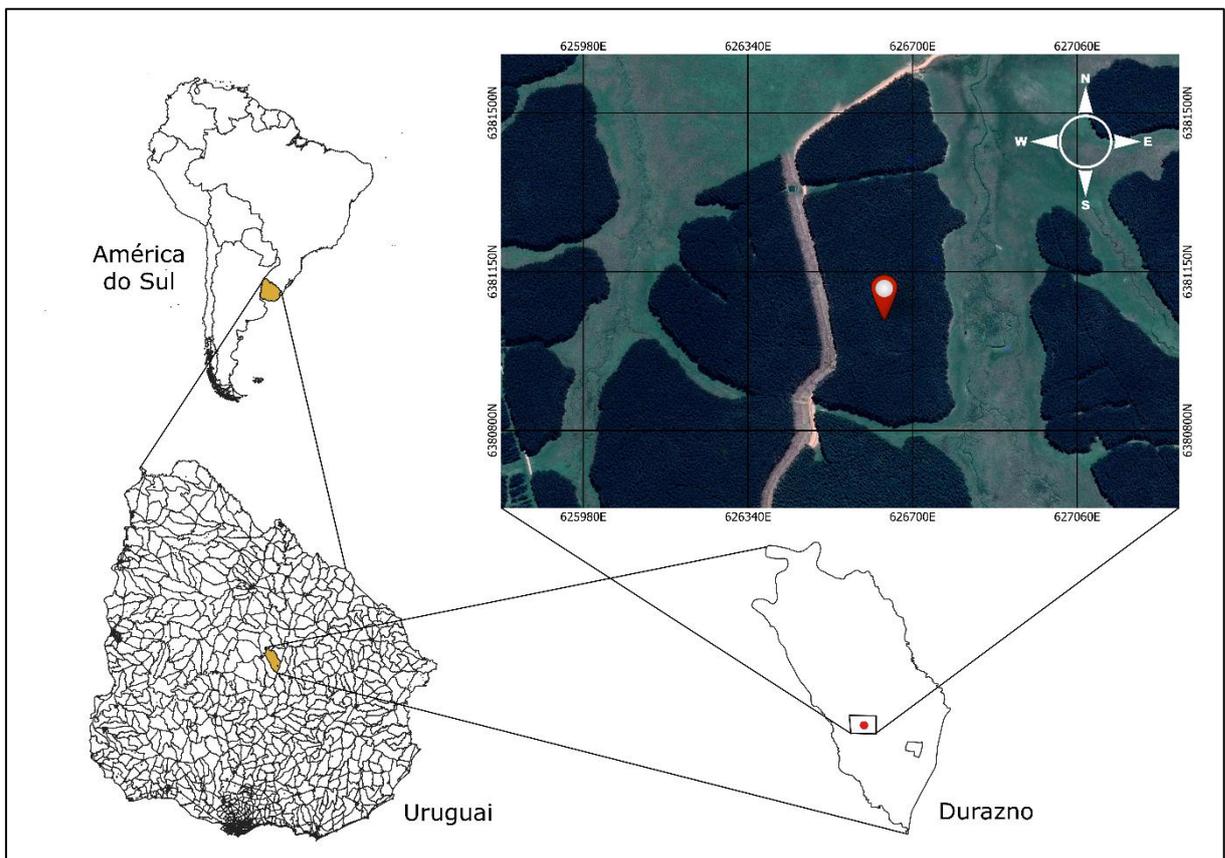


Figura 1. Localização da área de estudo, no município de Durazno, Departamento de Durazno – Uruguai.

FONTE: O Autor (2020).

O plantio foi estabelecido no ano de 2008, seguindo espaçamento de 3,5 m x 2,14 m (1336 plantas por hectare). A região apresenta relevo suavemente ondulado, sendo que, anteriormente, a área de estudo destinava-se à prática da pecuária. O estudo foi realizado na

época de colheita do povoamento, especificamente em novembro de 2019, quando este se encontrava com 11 anos de idade.

4.1.2. Características climáticas

O clima da região de estudo corresponde ao tipo subtropical temperado (CASTAÑO et al., 2011). Na Figura 2, está apresentado o diagrama climático da região, considerando o período entre 2008 e 2019, referentes ao ano de plantio e o ano de colheita, respectivamente. A temperatura média mensal da região foi de 17,3 °C, variando de 6,3 a 30,1 °C, enquanto que a precipitação média anual foi de 1557,3 mm. A partir dos dados apresentados no diagrama, observa-se que, na maioria dos meses, com exceção dos meses de janeiro, março e dezembro, houve excedente de água disponível às plantas, considerando os dados médios de precipitação e evapotranspiração, indicando que não houveram períodos de restrição hídrica ao longo do desenvolvimento do povoamento.

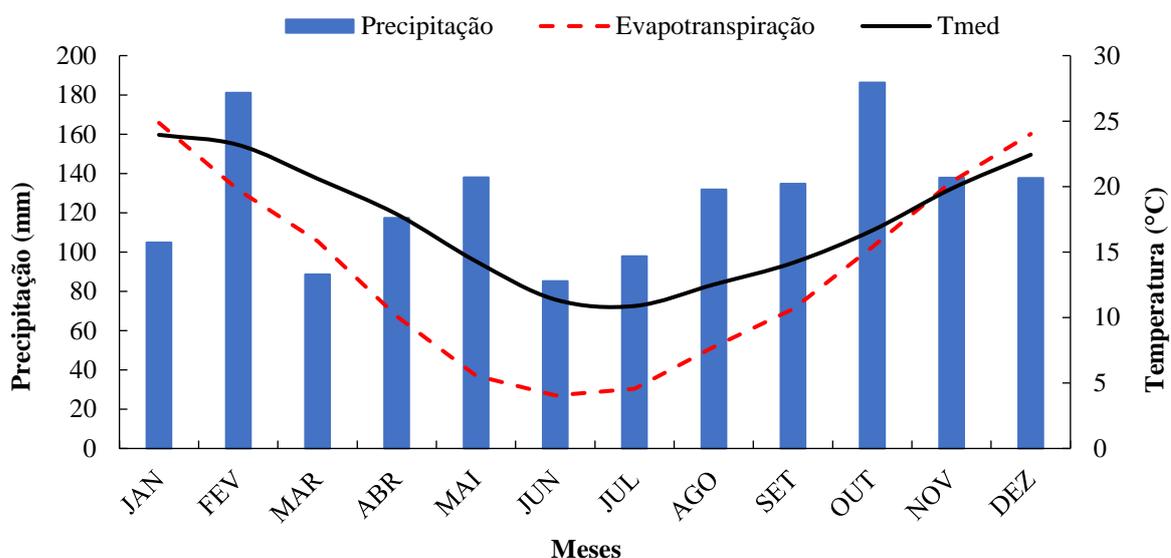


Figura 2. Diagrama climático da região de estudo (valores médios entre os anos de 2008 e 2019).

FONTE: INIA (2020).

4.1.3. Características de solo

O solo da área de estudo foi classificado como Brunossolo Dístico Lúvico, profundo, de cor marrom-amarelada escura, textura franco-argilosa arenosa, bem drenados e de fertilidade

muito baixa a baixa (CONEAT, 1994). No local, foi realizada a coleta de amostras de solo, nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm, para caracterização das propriedades físicas e químicas e, posteriormente, serem estimados os estoques de nutrientes no mesmo. Alguns dos atributos analisados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores dos atributos físico-químicos do solo na área de estudo.

Prof. (cm)	Densidade g cm^{-3}	pH	MO %	CTC _{pH7}	K	Ca	Mg	P*	B	Zn
					$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$			mg dm^{-3}		
0-20	1,28	4,20	1,80	12,73	0,17	4,30	2,43	3,33	0,77	2,30
20-40	1,51	4,27	1,43	13,30	0,18	3,87	4,20	2,67	1,23	1,30
40-60	1,50	4,87	0,70	20,00	0,33	7,80	7,73	2,00	1,40	1,33

Onde: Prof = profundidade avaliada; MO = matéria orgânica; *P extraído pelo método Bray-I.

Observa-se, nas três profundidades avaliadas, que o pH do solo ficou abaixo de 5,0, sendo, assim, classificado como pH muito baixo pela CQFS (2004). Quanto à matéria orgânica do solo, verifica-se, segundo esta mesma classificação, baixos valores em ambas as profundidades.

Quanto aos valores da CTC_{pH7}, verificou-se que, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, os valores de 12,73 e 13,30 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, foram classificados como sendo médios, de acordo com a CQFS (2004). Já a camada de 40-60 cm, seguindo esta mesma classificação, por apresentar uma CTC_{pH7} de 20,00 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, é caracterizada como alta, possuindo, assim, uma grande capacidade de retenção de cátions.

Segundo a CQFS (2004), quando os teores de Ca e Mg são superiores a 4,0 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, estes são considerados altos. Dessa forma, observa-se que em todas profundidades os teores de nutrientes encontram-se acima deste nível, com exceção do Ca na camada de 20 – 40 cm, que é considerado médio, de acordo com esta classificação.

4.2. Biomassa do eucalipto

4.2.1. Amostragem e determinação da biomassa

Para determinação da biomassa acima do solo do eucalipto, realizou-se, inicialmente, a medição de parcelas para caracterização diamétrica do povoamento. Foram distribuídas 3 parcelas com dimensões de 21,0 m x 25,7 m, nas quais foram medidos todos os DAPs (1,30 m

acima do nível do solo) das árvores contidas nessa área. De posse dos dados, os indivíduos foram divididos em 5 classes diamétricas, com base na equação:

$$a = \frac{(Ls - Li)}{k}$$

Onde:

a = amplitude de classe, em cm;

Ls = Limite superior (equivalente ao maior diâmetro medido, em cm);

Li = Limite inferior (equivalente ao menor diâmetro medido, em cm);

k = número de classes (equivalente a 5).

Após a definição das classes, foram amostradas 10 árvores, sendo 2 em cada uma das classes diamétricas. Os indivíduos selecionados foram seccionados ao nível do solo e a biomassa foi dividida nos seguintes componentes: folha, galho, lenho do fuste, casca do fuste, lenho do ponteiro e casca do ponteiro. Como definição, considerou-se como ponteiro toda secção da tora com diâmetro < 5,0 cm, conforme ilustrado na Figura 3. Todo o material foi pesado em campo, com o auxílio de uma balança de gancho, para determinação da biomassa úmida.

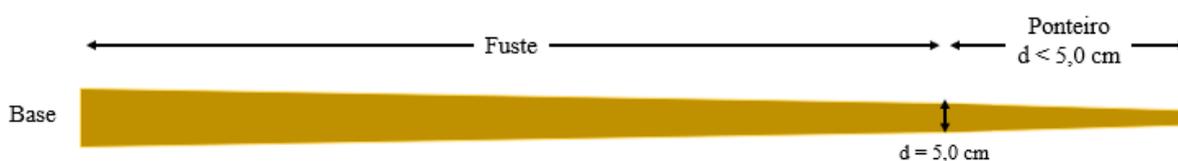


Figura 3. Caracterização das frações fuste comercial e ponteiro.

Objetivando-se a determinação da concentração dos nutrientes, foram obtidas amostras de cada um dos componentes. Para folhas e galhos, coletaram-se amostras representativas de cada uma das árvores, já para os componentes lenho do fuste comercial, casca do fuste comercial, lenho do ponteiro e casca do ponteiro, foram obtidas amostras de cada uma das árvores, seguindo a metodologia ilustrada na Figura 4. Após sua amostragem, o material foi acondicionado em embalagens de papel pardo, devidamente identificadas, e encaminhado ao laboratório para ser submetido à análise química de nutrientes.

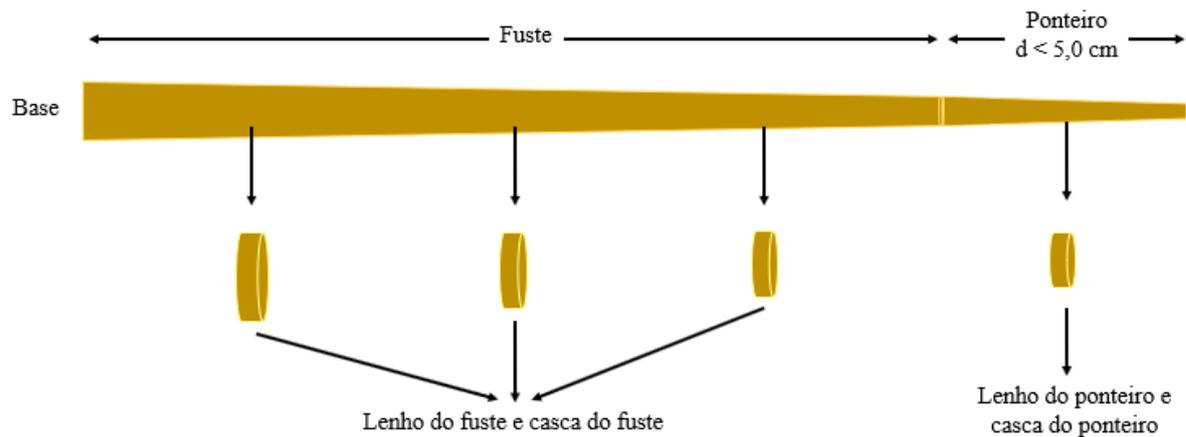


Figura 4. Metodologia para coleta de amostras de lenho e casca.

4.2.2. Estimativa da biomassa acima do solo

A estimativa da biomassa acima do solo do eucalipto foi realizada a partir do ajuste de equações de regressão. Os componentes folhas, galhos, lenho do fuste, casca do fuste e lenho do ponteiro foram considerados como variáveis dependentes e os valores do DAP e suas variações como sendo variáveis independentes.

A modelagem das equações foi realizada com o auxílio do aplicativo SAS 9.4, seguindo o procedimento *Stepwise*. A partir das equações ajustadas e dos dados inventariados, calculou-se a biomassa total dentro de cada parcela, e, posteriormente, estimou-se a quantidade por hectare a partir da extrapolação com base na área da parcela.

4.3. Serapilheira acumulada

Para quantificação da serapilheira acumulada sobre o solo, foram coletadas, com o auxílio de uma moldura de 25 cm x 25 cm, 24 amostras, sendo 8 alocadas na linha de plantio, 8 na entrelinha e 8 na diagonal entre quatro árvores, com o objetivo de abranger a variabilidade existente no acúmulo de material nestas diferentes posições. Devido às diferenças das frações quanto às suas propriedades químicas, as amostras foram divididas em folhas, galhos e casca, para posterior análise. Em seguida, o material foi colocado em sacos de papel, com sua respectiva identificação, e encaminhado ao laboratório. A estimativa da serapilheira acumulada foi calculada com base na área da moldura e da biomassa média das amostras, sendo esta extrapolada para a área de um hectare.

4.4. Estoque de nutrientes no solo

O estoque de nutrientes (P, K, Ca e Mg) no solo foi calculado a partir das concentrações desses elementos, convertendo os valores de $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ e mg dm^{-3} para kg ha^{-1} por meio das suas respectivas massas atômicas e densidade do solo em cada profundidade avaliada.

Com relação à quantificação do estoque de nitrogênio no solo, para efeito de cálculo, considerou-se 10% da matéria orgânica (MO) como disponível às plantas, devido a sua presença em formas pouco ou não disponíveis (GONÇALVES et al., 2001).

4.5. Quantificação do estoque de nutrientes totais na biomassa

As amostras da biomassa coletadas a campo foram secas, a fim de calcular a massa seca e determinar os seus respectivos teores de umidade, e submetidas à análise química, para determinação da concentração dos nutrientes.

Foram analisados os macronutrientes N, P, K, Ca e Mg e os micronutrientes B, Cu, Zn, Mn, Fe. O nitrogênio foi determinado pelo método *Kjeldahl* (digestão sulfúrica = $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$); potássio por fotometria de chama; cálcio e magnésio pelo método da cinza seca; fósforo e zinco por espectrofotometria de absorção atômica; e boro, cobre, manganês e ferro por espectroscopia de emissão atômica (ICP). Todas as análises químicas foram realizadas seguindo a metodologia do AOAC (2012).

A estimativa do estoque de nutrientes nas árvores de eucalipto foi obtida através do produto entre a biomassa seca de cada componente, por hectare, e as suas respectivas concentrações.

4.6. Simulação da exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita

A estimativa da exportação de nutrientes foi calculada com base no estoque de nutrientes na biomassa considerando três cenários de colheita:

- I. *Full tree* (remoção da biomassa acima do solo);
- II. *RMa + Ca* (remoção da madeira com casca);
- III. *Cut-to-length* (remoção somente do fuste comercial sem casca).

4.7. Coeficiente de Utilização Biológica (CUB) e Número Potencial de Rotações (NPR)

O coeficiente de utilização biológica foi obtido pela relação entre a quantidade de biomassa de cada componente e os nutrientes nesta distribuídos, ambos com a mesma unidade, de acordo com a equação abaixo:

$$CUB = \frac{\text{Quantidade de biomassa}}{\text{Quantidade de nutriente}}$$

O número potencial de rotações foi utilizado para avaliar o impacto das diferentes intensidades de colheita na sustentabilidade nutricional. O cálculo do NPR de 11 anos para *Eucalyptus dunnii*, conforme o sistema de colheita, foi realizado segundo as equações apresentadas abaixo:

$$NPR_{full\ tree} = \frac{NS + NSA}{NF + NG + NL + NC + NP}$$

$$NPR_{RMa+Ca} = \frac{NS + NSA + NF + NG + NP}{NL + NC}$$

$$NPR_{cut-to-length} = \frac{NS + NSA + NF + NG + NC + NP}{NL}$$

Onde:

NS = estoque de nutrientes no solo, até 60 cm de profundidade, em kg ha⁻¹;

NSA = quantidade de nutrientes na serapilheira acumulada, em kg ha⁻¹;

NF = quantidade de nutrientes no componente folha, em kg ha⁻¹;

NG = quantidade de nutrientes no componente galho, em kg ha⁻¹;

NL = quantidade de nutrientes no componente lenho do fuste comercial, em kg ha⁻¹;

NC = quantidade de nutrientes no componente casca do fuste comercial, em kg ha⁻¹;

NP = quantidade de nutrientes no componente ponteiro, em kg ha⁻¹;

4.8. Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do aplicativo SAS 9.4, ao nível de 5% de probabilidade de erro. Para separação dos contrastes das médias, utilizou-se o teste de Tukey, sendo considerado um delineamento inteiramente casualizado, no qual cada árvore analisada corresponde a uma repetição para cada componente da biomassa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Estoque de nutrientes no solo

O estoque de nutrientes disponíveis no solo até a profundidade de 60 cm está apresentado na Tabela 2. Pode-se observar que há uma grande variação nestes valores em relação à profundidade avaliada. Para o N, P, e Zn, maiores estoques foram verificados na camada superficial (0-20 cm) e, em contrapartida, para os elementos K, Ca, Mg e B houve maior quantidade alocada na camada mais profunda (40-60 cm).

Tabela 2. Valores das quantidades de nutrientes disponíveis no solo na área de estudo.

Profundidade (cm)	N*	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	kg ha ⁻¹						
0-20	360,0	6,7	132,9	1720,0	590,8	1,5	4,6
20-40	286,0	5,3	140,8	1548,0	1021,1	2,5	2,6
40-60	140,0	4,0	258,1	3120,0	1879,3	2,8	2,7
Total	786,0	16,0	531,8	6388,0	3491,2	6,8	9,9

*10% como disponível.

A maior quantidade de N disponível às plantas encontra-se na camada superficial, pelo fato deste elemento estar diretamente relacionado à matéria orgânica (MENGEL, 1996; PULROLNIK et al., 2009). Já a redução do estoque de P em profundidade se dá pelo fato deste elemento apresentar baixa mobilidade, sendo, assim, pouco lixiviado às camadas inferiores (SOPRANO & ALVAREZ, 1989). Por outro lado, o aumento dos estoques de K com o aumento da profundidade relaciona-se à presença de apenas uma carga de valência deste elemento (K⁺), sendo pouco adsorvido nos colóides do solo (ERNANI et al. 2007), além de, em solos bem drenados e com baixa CTC, o processo de lixiviação ocorrer com maior intensidade (RAIJ, 2011). A mesma tendência pode ser observada para o Ca e Mg, os quais aumentaram seus estoques com o aumento da profundidade, pelo fato de serem elementos considerados de grande mobilidade no solo, também observado no trabalho de Ludvichak (2016).

A ordem decrescente de magnitude dos estoques de nutrientes foi: Ca > Mg > N > K > P > Zn > B. Observa-se que as maiores quantidades de nutrientes acumulados no solo foram representadas pelos elementos Ca e Mg. Em contrapartida, considerando os macronutrientes, o

P foi o que apresentou o menor estoque, com apenas 16 kg ha⁻¹, evidenciando, dessa forma, a baixa disponibilidade deste elemento no solo.

5.2. Características dendrométricas

Na Tabela 3, verificam-se os valores das variáveis dendrométricas medidas nas parcelas instaladas no povoamento.

Tabela 3. Variáveis dendrométricas do povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Índices	N	Idade	DAP	H	G	V
	árv ha ⁻¹	anos	cm	m	m ² ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
Média	1260	11	20,00	25,7	43,62	394,37
DesvPad	-	-	6,41	4,88	1,85	46,32
CV%	-	-	32,05	18,97	4,25	11,75

Onde: N = número de árvores por hectare; DAP = diâmetro à altura do peito (1,30 m da superfície do solo); H = altura média; G = área basal média por hectare; V = volume médio por hectare.

Observa-se que, após 11 anos houve um decréscimo no número de árvores por hectare, o qual foi de 1335 árv ha⁻¹ (considerando espaçamento de 3,5 m x 2,14 m) para 1260 árv ha⁻¹, representando uma perda de 5,6% de indivíduos do plantio até a idade de corte. Essa redução no número de indivíduos após o plantio está relacionada à taxa de mortalidade, podendo esta ser atribuída, entre outras, à competição entre plantas, derrubada pelo vento ou ataque de pragas/doenças.

Os valores referentes às variáveis diamétricas observadas estão diretamente relacionados ao espaçamento e à idade do povoamento. Viera e Schumacher (2017), estudando um povoamento de *Eucalyptus saligna* com 18 meses instalado no bioma Pampa com densidade de 1422 árvores ha⁻¹, observaram um DAP médio de 7,4 cm. Salvador (2015), em estudo com *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade e em um espaçamento de 1333 árvores ha⁻¹, verificou um diâmetro médio de 17,94 cm. Já Viera et al. (2013) ao avaliar um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* aos 10 anos de idade em Eldorado do Sul com 1142 árvores ha⁻¹, obtiveram um diâmetro médio de 20,16 cm, valor similar ao do presente estudo, considerando as condições de idade e densidade populacional.

Quanto aos dados de volume, observa-se que, apesar da baixa fertilidade natural do solo, o povoamento apresentou boa produtividade. Comparando-se com trabalhos da mesma espécie,

o presente estudo encontrou valores intermediários. Estudando a produtividade de diferentes espécies de *Eucalyptus* em diferentes locais, Morales (2013) verificou que o *E. dunnii*, aos 7 anos de idade, apresentou volume médio de 294 m³ ha⁻¹. Já Costa (2015), avaliando prognoses de crescimento para *E. dunnii*, encontrou, para as idades de 9,5 e 10,5 anos, 329,8 e 445,9 m³ ha⁻¹, respectivamente. Tais distinções na produtividade volumétrica estão relacionadas à diversos fatores, como, por exemplo, ao espaçamento utilizado e às condições edafoclimáticas em que o povoamento se encontra inserido.

Utilizando-se da metodologia empregada na Equação 1, os diâmetros foram divididos nas seguintes classes: 6,1-11,9; 12,0-17,8; 17,9-23,7; 23,8-29,6 e 29,7-35,5. Observa-se que a maior parte dos indivíduos (57%) se encontra nas classes intermediárias, ou seja, está entre os diâmetros de 12,0 e 23,7 cm (Figura 5). De acordo com Finger (1992), as maiores frequências em número de árvores por hectare situam-se em torno do diâmetro médio do povoamento, decrescendo para os maiores e menores valores de diâmetro, sendo esta uma característica de povoamentos equiâneos.

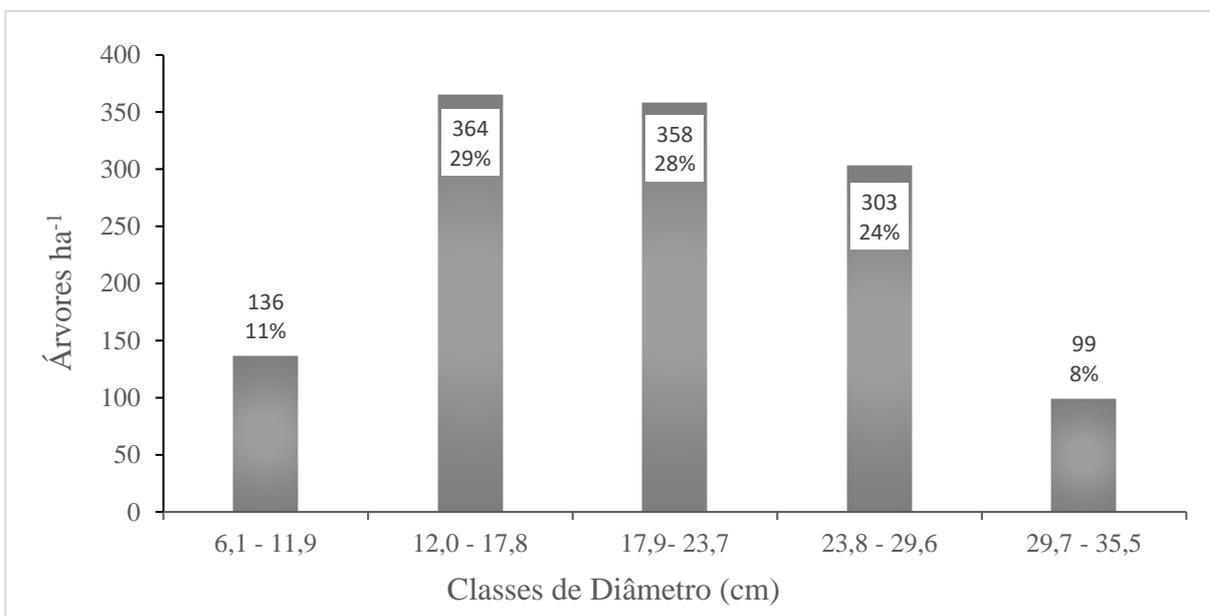


Figura 5. Distribuição das árvores de eucalipto nas diferentes classes diamétricas em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Outros autores também verificaram esta tendência quanto à distribuição das árvores nas classes diamétricas. Consensa (2017), estudando *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade, verificou que 80% dos indivíduos encontravam-se nas classes de diâmetro intermediárias, compreendidos entre 15,5 e 27,9 cm. Da mesma forma, Viera et al. (2013) observaram que, em

um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, 70% dos indivíduos apresentaram diâmetro entre 17,1 e 25,0 cm, ou seja, o maior número de árvores concentrou-se nas classes de diâmetro intermediárias.

5.3. Biomassa

A equação utilizada para estimar os componentes da biomassa já foi empregada em outros trabalhos (CALDEIRA et al., 2002; VIERA, 2012; CARVALHO, 2014), assim como os indicadores da precisão do ajuste da equação, sendo eles: o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa, ambos descritos por Finger (1992).

Na Tabela 4, verifica-se a equação utilizada para estimativa da biomassa acima do solo, juntamente com os coeficientes para cada um dos componentes da biomassa e suas respectivas estatísticas de precisão. Pode-se observar que a equação empregada apresentou boa predição das variáveis analisadas, devido ao alto coeficiente de determinação ajustado e ao baixo erro padrão da estimativa.

Tabela 4. Parâmetros e estatística de ajuste do modelo de regressão utilizado para estimar a biomassa acima do solo de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Componente	Coeficientes/modelo de regressão			
	ln Y = a + b lnDAP			
	a	b	R ² ajus (%)	Syx
Folha	-6,6584	2,9236	0,9592	0,2577
Galho	-6,0493	2,9864	0,9542	0,2794
Lenho do Fuste	-1,5811	2,4240	0,9816	0,1420
Casca do Fuste	-3,1499	2,3703	0,9700	0,1781
Lenho do Ponteiro	2,1573	-0,4428	0,7938	0,1018
Casca do Ponteiro	-5,3145	1,4933	0,8210	0,1593

Onde: DAP = diâmetro à altura do peito, em cm; Y = variável dependente (biomassa em kg por árvore); ln = logaritmo natural; a e b = coeficientes da equação de regressão; R²ajus = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro padrão da estimativa.

O total de biomassa acima do solo encontrada no povoamento de *Eucalyptus dunnii* com 11 anos foi de 256,2 Mg ha⁻¹ (Tabela 5). Vários autores desenvolveram estudos de quantificação de biomassa com diferentes espécies e sob diferentes condições. Em um povoamento de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos de idade, Consensa (2017) encontrou 222,12 Mg ha⁻¹ de biomassa aérea. Já Salvador (2015), em um povoamento de *Eucalyptus urograndis* com a

mesma idade, encontrou 214,95 Mg ha⁻¹ e 264,26 Mg ha⁻¹ de biomassa aérea em solo arenoso e argiloso, respectivamente. Viera et al. (2013), ao estudar *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* aos 10 anos de idade em Eldorado do Sul – RS, encontrou 198,5 Mg ha⁻¹ de biomassa acima do solo.

Tabela 5. Biomassa dos componentes das árvores (Mg ha⁻¹) em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Índices	Folha	Galho	Lenho Fuste	Casca Fuste	Lenho Ponteiro	Casca Ponteiro	Total
Média (Mg ha ⁻¹)	6,21	15,27	204,01	29,06	1,42	0,23	256,2
DesvPad (Mg ha ⁻¹)	0,04	0,09	1,10	0,19	0,0017	0,0005	-
CV%	5,34	5,45	4,66	4,61	0,96	1,11	-

Onde: DesvPad = desvio padrão da média; CV = coeficiente de variação; Total = Biomassa total do eucalipto.

Essas diferenças no acúmulo de biomassa acima do solo verificadas pelos autores podem ser resultado de uma série de fatores. Dentre eles, o uso de diferentes espécies nesses trabalhos tem relevância, devido às especificidades de cada uma delas. Considerando esses aspectos, a densidade básica da madeira tem influência nos resultados quando se estuda a biomassa de povoamentos, por serem duas variáveis que estão relacionadas. Dessa forma, a maior densidade da madeira de *E. dunnii* em comparação à outras espécies, já evidenciado por alguns trabalhos (BATISTA et al., 2010), pode explicar os maiores resultados de biomassa no presente estudo.

Além das espécies, outros fatores que podem interferir significativamente no acúmulo de biomassa no povoamento são as condições de desenvolvimento de cada local, como por exemplo a qualidade do sítio e o espaçamento entre plantas. Este aspecto foi verificado por Resquin et al. (2019), os quais, estudando a influência da densidade de plantas no acúmulo de biomassa acima do solo de *E. benthamii*, *E. dunnii* e *E. grandis* em dois locais no Uruguai (Tacuarembó e Paysandú), observaram maior estoque de biomassa no *E. benthamii* em Tacuarembó (212,6 Mg ha⁻¹) e no *E. grandis* em Paysandú (224,1 Mg ha⁻¹), ambos nas maiores densidades de plantio.

Com relação à proporção de biomassa nos diferentes componentes da planta, observou-se que a maior quantidade correspondeu ao componente lenho do fuste comercializável, com 79,6% do total, seguido pelos componentes casca do fuste, galho, folha, lenho do ponteiro e casca do ponteiro, os quais representaram 11,3%; 6,0%; 2,4%; 0,6% e 0,1%, respectivamente

(Figura 6). Dessa forma, o ponteiro, com $1,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, e o lenho do fuste, com $204,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, foram os componentes que apresentaram, respectivamente, o menor e o maior valor da biomassa acima do solo.

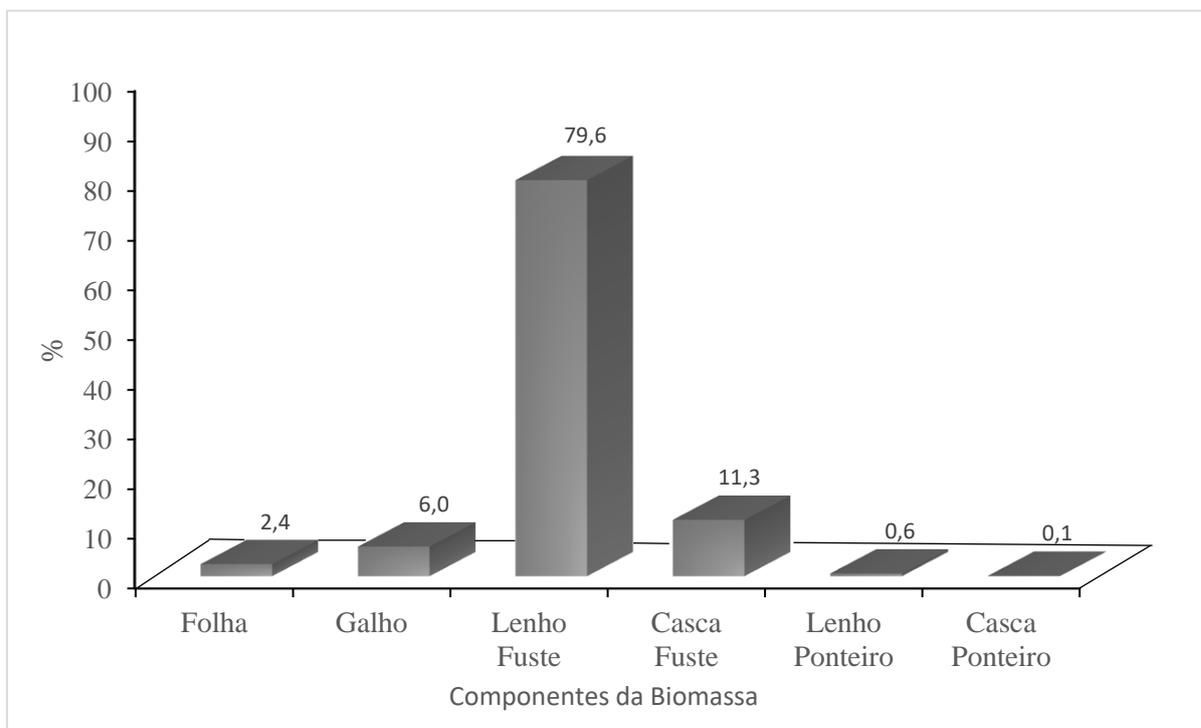


Figura 6. Distribuição relativa da biomassa acima do solo nos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Outros autores encontraram resultados semelhantes quanto à distribuição da biomassa nos diferentes componentes. Souza e Fiorentin (2013), ao estudar a biomassa em um povoamento de *Eucalyptus grandis* com 11 anos de idade em Santa Maria – RS, verificaram uma alocação percentual de 72%, 14,5%, 8,4% e 5% para madeira, galhos, casca e folhas.

Segundo Curlin (1970), a biomassa acima do solo é distribuída na seguinte ordem: lenho do fuste > galhos > casca > folhas. No presente estudo, a distribuição da biomassa nos componentes seguiu a ordem: lenho do fuste > casca > galhos > folhas, na qual madeira + casca representou 91,6% do total. De acordo com Gonçalves et al. (2000), a explicação para esta distribuição de biomassa nos diferentes componentes ao longo do desenvolvimento dos povoamentos florestais está nas fases nutricionais das árvores.

A diminuição da porcentagem de folhas com o avanço da idade do povoamento é resultado da movimentação de boa parte dos carboidratos, que antes estavam presentes na copa e, após o início da competição entre as árvores, são direcionados à produção de lenho (SCHUMACHER e CALDEIRA, 2001).

5.4. Nutrientes na biomassa

5.4.1. Concentração de nutrientes

Na Tabela 6 estão apresentadas as concentrações dos nutrientes na biomassa de *Eucalyptus dunnii*. Pode-se observar que os valores desses elementos variam em função do componente amostrado. Com exceção do Ca e Fe, que estiveram em maior quantidade na fração casca do fuste, e do Mg e Mn, mais concentrados na fração casca do ponteiro, os demais nutrientes estão mais concentrados na fração folhas.

Tabela 6. Concentrações de nutrientes nos componentes da biomassa acima do solo em povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Comp.	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
F	16,56a <i>±1,59*</i>	1,13a <i>±0,18</i>	9,81a <i>±3,21</i>	5,00bc <i>±2,45</i>	2,67b <i>±1,12</i>	62,67a <i>±11,38</i>	12,67a <i>±2,00</i>	19,89ab <i>±2,67</i>	1221,11a <i>±387,47</i>	144,11a <i>±40,61</i>
G	4,00bc <i>±0,71</i>	0,34b <i>±0,09</i>	2,74bc <i>±0,47</i>	8,56b <i>±1,13</i>	2,33b <i>±0,50</i>	12,11bc <i>±1,54</i>	11,89a <i>±1,17</i>	17,11ab <i>±3,55</i>	672,00ab <i>±133,02</i>	58,13a <i>±23,27</i>
LF	1,61d <i>±0,66</i>	0,24b <i>±0,19</i>	0,42c <i>±0,12</i>	2,11cd <i>±1,05</i>	0,67c <i>±0,34</i>	3,33d <i>±0,71</i>	2,44c <i>±0,53</i>	3,75c <i>±1,28</i>	59,44b <i>±14,60</i>	73,13a <i>±63,28</i>
CF	3,08cd <i>±0,24</i>	0,33b <i>±0,05</i>	3,77b <i>±1,24</i>	20,78a <i>±3,27</i>	3,89a <i>±0,78</i>	10,33cd <i>±2,40</i>	4,89bc <i>±0,93</i>	12,22bc <i>±3,73</i>	871,25a <i>±323,87</i>	157,44a <i>±129,57</i>
LP	3,04cd <i>±0,96</i>	0,25b <i>±0,09</i>	1,39c <i>±0,96</i>	1,44d <i>±0,53</i>	0,39c <i>±0,13</i>	3,56d <i>±1,24</i>	3,75bc <i>±0,71</i>	4,56c <i>±1,51</i>	71,63b <i>±9,46</i>	62,25a <i>±28,39</i>
CP	4,78b <i>±1,64</i>	0,37b <i>±0,03</i>	3,80b <i>±0,98</i>	16,89a <i>±5,69</i>	4,00a <i>±1,50</i>	17,78b <i>±4,06</i>	5,22b <i>±0,44</i>	24,56a <i>±16,42</i>	1289,22a <i>±260,06</i>	90,78a <i>±22,13</i>

Onde: Comp = componentes da biomassa; F = folhas; G = galhos; LF = lenho fuste; CF = casca fuste; LP = lenho do ponteiro; CP = casca do ponteiro. Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de erro. * Valores em itálico representam o desvio-padrão da média de cada componente.

Outros autores também verificaram esta distribuição de nutrientes entre os componentes da planta: Viera (2012), Guimarães (2014) e Consensa (2017). Nas folhas, por ser o local de maior atividade metabólica, além de ser a região onde se encontram a maioria das células vivas (responsáveis pela fotossíntese e respiração), há a tendência de ocorrer uma maior concentração de nutrientes, visando atender a esta demanda energética para o crescimento e desenvolvimento da planta (VIERA, 2012).

Com relação ao Ca e Mg, sua maior concentração na casca também foi observada em outros estudos: Hernández et al. (2009), Leite et al. (2011), Bentancor (2019). O Ca, além de

ser um elemento praticamente imóvel no floema das plantas, é constituinte estrutural da parede celular, faz parte da membrana celular e atua na ativação enzimática (EPSTEIN; BLOOM, 2006; BRUN et al., 2010), o que poderia explicar, assim, sua alta concentração na fração casca. O Mg, além de também atuar como ativador enzimático, é constituinte da molécula de clorofila, da protoclorofila e da pectina, podendo explicar sua alta concentração na casca.

5.4.2. Estoque de nutrientes

As quantidades de nutrientes acumulados nos diferentes componentes da biomassa das árvores de *Eucalyptus dunnii* estão apresentadas na Tabela 7. Para os macronutrientes, a magnitude de armazenamento apresentou a seguinte ordem decrescente: Ca > N > K > Mg > P, já para os micronutrientes, a ordem decrescente de acúmulo foi: Mn > Fe > B > Zn > Cu.

Tabela 7. Estoque de nutrientes nos componentes das árvores em povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

CB	Biom Mg ha ⁻¹	Macronutrientes (kg ha ⁻¹)					Micronutrientes (g ha ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
F	6,2	102,9	7,0	61,0	31,1	16,6	389,4	78,7	123,6	7588,0	895,5
G	15,3	61,1	5,3	41,9	130,7	35,6	185,0	181,6	261,4	10264,0	887,9
LF	204,0	328,7	49,0	86,1	430,7	136,0	680,0	498,7	765,0	12127,2	14919,2
CF	29,1	89,4	9,5	109,5	603,9	113,0	300,3	142,1	355,2	25320,8	4575,8
LP	1,4	4,3	0,4	2,0	2,0	0,6	5,0	5,3	6,5	101,5	88,2
CP	0,2	1,1	0,1	0,9	3,8	0,9	4,0	1,2	5,5	291,2	20,5
Total	256,2	587,5	71,2	301,3	1202,1	302,7	1563,8	907,6	1517,2	55692,7	21387,0

Onde: CB = componentes da biomassa; Biom = biomassa; F = folhas; G = galhos; LF = lenho fuste; CF = casca fuste; LP = lenho do ponteiro; CP = casca do ponteiro.

Observa-se, na Tabela 7, que a quantidade total de macronutrientes no povoamento de *Eucalyptus dunnii* foi de 2464,90 kg ha⁻¹, sendo que o elemento Ca apresentou o maior estoque, com 48,77%, e o P obteve a menor quantidade, com apenas 2,89%. Com relação aos micronutrientes, a quantidade total foi equivalente a 81,07 kg ha⁻¹, sendo que a maior e a menor porcentagem foram, respectivamente, para os elementos Mn (68,70%) e Cu (1,12%).

Quanto à ordem de acúmulo dos macronutrientes, resultados semelhantes foram encontrados para *E. grandis* aos 9 anos de idade em Alegrete, RS, Brasil (FREITAS et al.,

2004), *E. dunnii* aos 4 anos também em Alegrete (GUIMARÃES et al., 2015) e *E. urograndis* aos 18 meses de idade em Piratini, RS, Brasil (VIERA et al., 2012).

A maior quantidade de nutrientes, com exceção do K, Ca e Mn (que estão mais armazenados na casca do fuste), fica estocada no componente lenho do fuste (Figura 7). Mesmo apresentando, de maneira geral, baixas concentrações, o lenho apresentou os maiores estoques de nutrientes, estando relacionado à sua grande quantidade de biomassa em comparação aos demais componentes. O armazenamento dos nutrientes nos componentes da biomassa acima do solo seguiu a ordem: lenho do fuste > casca do fuste > galhos > folhas > ponteiro (lenho + casca).

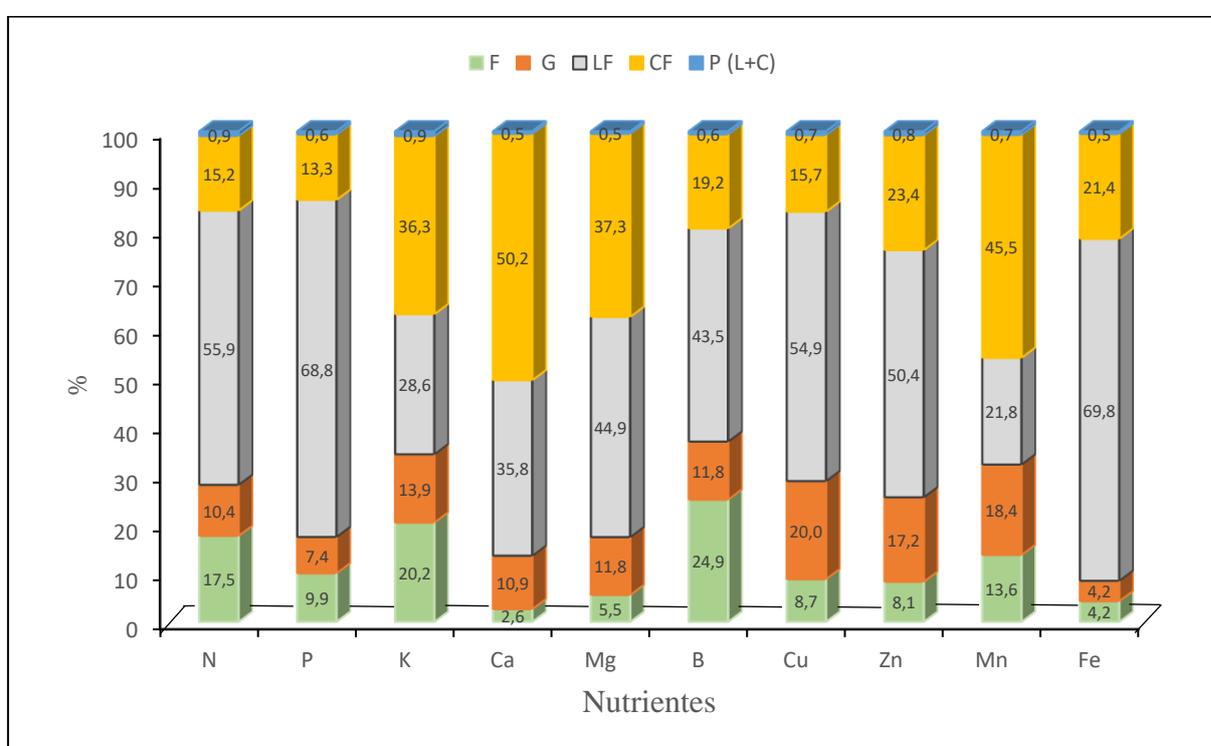


Figura 7. Partição relativa (%) dos nutrientes nos componentes da biomassa em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

5.5. Nutrientes na serapilheira acumulada

A quantidade de serapilheira acumulada sobre o solo na área de estudo foi de 18,2 Mg ha⁻¹, dos quais 33,57% foi representado pela fração folhas, 51,90% pelos galhos e 14,53% pela fração casca.

Resultados semelhantes foram verificados por outros autores quanto à biomassa da serapilheira acumulada. Santos et al. (2020), estudando um povoamento de *Eucalyptus dunnii* com 23 anos de idade em Santa Maria – RS, encontraram 17,61 Mg ha⁻¹. Salvador (2015), em

um povoamento de *E. urograndis* aos 7 anos de idade, encontrou valores de 17,35 e 20,93 Mg ha⁻¹, para solo arenoso e argiloso, respectivamente. Já Carvalho et al. (2015), ao estudar um povoamento de *E. saligna* em São Gabriel – RS, encontrou 19,76 Mg ha⁻¹ para a biomassa da serapilheira acumulada.

Em contrapartida, valores distintos ao do presente estudo foram verificados em outros trabalhos referentes à serapilheira acumulada. Witschoreck e Schumacher (2000), estudando diferentes espécies de *Eucalyptus*, encontraram 4,05; 5,98; 11,80 e 12,28 Mg ha⁻¹ para as idades de 2, 4, 6 e 8 respectivamente. Barbosa et al. (2017), em um povoamento de *E. urophylla* aos 5 anos de idade, verificaram um total de 13,1 Mg ha⁻¹. Para a mesma espécie, aos 4,5 anos, Cunha et al. (2013) encontraram 6,85 Mg ha⁻¹ e Gama-Rodrigues e Barros (2002) obtiveram 13,5 Mg ha⁻¹ em um povoamento aos 10 anos de idade.

Vários fatores podem influenciar na quantidade de serapilheira acumulada, como por exemplo o tipo de solo, temperatura e precipitação (GODINHO et al., 2014). Além disso, a idade, densidade de plantio, diferenças genéticas entre as espécies e estabilidade alcançada pelo povoamento também são fatores que impactam o acúmulo de serapilheira sobre o solo (VIERA et al., 2010).

Na Tabela 8 estão apresentados os valores das concentrações dos macros e micronutrientes nas diferentes frações formadoras da serapilheira acumulada. Considerando os macronutrientes, observa-se que para N, P e K as maiores concentrações são encontradas na fração folhas. Já para os elementos Ca e Mg, os maiores valores são visualizados na fração galhos.

O N, P e K participam ativamente das reações metabólicas de crescimento e desenvolvimento das plantas. A maioria dessas reações ocorrem nas folhas, explicando, assim, a tendência das maiores concentrações de macronutrientes nesse componente. A maior concentração observada para o Ca está relacionada à sua baixa mobilidade e participação como componente estrutural das células do tecido vegetal, fazendo com que este elemento seja um dos últimos a ser liberado ao solo via decomposição da serapilheira (GODINHO et al., 2014).

A capacidade de retranslocação dos nutrientes móveis na planta, por meio da ciclagem bioquímica, faz com que a serapilheira produzida nos plantios de eucalipto seja muito pobre em nutrientes, especialmente em P (GAMA-RODRIGUES; BARROS, 2002).

Tabela 8. Concentrações de nutrientes na serapilheira acumulada em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Fração	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
Folhas	11,00a <i>±1,0*</i>	0,57a <i>±0,1</i>	3,03a <i>±0,5</i>	5,67b <i>±0,6</i>	2,67b <i>±0,6</i>	38,33a <i>±4,04</i>	11,33a <i>±0,58</i>	21,67a <i>±5,03</i>	1618,67a <i>±72,28</i>	382,33ab <i>±131,52</i>
Galhos	4,33b <i>±0,6</i>	0,30b <i>±0,1</i>	0,57b <i>±0,2</i>	9,67a <i>±0,6</i>	5,33a <i>±0,6</i>	10,33b <i>±1,15</i>	16,67b <i>±4,16</i>	19,67a <i>±1,15</i>	1081,00ab <i>±126,38</i>	121,67b <i>±43,15</i>
Casca	5,87b <i>±1,7</i>	0,27b <i>±0,1</i>	0,23b <i>±0,1</i>	6,33b <i>±2,1</i>	2,33b <i>±0,6</i>	11,33b <i>±0,58</i>	6,00ab <i>±1,73</i>	28,33a <i>±5,13</i>	806,67b <i>±343,01</i>	410,00a <i>±116,22</i>

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de erro. *Valores em itálico indicam o desvio padrão de cada nutriente.

Para os micronutrientes, maiores concentrações de B e Mn foram observados na fração folhas, Zn e Fe na fração casca e Cu na fração galhos. As altas concentrações de Mn e Fe, segundo Viera et al. (2010) estão relacionados às altas concentrações destes elementos no solo, as quais, pela aderência da serapilheira com as partículas de solo, acabam contaminando as amostras e superestimando tais valores.

Com relação aos estoques, observa-se que a ordem decrescente de aporte dos macronutrientes foi: Ca > N > Mg > K > P e dos micronutrientes foi Mn > Fe > Zn > B > Cu (Tabela 9). A quantidade de Ca + N corresponde a cerca de 66,8% do total de macronutrientes e a soma de Mn e Fe equivale a 96,4 % do total de micronutrientes.

Tabela 9. Estoque de nutrientes na serapilheira acumulada em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Fração	Biom	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
	Mg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					g ha ⁻¹				
Folhas	6,1	67,1	3,5	18,5	34,6	16,3	233,8	69,1	132,2	9873,9	2332,2
Galhos	9,4	40,9	2,8	5,3	91,2	50,3	97,4	157,2	185,5	10193,8	1147,3
Casca	2,6	15,5	0,7	0,6	16,7	6,2	29,9	15,8	74,8	2129,6	1082,4
Total	18,2	123,5 <i>31,0*</i>	7,0 <i>1,8</i>	24,5 <i>6,1</i>	142,4 <i>35,8</i>	72,7 <i>18,3</i>	361,2 <i>0,1</i>	242,1 <i>0,1</i>	392,4 <i>0,1</i>	22197,3 <i>5,6</i>	4562,0 <i>1,1</i>

Onde: Biom = biomassa; *valores em itálico indicam a contribuição percentual de cada nutriente no conteúdo total.

A partir dos resultados, observa-se que a quantidade de nutrientes transferidos ao solo via deposição da serapilheira é muito variável. Estes valores são influenciados diretamente pelas características funcionais de cada elemento no metabolismo da planta, da ausência ou

presença de mecanismos de conservação de nutrientes, aspectos inerentes à planta (exigências nutricionais, fenologia, parte da planta considerada, etc) e aspectos externos, como, por exemplo, condições edafoclimáticas (GODINHO et al., 2013).

5.6. Balanço de nutrientes no sistema solo-planta

Visando a manutenção da sustentabilidade dos sítios destinados à silvicultura do eucalipto, bem como a garantia da produtividade das rotações subsequentes, se torna necessário definir a melhor recomendação para o sistema de colheita, sendo esta alcançada por meio da avaliação da distribuição dos nutrientes nos componentes da árvore, apresentada na Figura 8, a qual servirá de subsídio para a elaboração do balanço nutricional em diferentes sistemas de manejo.

Pode-se observar que as folhas, apesar de sua baixa contribuição relativa na biomassa total da árvore (2,4%), estocam uma grande quantidade de nutrientes, devido às altas concentrações verificadas neste componente, sendo, principalmente, devido à sua participação nos processos metabólicos da planta. Dentre estes, destacam-se o N, K e o B, com, respectivamente, 17,5; 20,2 e 24,9% do total destes elementos distribuídos nos compartimentos da planta.

Com relação ao estoque de N na planta ($587,5 \text{ kg ha}^{-1}$), observa-se grande contribuição das folhas, galhos, casca e ponteiro, componentes considerados como “resíduos”, representando 44% do total. Da mesma forma, analisando o elemento K, podemos verificar que essa contribuição representa 71,4% do total estocado na biomassa arbórea ($301,3 \text{ kg ha}^{-1}$).

Outra análise que podemos realizar diz respeito à contribuição da serapilheira acumulada nos estoques totais de nutrientes acima do solo. Este componente apresentou significativas quantidades, especialmente para os elementos Mg (23,9%), N (20,8%) e Ca (11,8%).

Os dados referentes ao estoque de nutrientes nos componentes da biomassa foram utilizados como base para simular o impacto dos diferentes sistemas de colheita quanto à exportação desses elementos, auxiliando, dessa forma, a adequação do melhor sistema, tendo por objetivo mitigar os impactos nutricionais da colheita.

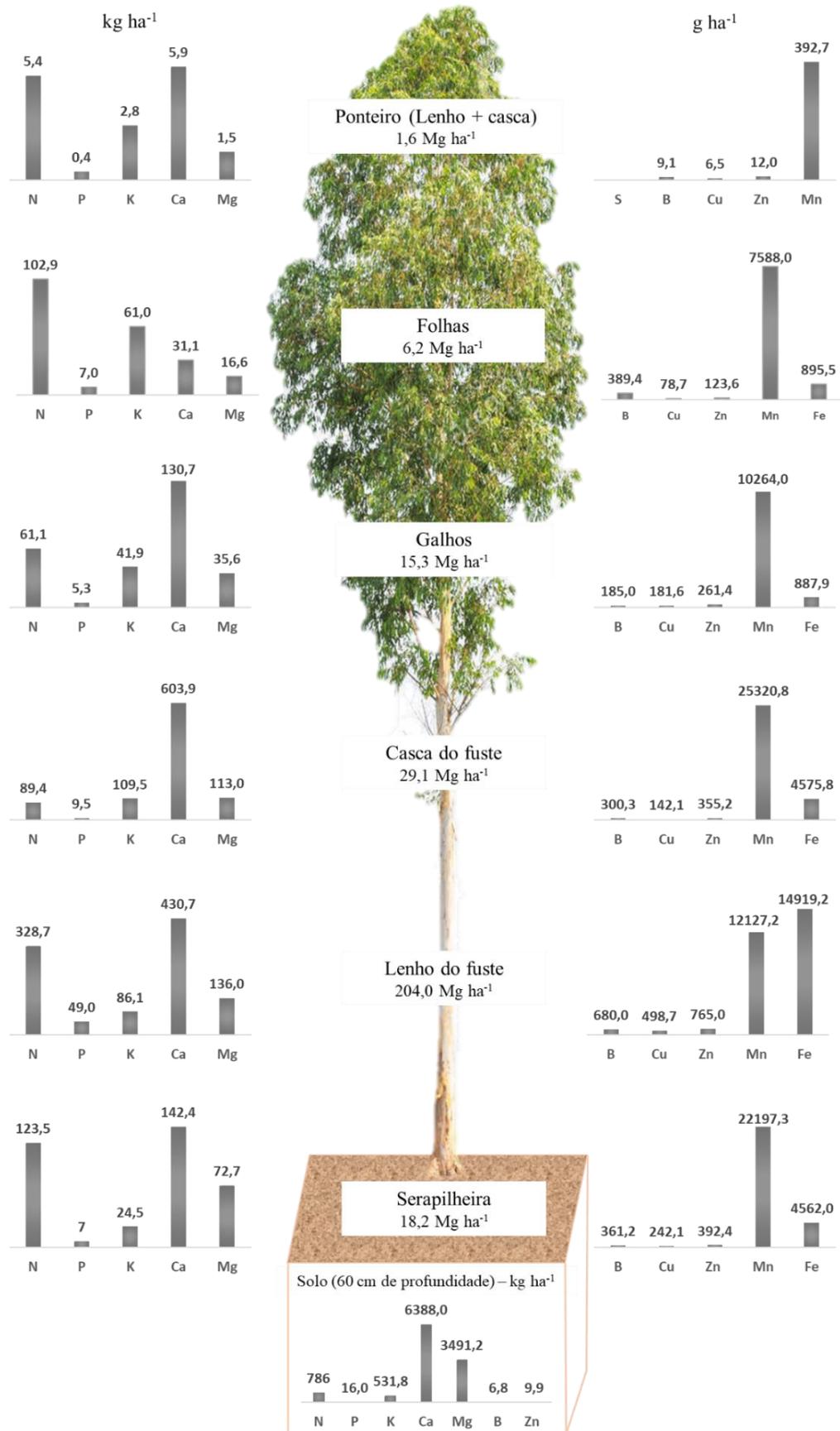


Figura 8. Estoque de nutrientes disponíveis no solo, na serapilheira acumulada e nos componentes da biomassa em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

5.7. Exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita

A colheita da biomassa e a exportação de nutrientes estão diretamente relacionadas, ou seja, quanto maior for a intensidade da colheita da biomassa, conseqüentemente, maior será a remoção de nutrientes do sítio (LUDVICHAK, 2016). Para demonstrar essa tendência, estão apresentadas, na Tabela 10, as quantidades da biomassa e nutrientes removidos e mantidos no solo, em função do sistema de colheita adotado.

Tabela 10. Quantidade de biomassa e nutrientes removidos e mantidos no solo em função do sistema de colheita de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Sistema de Colheita	Biom Mg ha ⁻¹	Macronutrientes (Kg ha ⁻¹)					Micronutrientes (g ha ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe	
Full tree	TR	256,2	587,5	71,2	301,3	1202,1	302,7	1563,8	907,6	1517,2	55692,7	21387,0
	TM	18,2	123,5	7,0	24,5	142,4	72,7	361,2	242,1	392,4	22197,3	4562,0
RMa + Ca	TR	233,1	418,1	58,5	195,6	1034,5	249,0	980,3	640,8	1120,2	37448,0	19494,9
	TM	41,3	292,8	19,7	130,2	310,1	126,4	944,6	508,9	789,4	40442,0	6454,0
Cut-to-length	TR	204,0	328,7	49,0	86,1	430,7	136,0	680,0	498,7	765,0	12127,2	14919,2
	TM	70,4	382,3	29,2	239,6	913,9	239,4	1245,0	651,0	1144,6	65762,8	11029,8

Onde: *Full tree* = remoção de toda biomassa acima do solo; *Cut-to-length* = remoção apenas da biomassa do fuste; TR = total da biomassa e nutrientes removidos; TM = total da biomassa e nutrientes mantidos.

A partir da utilização do sistema de colheita *full tree*, em que toda a biomassa acima do solo é removida, restando apenas a serapilheira acumulada, observa-se que 256,2 Mg ha⁻¹ são removidos, o que representa 93,4% do total da biomassa acima do solo. Os 18,2 Mg ha⁻¹ que permanecem sobre o solo, representado pela serapilheira acumulada, equivalem a apenas 6,6% da biomassa total. Neste sistema, o total de nutrientes removidos foi de 2,55 Mg ha⁻¹ e mantidos 0,40 Mg ha⁻¹, os quais representaram 86,49 e 13,51%, respectivamente. Da quantidade removida, o Ca foi o elemento que apresentou a maior exportação, com 1202,15 kg ha⁻¹, e o Cu foi o elemento removido em menor quantidade (0,9 kg ha⁻¹).

Estudando as implicações silviculturais da colheita da biomassa e da remoção de nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos de idade, Consensa (2017) verificou que, na colheita da árvore inteira, são removidos 222,3 Mg ha⁻¹ de biomassa, restando

17,5 e 15,9 Mg ha⁻¹, sendo equivalentes, respectivamente, à serapilheira acumulada e à biomassa do sub-bosque. No que diz respeito à exportação de nutrientes, este mesmo autor verificou que, quando a árvore inteira é colhida, 75,24% dos nutrientes são removidos e mantém-se 24,76%, desconsiderando-se os nutrientes exportados que estão contidos no sub-bosque.

A segunda simulação de colheita realizada, onde seria removido o lenho com casca, observa-se que 233,1 Mg ha⁻¹ da biomassa são retirados do local, o que equivale a 85,0% da biomassa acima do solo. Neste sistema, ficariam mantidos um total 41,3 Mg ha⁻¹, sendo representados pelos componentes folhas, galhos e ponteiro.

Já no sistema *cut-to-length*, a biomassa removida foi de 204,0 Mg ha⁻¹, equivalente à biomassa do fuste, o que representa 74,3% do total da biomassa acima do solo. O total de nutrientes removidos neste sistema foi de 1,06 Mg ha⁻¹ e mantidos 1,88 Mg ha⁻¹, os quais representaram, respectivamente, 35,99 e 64,01%.

Hernández et al. (2016), estudando o efeito do manejo dos resíduos de colheita na disponibilidade de nutrientes no solo em um povoamento de *Eucalyptus grandis* com 12 anos de idade no Uruguai, observaram que 76,5% da biomassa aérea total foi exportada, enquanto os resíduos mantidos sobre o solo totalizaram 23,5%, sendo estes valores semelhantes ao do presente estudo, sem considerar a serapilheira acumulada.

Apesar da sua baixa representatividade na biomassa total (20,4%), em comparação ao lenho do fuste (79,6%), os resíduos da colheita apresentam elevada contribuição no estoque de nutrientes. Isso está relacionado ao fato dos componentes residuais da colheita (folhas, casca, galhos e ponteiro) possuírem altas concentrações nutricionais, diferentemente da madeira, a qual, geralmente, apresenta os menores valores.

Dessa forma, o manejo adotado quanto à remoção ou manutenção dos resíduos no processo de colheita florestal tem grande impacto na quantidade de nutrientes que é mantida no sistema. Os percentuais de exportação de nutrientes, em função do sistema de colheita florestal, estão apresentados na Figura 9.

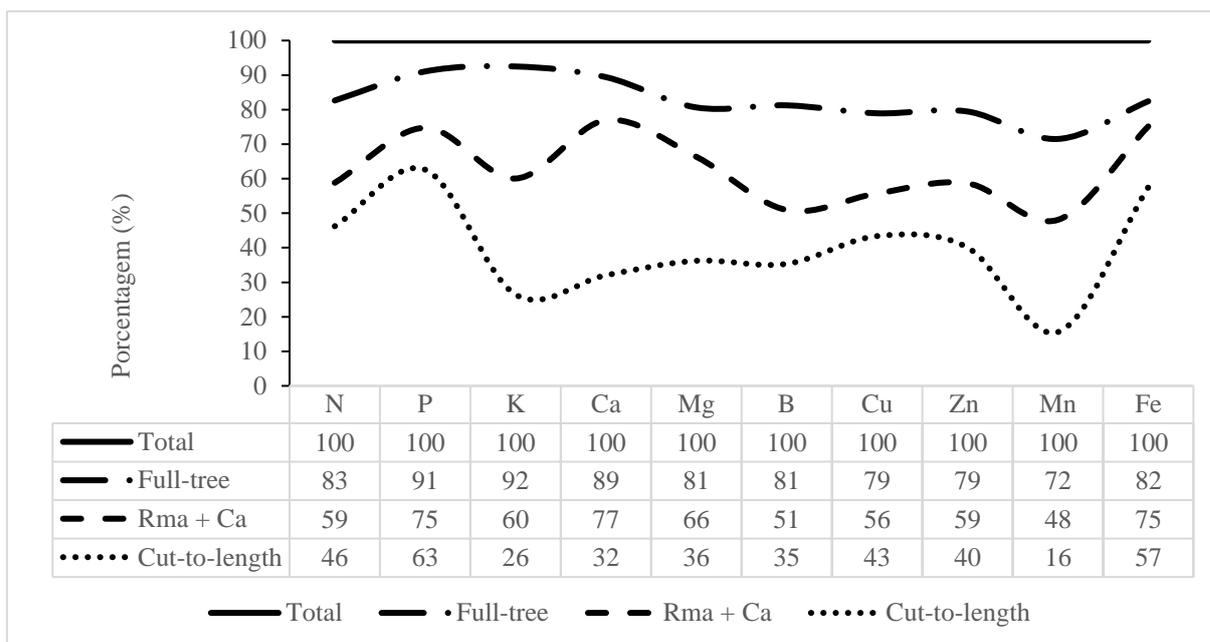


Figura 9. Porcentagens de exportação de nutrientes nos diferentes sistemas de colheita em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

De maneira geral, observa-se alta exportação de nutrientes pelo sistema *full tree*. Para os macronutrientes P, K e Ca, percebe-se que este método exportou do local em torno de 90% do estoque desses elementos. Para N, Mg, B, Cu, Zn e Fe essa exportação equivale a aproximadamente 80% e, para o Mn, fica próximo aos 72%. Com relação ao P, fica evidente que a adoção de sistemas de colheita mais intensivos, como é o caso do *full tree*, tem elevado impacto para este elemento, devido ao baixo estoque disponível deste nutriente no solo. Estudos sobre o fósforo total no solo devem ser conduzidos, pois este estoque, a longo prazo, pode ser estrategicamente importante.

Considerando a colheita onde somente a madeira com casca é removida, observam-se taxas de exportação na ordem dos 75% para Ca, P e Fe, 60% para Mg, K, N e Zn e 50% para Cu, B e Mn. Já no *cut-to-length*, diferentemente dos sistemas anteriormente apresentados, as porcentagens de remoção são inferiores a 50% para a maioria dos nutrientes, exceto para o P e o Fe, os quais apresentaram, respectivamente, 63 e 57%.

Diversos estudos buscaram avaliar o efeito da intensidade de colheita nas proporções de nutrientes exportados. Viera (2012), estudando a dinâmica nutricional em um povoamento híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* com 10 anos em Eldorado do Sul – RS, verificou que, na colheita da árvore inteira (biomassa acima do solo), a remoção dos nutrientes seria superior a 80% para P e K; superior a 70% para Ca, Mg, S, Cu e Zn; superior a 60% para N e Mn; e superior a 20% para o Fe. Witschoreck (2014), em um povoamento de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos instalado na região de Guaíba – RS, observou que, na colheita de toda a

biomassa acima do solo, a taxa de exportação dos macronutrientes seria de 69% para o P; 67% para o K; 66% para o Mg; 60% para o Ca; 58% para o N; e 51% para o S.

Quando há a redução na intensidade da colheita florestal (manutenção dos resíduos, por exemplo), alguns autores afirmam haver, conseqüentemente, uma redução substancial na exportação de nutrientes (WITSCHORECK, 2014; SALVADOR, 2015; ACHAT et al., 2015; VIERA et al., 2015; GUIMARÃES et al., 2015; LUDVICHACK, 2016; CONSENSA, 2017; SANTOS et al., 2019; RESQUIN et al., 2020). Isso ocorre devido à presença de altas concentrações de nutrientes em alguns componentes da árvore, que podem ser mantidos no solo na forma de resíduos, como, por exemplo, as folhas e a casca.

As folhas, embora representem apenas 11,9% do total de resíduos, contribuem com quase 40% de N e próximo de 30% para P e K, considerando o estoque destes elementos nos resíduos. Resultado semelhante foi observado por Shamas et al. (2003), os quais observaram que, apesar de contribuir com apenas 1/3 do peso seco do resíduo, as folhas representaram quase 3/4 dos estoques de N do resíduo e de 36 a 52% dos estoques de P, K, Ca e Mg.

De acordo com Santana et al. (1999), apesar da casca representar, geralmente, 10% da biomassa das toras colhidas, esta apresenta elevada concentração de nutrientes. Quando este componente é retirado do local junto das toras, muitas vezes para ser utilizada na indústria como fonte energética em caldeiras (VIERA, 2012), a exportação de nutrientes aumenta significativamente, principalmente com relação ao Ca (HERNÁNDEZ et al., 2016).

5.8. Inferências quanto à sustentabilidade da produção

O coeficiente de utilização biológica variou de acordo com o nutriente analisado e também em função do componente da planta, conforme apresentado na Tabela 11. Podemos observar que os micronutrientes têm os maiores valores para o CUB, sendo esta tendência observada também por outros autores (WITSCHORECK, 2008; GUIMARÃES, 2014; VIERA et al., 2015; LUDVICHAK, 2016).

De maneira geral, os maiores valores para este coeficiente foram observados, em ordem decrescente de magnitude, nos componentes: lenho do fuste > lenho do ponteiro > casca do fuste > casca do ponteiro > galhos > folhas. Dessa forma, a colheita pode ter impacto significativo na manutenção dos estoques nutricionais, pois, em sistemas mais intensivos – onde os componentes da copa, que geralmente apresentam CUBs mais baixos, são removidos – a exportação de nutrientes pode aumentar consideravelmente (SCHUMACHER et al., 2013).

Tabela 11. Coeficiente de utilização biológica (CUB) de nutrientes para um povoamento de *Eucalyptus dunnii*, aos 11 anos de idade.

Comp	Macronutrientes					Micronutrientes				
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Mn	Fe
F	60	882	102	200	375	15957	78947	50279	819	6939
G	250	2903	364	117	429	82569	84112	58442	1488	17203
LF	621	4167	2368	474	1500	300000	409091	266667	16822	13674
CF	325	3061	265	48	257	96774	204545	81818	1148	6351
LP	328	3930	720	692	2571	281250	266667	219512	13961	16064
CP	209	2703	263	59	250	56250	191489	40724	776	11016

Onde: Comp = componentes da biomassa; F = folhas; G = galhos; LF = lenho fuste; CF = casca fuste; LP = lenho do ponteiro; CP = casca do ponteiro.

Os valores do NPR, informação analisada para avaliar o impacto dos diferentes sistemas de colheita na sustentabilidade nutricional do local, estão apresentados na Tabela 12. Quanto a esse parâmetro, é importante salientar que, neste estudo, não foram consideradas as entradas de nutrientes via precipitação úmida e seca, a disponibilização pela rocha matriz, fixação biológica e os nutrientes em formas totais no solo.

Tabela 12. Estimativa do número potencial de rotações (NPR) com base no estoque de nutrientes na biomassa acima do solo, na serapilheira e no solo (até 60 cm de profundidade) e na exportação via colheita da biomassa.

Comp	N	P	K	Ca	Mg
Full tree	1,5	0,3	1,8	5,4	11,8
Rma + Ca	2,6	0,6	3,4	6,5	14,5
Cut-to-length	3,6	0,9	9,0	17,0	27,4

O NPR pode variar conforme o local de implantação do povoamento (disponibilidade de nutrientes no solo), entre as espécies (diferentes eficiências nutricionais) e entre nutrientes (VIERA, 2012). No sistema *cut-to-length* observa-se maiores valores de NPR em comparação aos resultados obtidos no sistema *full tree*. Essa tendência foi observada em outros trabalhos, os quais afirmam que, em sistemas de colheita mais conservadores, nos quais apenas o lenho do fuste é retirado, o número de rotações aumenta (GUIMARÃES, 2014; CARVALHO, 2014; CONSENSA, 2017), especialmente para os elementos Ca e Mg, devido às suas grandes concentrações no componente casca (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993).

Dentro deste contexto, considera-se a manutenção dos resíduos uma questão importante na avaliação da sustentabilidade da produção. Conhecendo-se esta dinâmica, é possível gerir os

empreendimentos florestais de maneira adequada, principalmente em plantações estabelecidas em locais de baixa fertilidade (BIZON, 2005). Em resumo, a sustentabilidade das plantações está intimamente relacionada à manutenção da fertilidade do local, sendo esta última totalmente dependente das práticas de manejo adotadas ao longo do processo de produção (SHAMAS et al., 2003).

6. CONCLUSÕES

A produção de biomassa acima do solo no povoamento de *Eucalyptus dunnii*, com 11 anos de idade estabelecido no Uruguai, foi de 256,2 Mg ha⁻¹, onde a ordem de alocação nos componentes acima do solo foi: lenho do fuste > casca do fuste > galhos > folhas > lenho do ponteiro e casca do ponteiro.

As maiores concentrações de nutrientes foram observadas no componente folhas, com exceção do Ca, Mg, Mn e Fe, que apresentaram concentrações mais elevadas no componente casca.

No lenho do fuste estão estocadas, em termos totais, as maiores quantidades de nutrientes, com exceção do K, Ca e Mg, os quais apresentam-se em maior quantidade no componente casca.

A biomassa da serapilheira acumulada foi de 18,2 Mg ha⁻¹, a qual aportou um total de 397,8 kg ha⁻¹ de nutrientes, na seguinte ordem decrescente de magnitude: Ca > N > Mg > K > Mn > P > Fe > Zn > B > Cu.

No sistema de colheita *full tree* 93,4% da biomassa acima do solo é removida, onde as exportações de nutrientes são próximas a 80% para N, Mg, B, Cu, Zn, Mn e Fe e próximo de 90% para os macronutrientes P, K e Ca. Já no sistema *cut-to-length* a remoção da biomassa acima do solo equivale a 74,3% do total. Neste sistema, em relação ao *full tree*, ocorre redução na exportação de nutrientes na faixa de 78,2% para Mn; 71,4% para K; 64,2% para Ca; 56,5% para B; 55,1% para Mg; 49,6% para Zn; 45,1% para Cu; 44,1% para N; 31,2% para P e 30,2% para Fe.

Os CUBs dos componentes folhas, galhos, casca e ponteiro são inferiores ao da madeira. Dessa forma, a manutenção destes resíduos de colheita sobre o solo acarretará a manutenção de uma alta quantidade de nutrientes.

O sistema de colheita *cut-to-length*, ou seja, remoção apenas da madeira do fuste, possibilita um maior número de rotações em comparação ao sistema *full tree*, sendo, dessa forma, mais sustentável para manter a fertilidade do solo.

7. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, são apresentadas as seguintes recomendações:

✓ É recomendada a utilização do sistema *cut-to-length*, por meio do qual haverá uma menor remoção de biomassa e conseqüente redução na exportação de nutrientes.

✓ A manutenção dos resíduos da colheita florestal irá contribuir para o fornecimento de nutrientes ao solo, bem como sua proteção e melhoria das propriedades físico-químicas, auxiliando, assim, na manutenção da sustentabilidade do sítio.

✓ De forma a contribuir com a avaliação das estimativas do estoque de nutrientes no solo, recomenda-se a realização de estudos envolvendo a quantificação da biomassa do sistema radicular.

✓ Sugere-se a avaliação da contribuição da entrada de nutrientes a partir de vias distintas, como, por exemplo, pela deposição atmosférica, precipitação e intemperismo da rocha matriz.

✓ É recomendada a realização de estudos, em rotações subseqüentes, relacionados ao desenvolvimento das plantas sob os diferentes sistemas de colheita, com o objetivo de obter informações a respeito da produtividade nestas rotações futuras.

✓ Recomenda-se, ainda, a realização de estudos que tenham por objetivo avaliar a decomposição da biomassa depositada sobre o solo, a fim de verificar a real disponibilidade e em quanto tempos os nutrientes alocados neste material estarão disponíveis às plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHAT, D. L. et al. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 38, p. 124-141, 2015.

ACHAT, D. L. et al. Modelling the nutrient cost of biomass harvesting under different silvicultural and climate scenarios in production forests. **Forest Ecology and Management**, v. 429, p. 642-653, 2018.

ALMEIDA, A. Q.; ARISTIDES, R.; LEITE, P. L. Relação entre a seca dos ponteiros do eucalipto e o clima no vale da bacia hidrográfica do rio doce. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 10, n. 1, p. 5-13, 2013.

ANDRADE-NÚÑEZ, M. J.; AIDE, T. M. Effects of habitat and landscape characteristics on medium and large mammal species richness and composition in northern Uruguay. **Zoologia**, v. 27, n. 6, p. 909–917, 2010.

ANDRÉ, F.; JONARD, M.; PONETTE, Q. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 11, p. 2285-2294, 2010.

AOAC. **Official methods of analysis of AOAC international**. 19th Ed. Gaithersburg, 2012.

AUGUSTO, L. et al. Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 808, 2008.

BANTEL, C. A. **Estudo de diferentes sistemas de colheita de *Eucalyptus* spp. em área montanhosa**. 2010. 166f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Agronômicas, Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Botucatu, 2010.

BARBOSA, V. et al. Biomassa, carbono e nitrogênio na serapilheira acumulada de florestas plantada e nativa. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

BARRETO, R. A. Fossil fuels, alternative energy and economic growth. **Economic Modelling**, v. 75, p. 196-220, 2018.

BARICHELLO, L. R. **Quantificação da biomassa e dos nutrientes em floresta de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil**. 2003. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BARICHELLO, L. R.; SCHUMACHER, M. V.; VOGEL, H. L. M. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na Região Sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1/2, p. 129-135, 2005.

BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 10, n. 1, p. 112-120, 1986.

BATISTA, D. C.; KLITZE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. da. Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, vol. 25, n.3, p. 711-719. 2015.

BELLOTE, A. F. J. et al. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de *Eucalyptus* com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n.56, p.31-41, 2008.

BENTANCOR, L. et al. Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 165-174, 2019.

BINKLEY, D. **Forest nutrition management**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 290p.

BIZON, J. M. C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

BRASIL. Lei Federal nº 5.106, de 2 de setembro 1966. Dispõe sobre os incentivos fiscais concedidos a empreendimentos florestais. **Diário Oficial da União**. Brasília – DF, 2 set. 1966.

BRUN, E. J. et al. Dinâmica de micronutrientes na biomassa florestal em estágios sucessionais de Floresta Estacional Decidual, RS, Brasil. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 307-318, 2010.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Exportação de nutrientes em função do tipo de exploração em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 97-104, 2002.

CARMO, F. C. A. **Avaliação de desrama e seleção de árvores para produção de madeira de eucalipto para serraria**. 2010. 29f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2010.

CARVALHO, R. R. **Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urograndis* estabelecido em solo sujeito a arenização no sul do Brasil**. 2014. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Santa Maria, 2014.

CARVALHO, R. R. et al. Estimativa dos micronutrientes na serapilheira acumulada de um povoamento de *Eucalyptus saligna* (Smith), São Gabriel – RS. **Enciclopedia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 976-983, 2015.

CASTAÑO, J. et al. **Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009**. p. 40, 2011.

CHUM, H. et al. **Bioenergy**. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.;

HANSEN, G.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C. (Eds.). IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, 2011.

CONSENSA, C. B. **Implicações silviculturais da colheita da biomassa e da remoção de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus saligna***. 2017. 100f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Santa Maria, 2017.

CONEAT – Comisión Nacional de Estudios Agroeconómicos de la Tierra. **Unidades de Suelos CONEAT**. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Montevideo, 1994.

COSTA, E. R. O. **Prognose de crescimento, regimes de manejo e estratégias de secagem de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 2015. 216f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, 2015.

CQFS – RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo/Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400p.

CUNHA, F.V. et al. Acúmulo e decomposição da serapilheira em quatro formações florestais. **Revista Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 379-387, 2013.

CURLIN, J. W. Nutrient cycling as a factor in site productivity and forest fertilization. In: Youngberg, C. T. e C. B. Davey. (Eds.). **Tree growth and forest soils**, Oregon: Oregon State University Press, p. 313-326, 1970.

DIEA – Oficina de Estadísticas Agropecuarias. **Estadísticas Agropecuarias**. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay, 270 p., 2020.

EMBRAPA. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado do Paraná**. Ministério da Agricultura – Programa Nacional de Pesquisa de Florestas – PNPF (EMBRAPA/IBDF). Curitiba, 89p, 1986.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Tradução Maria Edna Tenório Nunes. Londrina: Editora Planta, 2006, 403 p.

ERICSSON, T. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. **New Zealand of Forestry Science**, v. 24, p. 133-168, 1994.

ERNANI, P. R. et al. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 393-402, 2007.

FAO – **Global Forest Resources Assessment 2020 – Key Findings**. Rome. 2020.

FERNANDES, A. L. T.; FLORÊNCIO, T. M.; FARIA, M. F. Análise biométrica de florestas irrigadas de eucalipto nos cinco anos iniciais de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.505–513, 2012.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. **Formação de povoamentos florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 109 p.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de Biometria Florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269p.

FLORES, T. B. et al. ***Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF, 2016. 448p.

FOELKEL, C. The World of *Eucalyptus*: Uruguay. ***Eucalyptus Online Book & Newsletter***, 2008.

FREITAS, R. et al. Biomassa e conteúdo de nutrientes em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden plantado em solo sujeito à arenização no município de Alegrete – RS. **Renabio**, v. 1, n. 1, p. 93-104, 2004.

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

GODINHO, T. O. et al. Biomassa, macronutrientes e carbono orgânico na serapilheira depositada em trecho de floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 131-144, 2013.

GODINHO, T. O. et al. Quantificação de biomassa e nutrientes na serapilheira acumulada em trecho de Floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 11-20, 2014.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. P. 1-57.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 601-616, 2001.

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

GUIMARÃES, C. **Biomassa e nutrientes em plantios de Eucaliptos no bioma Pampa**. 2014. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

GUIMARÃES, C. C. et al. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 873-882, 2015.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: history, status and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712-725, 2015.

HARRISON, R. B. et al. Effect of spacing and age on nitrogen and phosphorus distribution in biomass of *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, n.3, p. 167–177, Aug. 2000.

HERNÁNDEZ, J. et al. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 2, p. 92-99, 2009.

HERNÁNDEZ, J. et al. Management of forest harvest residues affects soil nutrient availability during reforestation of *Eucalyptus grandis*. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 105, p. 141-155, 2016.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. 2.ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2006, 32 p.

HUANG, Z. et al. Harvest residue management effects on tree growth and ecosystem carbon in a Chinese fir plantation in subtropical China. **Plant and Soil**, v. 364, p. 303–314, 2013.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual**. Brasília, 2017. 77 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual**. Brasília, 2020. 66 p.

INIA – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Acesso em julho de 2020. Disponível em: <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>.

JOVANOVIC, T.; ARNOLD, R.; BOOTH, T. Determining the climatic suitability of *Eucalyptus dunnii* for plantations in Australia, China and Central and South America. **New Forests**, v. 19, n. 3, p. 215-226, 2000.

JUNIOR, H. J. E. et al. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 15-21, 2016.

KATZ, J.; STUMPO, G.; VARELA, F. **El complejo forestal chileno**. Versión Final. División de Desarrollo Productivo y Empresarial. CEPAL. Santiago Kerosky S (2007) Chile's senate passes native forest Law. The Santiago Times (Santiago, 19 August 2007), 1999.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiological of woody**. 2. ed. San Diego: Academic, 1996. 432 p.

KRAMER, R. J.; KOZLOWSKI, T. T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Kalouste Goulbenkian, 1972. 745.p.

KUMAR, R. et al. Effect of tree age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.

KUMARASWAMY, S. et al. Harvest residue effects on soil organic matter, nutrients and microbial biomass in eucalypt plantations in Kerala, India. **Forest Ecology and Management**, v. 328, p. 140-149, 2014.

LACLAU, J. P. et al. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in *Eucalyptus* plantations established on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n.12, p. 2148-2159, 2010.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2000. 531 p.

LEITE, F. P. et al. Nutrient relations during an *Eucalyptus* cycle at different populations densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 35, p. 949-959, 2011.

LIMA-TOIVANEN, M. B. A Evolução da Indústria Sul-Americana de Celulose e Papel: Foco No Brasil, Chile e Uruguai. **Revista O Papel**, v. 74, n. 9, p. 51–66, 2013.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

LUDVICHAK, A. P. **Biomassa e nutrientes do híbrido *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em plantios monoespecíficos e mistos**. 2016. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

LUDVICHAK, A. P. et al. Nutrient return through litterfall in a *Eucalyptus dunnii* Maiden stand in sandy soil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 6, p.1041-1048, 2016.

MACHADO, C. C. O setor florestal brasileiro. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2002. p. 15-32.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2002, p. 145-167.

MALINOVSKI, R. A. **Otimização da distância de extração de madeira com Forwarder**. 2007. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

MELLO, H. A. et al. **Resultados da aplicação de fertilizantes minerais na produção de madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. em solos de cerrado do Estado de São Paulo**. IPEF, n. 1, p. 7-26, 1970.

MELO, L. A. et al. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de substrato. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 234-242, 2014.

MENDELL, B. et al. Financing Uruguay's forestry sector: survey and case study. **Journal of Forestry**, v. 105, n. 3, p.125–130, 2007.

MENGEL, K. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. **Plant and Soil**, v. 181, p. 83-93, 1996.

MONTAGNINI, F.; SANCHO, F. Aboveground biomass and nutrients in young plantations of indigenous trees: implications for site nutrient conservation. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 1, n. 4, p. 115-139, 1994.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112p.

MORALES, B. P. **Atributos do solo e produtividade de *Eucalyptus* spp. na metade sul do Rio Grande do Sul**. 2013. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, E. B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 85 - 94, 2017.

NAMBIAR, E. K. S.; HARWOOD, C. E. Productivity of acacia and eucalypt plantations in Southeast Asia. 1. Bio-physical determinants of production: opportunities and challenges. **International Forestry Review**, v. 16, n. 2, p. 225-248, 2014.

NORDFJELL, T. et al. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. **International Journal of Forest Engineering**, v. 30, p. 1-13, 2019.

NYLAND, R. D. **Silviculture: Concepts and Applications**. 3rd ed. 2016.

NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time consumption analysis of the mechanized *cut-to-length* harvesting system. **Silva Fennica**, v. 40, n. 2, p. 335–363, 2006.

OLMOS, V. M.; SIRY, J. P. Economic impact evaluation of Uruguay forest sector development policy. **Journal of Forestry**, v. 107, n. 2, p.63–68, 2009.

PAIVA, H. N.; LEITE, H. G. Desbastes e desramas em povoamentos de *Eucalyptus*. In: SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. (Org). **Silvicultura de Eucalipto no Brasil**. Ed. UFSM, Santa Maria – RS. 2015. 308p.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. Sand Diego: Academic Press, 2008. 454p.

PALLARÉS, O. R.; BERRETA, E. J.; MARASCHIN, G. E. **The south American Campos ecosystem**. In: SUTTIE, J.; REYNOLDS, S. G.; BATELLO, C. (Eds.), Grasslands of the World, FAO, p.171-219, 2005.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná**. Colombo: cqfs Florestas - CNPF, 2006. (Documentos, 129).

PEREIRA, A. R. et al. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, n. 59, p. 27-37, 1984.

PIRES, M. M.; AGUIAR, P. C. B.; SANTANA, E. G. F. Efeitos socioeconômicos do cultivo de eucalipto no desenvolvimento de municípios produtores da Bahia, Brasil. **Geosul**, v. 35, n. 75, p. 231-256, 2020.

POGGIANI, F.; COUTO, H.; FILHO, W. S. S. Biomass and nutrient estimates in short rotation intensively cultured plantation of *Eucalyptus grandis*. **Revista do IPEF**, v. 23, p. 29-36, 1983.

POGGIANI, F. et al. Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos. **IPEF**, Piracicaba, n. 27, p. 17-30, 1984.

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

PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RANGER, J. et al. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. **Forest Ecology and Management**, v. 72, n. 2-3, p. 167-183, 1995.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 2010. 111f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Pós-Graduação em Agronomia, Guarapuava, 2010.

REDO, D. et al. Impacts of internal and external policies on land change in Uruguay, 2001–2009. **Environmental Conservation**, v. 39, n. 2, 122-131, 2012.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (eds). **Relação solo eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990, cap. 7, p. 265-302.

RESQUIN, F. et al. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 63–74, 2019.

RESQUIN, F. et al. Evaluation of the nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. **Biomass and Bioenergy**, v. 134, 2020.

RIBASKI, N. G. Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 44-58, 2018.

ROCHA, J. H. T. et al. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1-10, 2016.

ROCHA, J. H. T. et al. Forest residue removal decreases soil quality and affects wood productivity even with high rates of fertilizer application. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 188-195, 2018.

RYAN, M. G. et al. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.

SALVADOR, S. M. **Quantificação da biomassa e nutrientes em plantios de *Eucalyptus urograndis* em solos distintos**. 2015. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANQUETA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: **Fixação de Carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. 2º Simpósio Latino Americano sobre Fixação de Carbono. Metodologias Curitiba, 2004. 205p.

SANT'ANA, C. M. **Exportação de nutrientes na colheita de eucalipto**. In: FOREST'99 - INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON FOREST, 5, 1999, Curitiba. Resumos expandidos... Curitiba, 1999.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 447-457, jul.-ago., 2002.

SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JÚNIOR, A. **Doenças do Eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 20p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 45).

SANTOS, K. F. et al. Biomass production and Nutrient content in different *Eucalyptus* genotypes in Pampa Gaúcho, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n 4, p. 1-10, 2019.

SANTOS, F. D. et al. Litter accumulation in a *Eucalyptus grandis* plantation, Rio Grande do Sul, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, 2020.

SAS – STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **Sistema integrado de aplicações para análise estatística de dados**. 1996.

SAYER, E. J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. **Biological Reviews**, v. 81, p. 1–31, 2006.

SCHUMACHER, M.V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* f. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 9-18, 1993.

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

SCHUMACHER, M. V. et al. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul – RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 321-332, abr.-jun., 2013.

SCHLICH, W. **Manual of forestry: forest management**. 5.ed. London: Bradbury, 1925. v.3, 383p.

SHAMAS, K. et al. Contribution of decomposing harvest residues to nutrient cycling in a second rotation *Eucalyptus globulus* plantation in south-western Australia. **Biology and Fertility of Soils**, v. 38, p. 228-235, 2003.

SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Eficiência de utilização dos nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 7, p. 1-8, 1983.

SILVA, R. S.; FENNER, P. T.; CATANEO, A. Desempenho de máquinas florestais de colheita derrubador-processador Slingshot sobre as esteiras. **Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal**, 6., 2003, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: UFV/SIF, p. 267-279, 2003.

SILVA, P. H. M. et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67-78, 2013.

SIXEL, R. M. M. **Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**. 2012. 110f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SNOECK, M. et al. **The emergence of new successful Export Activities in Uruguay**. 2007.

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

SOMAN, H. et al. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 93, n. 3, p. 389–400, 2020.

SOPRANO, E.; ALVAREZ, V. H. Nutrientes lixiviados de colunas de solo tratadas com diferentes sais de cálcio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 13, p.25-29, 1989.

STAPE, J. L. et al. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2014, Campinas. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

SOUZA, J. T.; FIORENTIN, L. D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill x Maiden, em Santa Maria, RS. **Unoesc & Ciência – ACET**, v. 4, n. 2, p.253-262, 2013.

TONELLO, K. C. **Comportamento ecofisiológico de clones de *Eucalyptus***. 2010. 161f. Tese (Doutorado–em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

TURNBULL, J. W.; PRYOR, L. D. Choice of species and seed sources. In: HILLIS, W. E.; BROWN, A. G. (eds.) ***Eucalyptus for wood production***. Sydney, Austrália: CSIRO/Academic Press, 1984. p. 6-6.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. 2019.

VIERA, M. et al. Nutrientes na serapilheira em um fragmento de floresta estacional decidual, Itaara, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 611-619, 2010.

VIERA, M. **Crescimento inicial e produtividade em plantios monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em sistema agrossilvicultural**. 2010. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 371-379, maio-jun. 2011.

VIERA, M. **Dinâmica nutricional em um povoamento híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* em Eldorado do Sul – RS, Brasil**. 2012. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

VIERA, M. et al. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste – RS. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, supl. 11, p. 2481-2490, 2012.

VIERA, M. et al. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul - RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria – RS, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2013.

VIERA, M. et al. Implicações nutricionais com base em diferentes intensidades de colheita da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 3, p. 432-439, mar. 2015.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Biomass and nutrient allocation to aboveground components in fertilized *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus urograndis* plantations. **New Forests**, v. 48, n. 3, p. 445-462, 2017.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Estimativa do carbono da serapilheira em florestas de eucalipto de diferentes idades. In: Congresso Florestal Estadual de Nova Prata, 8, 2000, Nova Prata. **Anais...** Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2000.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

WITSCHORECK, R. **Recomendação de fertilizantes para *Eucalyptus saligna* Sm. com base no balanço nutricional na região de Guaíba – RS**. 2014. 86f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

APÊNDICES

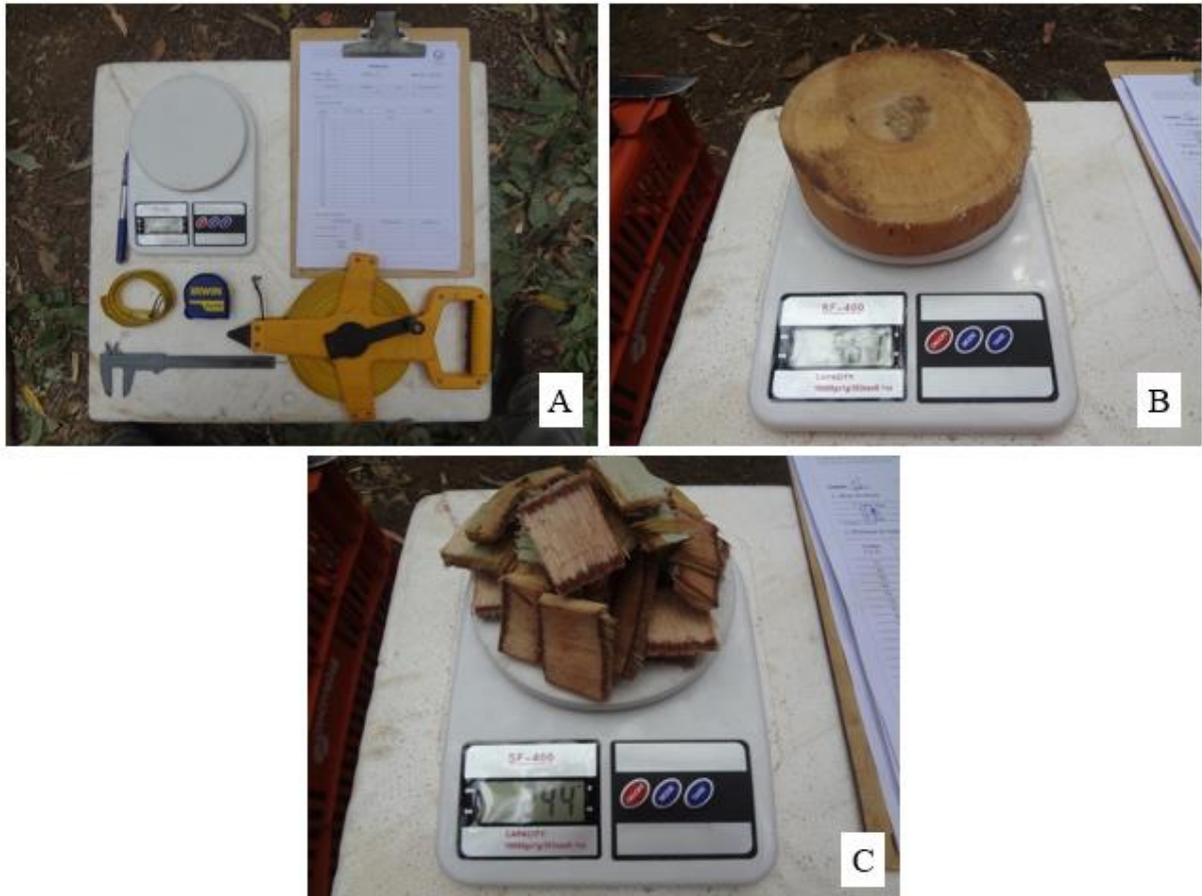
Apêndice A - Seleção de árvores para quantificação da biomassa e amostragem em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* no Uruguai. A) Seleção da árvore com o diâmetro de interesse; B) Abate da árvore selecionada; C) Árvore abatida; D) Seccionamento do fuste da árvore selecionada.



Apêndice B - Separação das frações da árvore e pesagem em povoamento de *Eucalyptus dunnii* no Uruguai. A) Separação das frações folhas e galhos; B) Pesagem do fuste com casca; C) Remoção da casca do fuste; D) Pesagem do fuste sem casca.



Apêndice C - Amostragem dos componentes da biomassa para análise química. A) Materiais utilizados; B) Amostragem dos discos de madeira; C) Amostragem de casca.



Apêndice D - Amostragem de serapilheira acumulada. A) Aspecto da moldura para coleta das amostras; B) Coleta do material e acondicionamento em sacos de papel.

