

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA PRODUZIDA EM
SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP

Maio – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA PRODUZIDA EM
SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Co-orientador: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP

Maio – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

E86c **Eufrade Junior, Humberto de Jesus, 1990-**
 Caracterização físico-química da biomassa produzida em
 sistemas florestais de curta rotação para geração de ener-
 gia / Humberto de Jesus Eufrade Junior. - Botucatu :
 [s.n.], 2015
 xiii, 118 f. : fots. color., grafs., ils. color., tabs.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
 Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2015
 Orientador: Adriano Wagner Ballarin
 Coorientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
 Inclui bibliografia

 1. Eucalipto. 2. Cultivos agrícolas energéticos. 3. Fís-
 sico-química. 4. Biomassa. 5. Energia - Fontes alternati-
 vas. I. Ballarin, Adriano Wagner. II. Guerra, Saulo Philipe
 Sebastião. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de
 Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências
 Agrônomicas. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE BOTUCATU
FACULDADE DE CIENCIAS AGRONOMICAS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA PRODUZIDA EM SISTEMAS FLORESTAIS DE CURTA ROTAÇÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

AUTOR: HUMBERTO DE JESUS EUFRASIM JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. **ADRIANO WAGNER BALLARIN**
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Prof. Dr. **FABIO MINORU YAMAJI**
Coordenadoria Executiva / Unidade de Itapeva

Prof. Dr. **CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO**
Dep de Ciencia Florestal / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Data da realização: 22 de maio de 2015.

DEDICO

*Aos meus pais (Humberto e Glaucia) e irmãos (Rafael e Glauciane) pelo auxílio e amor
imensurável;*

*Aos meus avôs (João e Leonildo) e avós (Felicía e Lúcia) por conhecer o verdadeiro
significado de sabedoria e grandeza;*

*À minha noiva e futura esposa (Letícia) por todo amor e por me ensinar o verdadeiro
sentido do companheirismo e cumplicidade.*

*“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”
(Isaac Newton)*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e a Nossa Senhora Aparecida por guiar meu destino;

À minha família pela força, auxílio e amor incondicional e que apesar da distância sempre estaremos juntos;

À minha noiva Letícia (e nosso Luck) por todo o carinho e amor inabalável, por estar sempre ao meu lado me incentivando nos momentos mais difíceis, te amo linda –“porque ele não para de crescer...”. Aproveito também, pra agradecer ao apoio irrestrito de sua família (Satiko, Sérgio e a Laís) pelo carinho e incentivo mesmo distantes;

Aos meus amigos de pós-graduação e parceria em Botucatu-SP (Vitor, João Arthur, Luís, Rodrigo, Donizeti, Paulo, Enzo, João Victor, Letícia), em especial ao Ricardo Hideaki Miyajima pelos ensinamentos, auxílio e amizade durante esses anos;

Ao professor e meu mentor Adriano Wagner Ballarin pelos ensinamentos, paciência, convívio, conselhos e orientação durante todo esse tempo;

Ao professor Saulo Philipe Sebastião Guerra pelos ensinamentos, confiança, convívio e suporte para realização desse trabalho;

Aos professores Hernando Alfonso Lara Palma, Luiz Alberto Blanco Jorge, e Fábio Minoru Yamaji pelos ensinamentos e conversas durante todo esse tempo e à professora Dra. Maria Márcia Pereira Sartori pelo auxílio e supervisão nas análises estatísticas.

Aos professores da banca examinadora (Cláudio Angeli Sansígolo, Alcides Lopes Leão, Fábio Minoru Yamaji, Marcos Rezende, Vladimir Eliodoro Costa) pela disponibilidade e contribuição na realização desse trabalho;

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) pelo suporte para realização desse projeto;

Aos integrantes e ex-integrantes do grupo NEMPA (Dose, Giulia, Pedro, Rômulo, Paniel, Manja, Magal, Helen, Natália, Marília, Chimpa, Letícia, Júlia, Caren, Marcelo, Lobinho, Guilherme, Emanuel, Miguel, e outros); em especial ao Raoni e o Arame pelo auxílio no campo;

Aos integrantes dos laboratórios de Ensaio de Materiais (em especial ao Ailton, Sabrina, Júlia), Matologia (em especial ao Thiago e a Iara), Resíduos sólidos e compósitos (Beto), Análises químicas da madeira (em especial a Liliane) da FCA/UNESP e ao laboratório de Bioenergia e Materiais Lignocelulósicos da UFSCar – Sorocaba (em especial a Gabriela) pelos ensinamentos, suporte na realização dos ensaios e convívio nesse tempo;

À pós-graduação da FCA/UNESP, em especial a Débora por todo auxílio e conversas durante esse tempo;

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para realização desse trabalho, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Biomassa florestal.....	6
2.1.1 O gênero <i>Eucalyptus</i> e suas potencialidades no Brasil.....	8
2.1.2 Sistemas florestais de curta rotação	9
2.1.3 Conversão direta da biomassa florestal em energia	12
2.2 Caracterização física e química da biomassa para fins energéticos	13
2.2.1 Densidade básica da madeira	14
2.2.2 Composição química elementar, estrutural e imediata	15
2.2.3 Poder calorífico	20
2.2.4 Macro e micronutrientes	21
2.3 Efeito do espaçamento e da adubação na biomassa	22
2.4 Considerações sobre a revisão bibliográfica realizada.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Área e delineamento experimental.....	25
3.2 Amostragem e escolha das árvores-amostra	28
3.3 Inventário e determinação da massa seca.....	29
3.4 Análises físicas e químicas.....	33
3.4.1 Análise elementar.....	35
3.4.2 Análise imediata.....	36
3.4.3 Análise estrutural	39
3.4.4 Poder calorífico superior	42
3.4.5 Densidade básica da madeira	44
3.4.6 Densidade energética da madeira.....	45
3.5 Potencial energético	46
3.6 Exportação dos nutrientes	46
3.7 Análises estatísticas.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 Caracterização física e química.....	49
4.1.1 Composição química elementar	49
4.1.2 Composição química imediata	54

4.1.3 Composição química estrutural	61
4.1.4 Poder calorífico superior	63
4.1.5 Densidade básica e energética da madeira	66
4.2 Massa seca.....	69
4.3 Potencial energético	72
4.4 Exportação de nutrientes	76
5. CONCLUSÕES.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
7. APÊNDICE.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Vias de aproveitamento da biomassa.....	7
Figura 2.	Sistema mecanizado de SFCR de <i>Eucalyptus</i> no Brasil.....	11
Figura 3.	Comparação entre os sistemas de colheita mecanizado.....	11
Figura 4.	Área experimental com os tratamentos aproveitados para este estudo.....	26
Figura 5.	Espaçamentos de plantio.....	26
Figura 6.	Fluxograma das etapas durante a pesquisa.....	28
Figura 7.	Parcelas mensuradas no campo.....	29
Figura 8.	Separação da biomassa e amostras.....	32
Figura 9.	Moagem e classificação das amostras.....	34
Figura 10.	Análise imediata.....	36
Figura 11.	Forno mufla utilizado na análise imediata.....	37
Figura 12.	Análise das cinzas.....	39
Figura 13.	Lignina e holocelulose das amostras.....	39
Figura 14.	Processo de extração.....	40
Figura 15.	Procedimento na determinação da lignina Klason insolúvel.....	41
Figura 16.	Determinação da holocelulose.....	42
Figura 17.	Calorímetro utilizado para determinação do PCS.....	43
Figura 18.	Preparação para análise do PCS.....	43
Figura 19.	Detalhe do painel de controle do calorímetro.....	44
Figura 20.	Discos com casca coletados em diferentes posições no fuste.....	44
Figura 21.	Densidade básica dos discos.....	45
Figura 22.	Composição química elementar nas frações da biomassa.....	51
Figura 23.	Interação dos efeitos E x D x B no teor de nitrogênio.....	53
Figura 24.	Interação dos efeitos E x D x B no teor de oxigênio.....	53
Figura 25.	Composição química imediata nas frações da biomassa.....	55
Figura 26.	Interação dos efeitos E x D x B no teor de cinzas.....	57
Figura 27.	Amostras de cinzas visualizadas no MEV em 500x.....	58
Figura 28.	Avaliação dos elementos químicos nas cinzas analisada no MEV-EDS.....	59
Figura 29.	Detalhe do silicato (destacado em verde) na amostra de cinzas da madeira....	60
Figura 30.	Presença de outras estruturas nas cinzas visualizadas no MEV.....	61
Figura 31.	Composição química estrutural nas frações da biomassa.....	62
Figura 32.	Poder calorífico nas frações da biomassa.....	64
Figura 33.	Interação dos efeitos E x D x B no poder calorífico superior.....	65
Figura 34.	Massa seca relativa da biomassa na árvore para os tratamentos avaliados.....	69
Figura 35.	Macronutrientes nas frações da biomassa.....	78

Figura 36. Micronutrientes nas frações da biomassa.....	78
Figura 37. Concentração de nutrientes por fração da biomassa.....	79
Figura 38. Exportação de macronutrientes nas frações da biomassa.....	81
Figura 39. Exportação de micronutrientes nas frações da biomassa.....	81
Figura 40. Proporção de nutrientes por biomassa na floresta (hectare).....	82
Figura 41. Índice de assimilação de nutrientes (NAI) para as biomassas.....	83
Figura 42. Exportação de macronutrientes nos espaçamentos estudados.....	85
Figura 43. Exportação de micronutrientes nos espaçamentos estudados.....	85
Figura 44. Exportação de macronutrientes nas doses estudadas.....	86
Figura 45. Exportação de micronutrientes nas doses estudadas.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Produção em t.ha.ano ⁻¹ de madeira para diferentes espécies de eucalipto conduzidas no sistema florestal de curta rotação em diferentes países.....	10
Tabela 2.	Reações químicas básicas durante a combustão.....	12
Tabela 3.	Densidade básica da madeira de algumas espécies florestais em sistemas florestais de curta rotação.....	14
Tabela 4.	Análise elementar para diversas fontes energéticas de biomassa.....	15
Tabela 5.	Composição química estrutural percentual de biomassas para energia.....	16
Tabela 6.	Composição química estrutural percentual para as frações da biomassa de uma árvore.....	17
Tabela 7.	Análise imediata e poder calorífico para diversas fontes de biomassa.....	17
Tabela 8.	Normas e metodologia das análises realizadas.....	35
Tabela 9.	Propriedades físicas e químicas da biomassa florestal para análise estatística.....	48
Tabela 10.	Resumo das variáveis dendrométricas dos sistemas florestais adensados de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> aos dois anos de idade.....	49
Tabela 11.	Composição química elementar da biomassa florestal de <i>Eucalyptus. urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	50
Tabela 12.	Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da composição química elementar.....	50
Tabela 13.	Teor de carbono (C%) nos espaçamentos e nas doses estudadas.....	52
Tabela 14.	Composição química imediata da biomassa florestal de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	54
Tabela 15.	Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da composição química imediata.....	55
Tabela 16.	Carbono fixo (CF) e material volátil (MV) nos espaçamentos estudados.....	57
Tabela 17.	Composição química das cinzas das frações da biomassa de <i>E. urograndis</i>	59
Tabela 18.	Composição química estrutural da biomassa florestal de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	61
Tabela 19.	Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da composição química estrutural.....	62
Tabela 20.	Teor de holocelulose (H _{olo}) da biomassa nos espaçamentos estudados.....	63
Tabela 21.	Teor de lignina insolúvel (LK _{ins}) da biomassa nos espaçamentos estudados...	63
Tabela 22.	Poder calorífico superior (PCS) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	64
Tabela 23.	Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância do poder calorífico superior.....	64
Tabela 24.	Densidade básica e energética da madeira com casca.....	66
Tabela 25.	Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da densidade básica e energética.....	66
Tabela 26.	Densidade energética (GJ.m ⁻³) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	67
Tabela 27.	Resumo das propriedades (valores médios e desvio padrão) da biomassa florestal de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> aos 24 meses nos sistemas florestais de curta rotação (SFCR).....	68

Tabela 28. Massa seca (MS) das frações da biomassa de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	70
Tabela 29. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da massa seca considerando as frações da biomassa.....	70
Tabela 30. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da massa seca total (somatório das três biomassas).....	71
Tabela 31. Massa seca total (kg.árvore ⁻¹) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	72
Tabela 32. Massa seca total (t.ha ⁻¹) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	72
Tabela 33. Potencial energético (PE) das frações da biomassa de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	73
Tabela 34. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância do potencial energético considerando as frações da biomassa.....	73
Tabela 35. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância do potencial energético total (somatório das três biomassas).....	74
Tabela 36. Potencial energético total (MJ.árvore ⁻¹) de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	74
Tabela 37. Potencial energético total (GJ.ha ⁻¹) de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	74
Tabela 38. Potencial energético (PE) das frações da biomassa de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> em tep* (tonelada equivalente de petróleo).....	75
Tabela 40. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância dos macro e micronutrientes nas frações da biomassa.....	77
Tabela 41. Macro e micronutrientes por hectare nos SFCR de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> aos 24 meses de idade.....	80
Tabela 42. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da exportação de nutrientes (hectare) por fração da biomassa.....	80
Tabela 43. Exportação de nutrientes em SFCR de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> aos 24 meses de idade para biomassa acima do solo.....	84
Tabela 44. Resumo do <i>p-valor</i> da análise de variância da exportação de nutrientes total (somatório das frações da biomassa).....	84
Tabela 45. Índice de assimilação de nutrientes (NAI) em t.kg ⁻¹ para os SFCR de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> aos 24 meses de idade para biomassa acima do solo.....	87
A-1. Análise de variância para o teor de carbono (C).....	101
A-2. Análise de variância para o teor de hidrogênio (H).....	102
A-3. Análise de variância para o teor de oxigênio (O).....	102
A-4. Análise de variância para o teor de nitrogênio (N).....	102
A-5. Análise de variância para o teor de enxofre (S).....	103
A-6. Análise de variância para a umidade (U) da biomassa verde na coleta.....	103
A-7. Análise de variância para cinzas (CZ).....	103
A-8. Análise de variância para o material volátil (MV).....	104
A-9. Análise de variância para o carbono fixo (CF).....	104

A-10. Análise de variância para a Lignina Klason (LK_{ins}).....	104
A-11. Análise de variância para os extrativos totais (ET).....	105
A-12. Análise de variância para a holocelulose (H_{olo}).....	105
A-13. Análise de variância para o poder calorífico superior (PCS).....	105
A-14. Análise de variância para densidade básica da madeira com casca.....	106
A-15. Análise de variância para densidade energética da madeira com casca.....	106
A-16. Análise de variância para massa seca por biomassa em $kg.árvore^{-1}$	106
A-17. Análise de variância para massa seca de por biomassa em $t.ha^{-1}$	107
A-18. Análise de variância para massa seca total em $kg.árvore^{-1}$	107
A-19. Análise de variância para massa seca total em $t.ha^{-1}$	107
A-20. Análise de variância para o potencial energético por biomassa em $MJ.árvore^{-1}$	107
A-21. Análise de variância para o potencial energético por biomassa em $GJ.hectare^{-1}$...	108
A-22. Análise de variância para o potencial energético total em $MJ.árvore^{-1}$	108
A-23. Análise de variância para o potencial energético total em $GJ.hectare^{-1}$	108
A-24. Análise de variância para o nitrogênio (N).....	108
A-25. Análise de variância para o fósforo (P).....	109
A-26. Análise de variância para o potássio (K).....	109
A-27. Análise de variância para o cálcio (Ca).....	109
A-28. Análise de variância para o magnésio (Mg).....	110
A-29. Análise de variância para o enxofre (S).....	110
A-30. Análise de variância para o boro (B).....	110
A-31. Análise de variância para o cobre (Cu).....	111
A-32. Análise de variância para o ferro (Fe).....	111
A-33. Análise de variância para o manganês (Mn).....	111
A-34. Análise de variância para o zinco (Zn).....	112
A-35. Análise de variância para a exportação de nitrogênio (N) por biomassa em $kg.ha^{-1}$..	112
A-36. Análise de variância para a exportação de fósforo (P) por biomassa em $kg.ha^{-1}$...	112
A-37. Análise de variância para a exportação de potássio (K) por biomassa em $kg.ha^{-1}$..	113
A-38. Análise de variância para a exportação de cálcio (Ca) por biomassa em $kg.ha^{-1}$	113
A-39. Análise de variância para a exportação de magnésio (Mg) por biomassa em $kg.ha^{-1}$..	113
A-40. Análise de variância para a exportação de enxofre (S) por biomassa em $kg.ha^{-1}$...	114
A-41. Análise de variância para a exportação de boro (B) por biomassa em $kg.ha^{-1}$	114
A-42. Análise de variância para a exportação de cobre (Cu) por biomassa em $kg.ha^{-1}$	114
A-43. Análise de variância para a exportação de ferro (Fe) por biomassa em $kg.ha^{-1}$	115
A-44. Análise de variância para a exportação de manganês (Mn) por biomassa em $kg.ha^{-1}$..	115
A-45. Análise de variância para a exportação de zinco (Zn) por biomassa em $kg.ha^{-1}$	115

A-46. Análise de variância para a exportação de nitrogênio (N) total em kg.ha^{-1}	116
A-47. Análise de variância para a exportação de fósforo (P) total em kg.ha^{-1}	116
A-48. Análise de variância para a exportação de potássio (K) total em kg.ha^{-1}	116
A-49. Análise de variância para a exportação de cálcio (Ca) total em kg.ha^{-1}	116
A-50. Análise de variância para a exportação de magnésio (Mg) total em kg.ha^{-1}	116
A-51. Análise de variância para a exportação de enxofre (S) total em kg.ha^{-1}	117
A-52. Análise de variância para a exportação de boro (B) total em kg.ha^{-1}	117
A-53. Análise de variância para a exportação de cobre (Cu) total em kg.ha^{-1}	117
A-54. Análise de variância para a exportação de ferro (Fe) total em kg.ha^{-1}	117
A-55. Análise de variância para a exportação de manganês (Mn) total em kg.ha^{-1}	117
A-56. Análise de variância para a exportação de zinco (Zn) total em kg.ha^{-1}	118

LISTA DE ABREVIATURAS

Símbolos	Nomenclatura
C	Carbono
H	Hidrogênio
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
S	Enxofre
P	Fósforo
K	Potássio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
B	Boro
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Zn	Zinco
Si	Silício
U	Umidade
CZ	Cinzas
CF	Carbono fixo
MV	Material volátil
H _{olo}	Holocelulose
LK _{ins}	Lignina Klason
ET	Extrativos totais
PCS	Poder calorífico superior
D _b	Densidade básica do disco
D _{b,pond}	Densidade ponderada da árvore
De	Densidade energética
MS	Massa seca
PE	Potencial energético
MEV	Microscópico eletrônico de varredura
NAI	Índice de assimilação de nutrientes

RESUMO

A bioenergia é uma das alternativas para diminuir a dependência de combustíveis fósseis da matriz energética mundial. Nos últimos anos, diversas agências e centros de pesquisa, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, estão incentivando projetos para geração de energia a partir da biomassa. Os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) surgem como uma opção interessante para produção de biomassa em curto espaço de tempo (1 a 3 anos após o plantio). Atualmente, essa biomassa está sendo utilizada na forma de cavacos para queima direta em caldeiras ou processada em briquetes e pellets. O objetivo principal da pesquisa foi realizar a caracterização das propriedades físicas e químicas das frações da biomassa florestal para combustão direta, por meio das análises de composição química elementar, imediata e estrutural, macro e micronutrientes, poder calorífico superior, densidade básica e energética da madeira. Adicionalmente, avaliou-se também o efeito do espaçamento de plantio e da dose de adubação nas propriedades: massa seca, potencial energético e exportação de nutrientes. Para isso, foram avaliados sistemas florestais de curta rotação de um clone híbrido interespecífico (C219) de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* em duas situações distintas de espaçamento de plantio (2,8m x 1,5m e 2,8m x 0,5m) e duas doses de adubação. A biomassa coletada foi fracionada em três partes, sendo elas: fuste (madeira com casca), galhos e folhas. Constatou-se que o espaçamento e a adubação influenciaram pouco as propriedades físicas e químicas da biomassa florestal e a maior diferença ocorreu entre as frações da biomassa. Destaque para os altos valores do poder calorífico superior (22,2 MJ.kg⁻¹), extrativos totais (37,9%) e cinzas (3,1%) das folhas em relação à madeira, que obteve poder calorífico superior de 18,9 MJ.kg⁻¹, extrativos totais de 2 % e cinzas próximo a 1,1%. A massa seca, o potencial energético e a exportação de nutrientes foram muito afetados pelos fatores de variação. Os maiores valores de massa seca e potencial energético foram encontrados para o espaçamento mais adensado e com a maior dose de adubação, respectivamente 39,6 t.ha⁻¹ e 762,9 GJ.ha⁻¹. Considerando que as folhas e os galhos têm participação muito importante na ciclagem dos nutrientes e uso sustentável do solo e conciliando esse quesito com o aproveitamento energético da biomassa florestal, o espaçamento de plantio mais adensado com a menor dose de adubação seria o mais indicado para esse fim.

Palavras-chave: Florestas energéticas, *Eucalyptus* sp., propriedades físicas e químicas, combustão direta, potencial energético.

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF BIOMASS FROM SHORT ROTATION WOODY CROPS FOR ENERGY GENERATION. Botucatu, 2015. 119p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR

Adviser: ADRIANO WAGNER BALLARIN

Co-adviser: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

SUMMARY

Bioenergy is one of the alternatives to reduce the dependence of global energy on fossil fuels. In recent years, several agencies and research centers, mainly in Europe and the United States, are encouraging projects for energy production from biomass. The short rotation forestry (SRF) appears as an interesting option for biomass production in a short time (1-3 years after planting). Currently, this biomass is used as chips for direct burning in boilers or processed as briquettes and pellets. The main objective of the research was to characterize the physical and chemical properties of the fractions of forest biomass to direct combustion, through analyses from ultimate, proximate and structural chemical compositions, macro and micronutrients, heating value, basic and energy density of wood. Additionally also evaluated the effect of spacing of planting and fertilizer dose on the properties: dry matter, energy potential and nutrient export. For this, a short rotation forestry of a hybrid clone (C219) of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* was studied in two different situations of plantation spacing (2,8m x 1,5m and 2,8m x 0,5m) and fertilizer levels. The collected biomass was fractionated into three parts: trunk, branches and leaves. Additionally, it was evaluated the effect of spacing of planting and fertilizer levels in properties, dry matter, energetic potential and nutrients exports. It was found that the spacing and fertilization had a little influenced in the physical and chemical properties of forest biomass and the largest difference occurred between the biomass fractions. Especially, the higher heating value (22,2 MJ.kg⁻¹), extractives (37,9%) and ash (3,1%) of leaves compared with the wood that obtained 18,9 MJ.kg⁻¹ for the higher heating value, 2% for extractives and 1,1% for ashes. For dry matter, energy potential and nutrients exports were more affected by variation factors. The highest values of dry matter and energy potential were obtained for the major dense spacing with the higher levels of fertilizer, respectively 39,6 ton.ha⁻¹ and 762,9 GJ.ha⁻¹. The leaves and branches have an important participation in cycle of nutrients and sustainable use of soil and combining it with the energetic use of forest biomass, the major dense spacing with the lower levels of fertilizer was more suitable for it.

Keywords: Energy forests, *Eucalyptus* sp., physical and chemical properties, direct combustion, energy potential.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa, principalmente a madeira, é a forma mais antiga de energia utilizada pelos seres humanos. Tradicionalmente, ela é aproveitada por meio da combustão direta, sendo esse processo largamente usado em muitas partes do mundo (DERMIBAS et al., 2009).

A biomassa é proveniente de uma fonte de energia solar que inicialmente é armazenada pelas plantas durante o processo de fotossíntese, onde o dióxido de carbono é captado e convertido em matéria, principalmente sob a forma de celulose, hemiceluloses e lignina (IEA, 2007). O potencial de utilização da biomassa como combustível inclui: madeira, culturas energéticas, resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, resíduos de processos alimentícios, plantas aquáticas e algas, resíduos de animais e uma série de outros materiais (DEMIRBAS, 2004).

Pode ser dividida em duas frentes em relação ao seu aproveitamento energético: a primeira chamada de biomassa tradicional, refere-se à biomassa sólida queimada de forma ineficiente, geralmente poluente, em sistemas de baixo rendimento para fornecer energia térmica para o cozimento, conforto e processamento agrícola e industrial em pequena escala, utilizada normalmente em área rural de países em desenvolvimento; a segunda, chamada de biomassa moderna, é aproveitada por meio da combustão eficiente da biomassa no estado sólido, líquido ou gasoso para aplicações modernas, desde pequenos aparelhos residenciais de alto rendimento até plantas industriais de conversão energética – geração de eletricidade, sistemas que combinam calor e produção de energia, e combustível automotivo (REN21, 2014).

A evolução do consumo mundial de energia baseada em combustíveis fósseis conduziu a humanidade para uma matriz energética insegura, cara e, sobretudo, bastante negativa para o meio ambiente (BRITO, 2007). Em 2012, os combustíveis fósseis representaram aproximadamente 78,4% do consumo energético mundial (REN21, 2014).

Com a crescente demanda por fontes renováveis de energia, estudos sobre a geração de energia a partir da biomassa florestal têm sido realizados no Brasil e no mundo, resgatando o potencial da biomassa, inclusive da madeira, para geração de energia limpa (MOREIRA, 2011). A utilização da biomassa para energia será um dos fatores mais importantes para a proteção do meio ambiente no século 21. A biomassa absorve CO₂ durante o crescimento e libera o mesmo durante a combustão. Portanto, além de auxiliar na reciclagem de CO₂ atmosférico, também não contribui para o efeito estufa (DEMIRBAS et al., 2009). Além disso, a substituição direta de combustíveis fósseis para biomassa leva a uma redução considerável da emissão de óxidos de enxofre e de nitrogênio (LORA, ANDRADE, 2009).

Em 2013, a biomassa respondeu por 10% (aproximadamente 56,6 EJ – $56,6 \times 10^{18}$) do uso da energia utilizada no mundo (REN21, 2014) e estudos projetam que a biomassa moderna possa representar até 50% dessa energia total em 2050 (DEMIRBAS et al., 2009).

Segundo o Balanço Energético Nacional – BEN (Brasil, 2014) em 2013, a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira foi de 41,0% (2013), valor muito acima da média mundial, que é de 13,0% (2011). Das energias renováveis no Brasil, quando comparadas na mesma unidade térmica (tep – tonelada equivalente de petróleo), 16,1% são provenientes da biomassa de cana de açúcar (produção de etanol para uso como combustível automotivo), 12,5% de hidrelétricas (produção de eletricidade), 8,3% de lenha e carvão vegetal (siderurgia) e 4,2% de outros recursos como eólicos e solar. Considerando exclusivamente a produção de energia elétrica nacional, a diferença entre os recursos renováveis e não renováveis no Brasil é ainda maior, sendo que o primeiro representa 79,3% (70,6% correspondem às hidrelétricas, 7,6% à biomassa e 1,1% à eólica) e o segundo 20,7% (11,3% correspondem ao gás natural, 4,4% aos derivados de petróleo, 2,6% ao carvão mineral e 2,4% à usina nuclear).

No panorama mundial, o Brasil se destaca pela grande disponibilidade de recursos naturais - considerável extensão territorial, abundância hídrica

e de radiação solar - que permitem uma alta taxa de crescimento e elevada produtividade nas florestas plantadas. Em 2012, a área ocupada por plantios florestais de eucaliptos e pinus no Brasil totalizou 6,7 milhões de hectares sendo 76,6% correspondente à área de plantios de eucaliptos e 23,4% a plantios de pinus (ABRAF, 2013).

Mais recentemente, os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) para a produção de energia estão se tornando alvo de interesse pelas principais agências de fomento e centros de pesquisa mundiais (GUERRA et al., 2012). Utilizam o adensamento de plantio e redução do tempo de corte para aumento do rendimento, além de um novo conceito de colheita florestal, que difere dos sistemas utilizados para as florestas de rotação tradicional (maiores toras de madeira). Neles faz-se a colheita de toda biomassa acima do solo (fuste, galhos e a copa das árvores), que é reduzida a cavacos durante a operação. Desta forma, ressaltam-se o potencial redutivo do processo e a diminuição de etapas, diminuindo custos e, portanto, o valor final da matéria-prima (GUERRA et al., 2014).

Embora numerosos estudos sobre essa temática tenham sido realizados em todo o mundo, durante as duas últimas décadas (VASSILEV et al., 2010; (BRAND; MUÑIZ, 2012) para sistemas florestais convencionais (BALLONI E SIMÕES, 1980; SCHÖNAU E COETZEE, 1989; BARREIROS et al., 2007; KUMAR et al., 2010) algumas influências como diferentes materiais genéticos, e a de manejo florestal adotado são ainda pouco conhecidos para os SFCR devido, sobretudo à recente implantação do mesmo no Brasil.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo principal realizar a caracterização física e química da biomassa florestal para combustão direta, separada em madeira com casca (fuste), galhos e folhas, proveniente de sistemas florestais de curta rotação de um híbrido interespecífico de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. Tem, ainda, como objetivos específicos:

- avaliar o efeito do espaçamento de plantio e da dose de adubação nas propriedades físicas e químicas;
- analisar a qualidade das cinzas das biomassas florestais;
- determinar a massa seca, potencial energético e a exportação dos nutrientes nos sistemas estudados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa florestal

A floresta é definida como uma área medindo pelo menos 0,5 ha com árvores maiores que 5 metros de altura e cobertura de copa superior a 10%, ou árvores capazes de alcançar estes parâmetros in situ. Ela não inclui a área que está predominante sob uso agrícola ou urbano (FAO, 2004).

Há no mundo mais de quatro bilhões de hectares com florestas, sendo que o Brasil é o segundo país com maior extensão florestal (520 milhões ha) tendo à sua frente, apenas a Rússia (809 milhões ha). A conservação da floresta é fundamental, pois ela tem uma função importante relacionada à proteção do solo e da água, aumentando a infiltração, reduzindo o escoamento superficial, evitando os processos erosivos e assoreamento dos sistemas hídricos (FAO, 2010). A biomassa florestal é constituída de compostos orgânicos sintetizados pelas árvores na fotossíntese (STUPAK et al., 2008). O termo biomassa florestal abrange, assim, os materiais orgânicos tanto acima quanto abaixo do solo, ambos vivos e mortos, por exemplo, árvores, culturas, gramíneas, raízes, entre outros. A biomassa viva acima do solo inclui: fuste, tocos, galhos, cascas, sementes e folhagens, e abaixo do solo compreende as raízes. Já a biomassa morta é referente aos resíduos de lenho, raízes e tocos, contidos no solo até o dossel da floresta (FAO, 2004).

As florestas plantadas surgem como opção para produção de biomassa florestal. Segundo a FAO (2010) elas são compostas por árvores estabelecidas por meio do plantio de espécies nativas ou introduzidas (exóticas), geralmente destinadas

para produção de madeira, e são importantes para diminuir a pressão sobre as florestas naturais.

Os estudos aplicados à avaliação da biomassa de florestas plantadas enfocam a separação dos componentes da árvore em madeira (fuste), casca, galhos e folhas. No geral, a madeira é o componente da árvore com a maior quantidade de carbono estocado, seguido dos galhos, da casca e das folhas (SOARES; OLIVEIRA, 2002).

A biorrefinaria e os múltiplos processos de conversão dessa biomassa para produção de energia, produtos químicos e outros materiais, permitem a utilização plena das diferentes frações que compõem a biomassa (Figura 1). Entretanto, por ser um material de natureza celular, apresenta uma elevada complexidade e diversidade a níveis macro, micro e nano (PEREIRA, 2012).

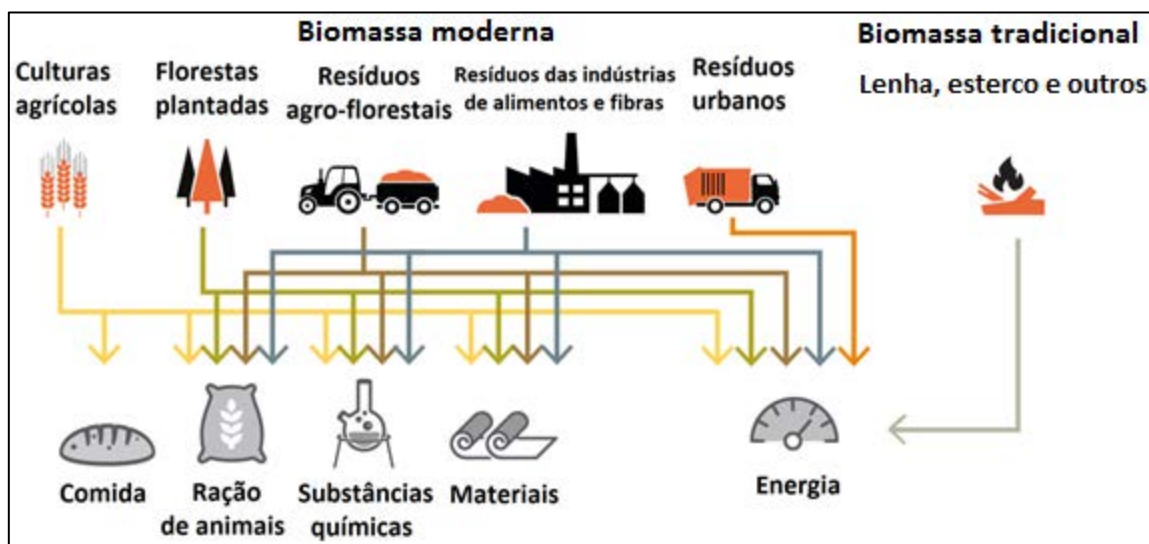


Figura 1. Vias de aproveitamento da biomassa. Fonte: REN21 (2014) adaptada pelo autor.

Na produção de pellets e briquetes, por exemplo, a qualidade do produto final (higroscopicidade, friabilidade, entre outros) é influenciada pelo tipo de matéria-prima utilizada e pelas condições de armazenamento (YAMAJI et al., 2010, YAMAJI et al., 2014). Por essas razões, muitas vezes, é necessário a preparação da biomassa como combustível para minimizar variações e fornecer um material mais homogêneo para uma combustão eficiente (KARCHESY; KOCH, 1979).

Algumas culturas agrícolas e florestais têm maior potencial de fornecimento de biomassa e quando destinadas para geração de energia são comumente chamadas de culturas energéticas e devem atender duas condições principais: adaptação ao

ambiente em que estão crescendo, com resistência a patógenos e ao clima, entre outros, e boas características como fonte energética (PÉREZ, et al, 2011).

As principais espécies utilizadas pelo mundo na produção de biomassa florestal para fins energéticos são: o eucalipto (*Eucalyptus*), o “willow” (*Salix*) e o “poplar” (*Populus*). Outras espécies tais como algaroba (*Prosopis*), leucena (*Leucaena leucocephala*), acácia (*Acacia*), bracatinga (*Mimosa scabrella*) e gmelina (*Gmelina*) também apresentam grande potencial (COUTO et al., 2003).

No Brasil, dentre as espécies florestais, as do gênero *Eucalyptus* têm sido preferidas para essa finalidade, por apresentarem excelente produção volumétrica, boas características da madeira (GOULART et al., 2003) e custo médio de produção inferior aos preços de outras fontes de energia, tornando a atividade competitiva (QUÉNO et al., 2011).

2.1.1 O gênero *Eucalyptus* e suas potencialidades no Brasil

O gênero *Eucalyptus* tem a sua origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Embora existam cerca de 730 espécies reconhecidas botanicamente, não mais que vinte delas são utilizadas comercialmente em todo o mundo (QUEIROZ, 2009). As espécies de interesse para o Brasil são originárias da costa Leste e das ilhas ao Norte da Austrália. Nessas áreas existem mais ou menos 200 espécies, das quais apenas algumas são de interesse comercial (PRYOR, 1971).

Os eucaliptos foram bem sucedidos como espécies exóticas por causa de sua capacidade de crescimento rápido e tolerância de ambientes agressivos que envolvem muitas adaptações eficazes como, capacidade de rebrota, resistência a secas, e a insetos e tolerância à baixa fertilidade e acidez do solo (ROCKWOOD et al., 2008).

O eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904 por Edmundo Navarro de Andrade. No caso brasileiro, houve um grande envolvimento e o trabalho integrado de instituições relacionadas ao setor florestal (universidades, institutos de pesquisa, empresas, laboratórios e associações), que atuaram junto às esferas governamentais para que fosse constituído um cenário favorável ao desenvolvimento e consolidação do setor produtivo baseado no cultivo do gênero *Eucalyptus* (FREITAS JUNIOR, 2011).

O Brasil apresenta condições extremamente favoráveis de clima e de solo ao plantio do eucalipto, o que lhe confere rápido crescimento, atingindo os mais

altos índices de produtividade do mundo (QUEIROZ, 2009). O nível de qualidade alcançado pela tecnologia florestal brasileira se faz materializado pela grande variedade de material genético selecionado que já foi produzido e pelas altas taxas de produtividades observadas em várias regiões do País. Atualmente podem ser observados valores que variam de 25 a 80m³.ha⁻¹.ano⁻¹ no manejo convencional (COUTO et al., 2004).

A madeira de *Eucalyptus* começou a se destacar na indústria de produtos sólidos a partir da última década, como fonte de matéria-prima de usos múltiplos (GONÇALEZ et al. 2006). Ela pode ainda ser convertida em uma variedade de produtos químicos e de energia, incluindo combustíveis líquidos e eletricidade (ROCKWOOD et al., 2008).

2.1.2 Sistemas florestais de curta rotação

Os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) ou *Short Rotation Woody Crops* (SRWC) são conduzidos em condições que diferem do manejo convencional em diversos aspectos, entre eles: são utilizadas espécies de rápido crescimento, há um manejo intensivo (focando o alto controle de matocompetição, fertilização e irrigação) e alta densidade de árvores no plantio (CHRISTOPHERSON; MATTSON, 1990). Como são comumente utilizados para fins energéticos, a biomassa produzida é convertida em cavaco e direcionada para queima direta em caldeiras ou é processada na forma de briquetes e pellets, a fim de melhorar suas características físicas e térmicas (GUERRA et al., 2012).

Esses sistemas visam uma maior produção de volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (MÜLLER, 2005). As terminologias “florestas de ciclo curto” ou “florestas energéticas” começaram a ganhar força no Brasil a partir da década de 1980 com os estudos realizados por pesquisadores como Brito e Barrichelo (1978), Rezende et al. (1980) e Magalhães (1982). Esse último autor, define florestas energéticas como plantações florestais de curta rotação com grande número de árvores por hectare que tinham como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo.

Os SFCR são manejados de forma adensada em linhas simples ou duplas com intervalos de corte de dois a três anos. A densidade de plantio depende de fatores como a espécie e o tipo de sistema de colheita utilizado. No Brasil, o gênero *Eucalyptus* possui o maior rendimento para produção de biomassa em curto espaço de tempo, os plantios adensados dessa espécie conseguem atingir valores maiores de 50 m³ de

madeira por hectare (20 a 25 toneladas por hectare ano) em ciclos de um ano no espaçamento 3m x 0,5m - 6667 árvores.ha⁻¹ (MÜLLER, 2005; SARTÓRIO, 2014; GARCIA, 2013; MACHADO, 2014) até 120m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (45 toneladas por hectare ano) em condições ótimas de manejo (GUERRA et al., 2012). Em outros países que utilizam essa tecnologia, os índices de produtividade brasileira só são alcançados com o dobro do tempo (Tabela 1).

Tabela 1. Produção em t.ha.ano⁻¹ de madeira para diferentes espécies de eucalipto conduzidas no sistema florestal de curta rotação em diferentes países.

Espécie	Produtividade (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Idade (anos)	Número de árvores.ha ⁻¹	País	Autores
<i>Eucalyptus. spp.</i>	14,1	3	4167	Nova Zelândia	Guo et al. (2002)
<i>E. bridgesiana</i>	6,5	2	6667	Itália	Navarro et al. (2012)
<i>E. grandis</i>	16,0	3,5	3400	EUA	Rockford et al. (2008)
<i>E. amplifolia</i>	17,8	3,5	3400	EUA	Rockford et al. (2008)
<i>E.. globulus</i>	5,3	3	4000	Austrália	Sochacki et al. (2013)
<i>E. occidentalis</i>	7,3	3	4000	Austrália	Sochacki et al. (2013)

Nesses sistemas, a colheita florestal tem recebido atenção especial, pois essa etapa compromete metade dos custos operacionais (CHRISTOPHERSON; MATTSON, 1990) e o preço final do processo é um dos fatores determinantes para escolha da biomassa (JIRJIS, 1995). Para minimizar o custo do *Eucalyptus* nos sistemas adensados, vem sendo adotado o sistema de talhadia, ou seja, condução da floresta em mais rotações. Aliado a isso, por ser um material volumoso (baixa densidade) e com alta umidade, a biomassa florestal apresenta dificuldades de transporte, estocagem e uso (DEMIRBAS, 2010).

O desenvolvimento dos modelos e as máquinas de colheita adaptados aos sistemas florestais de curta rotação iniciou-se na década de 1990 na Europa. Alguns modelos já estão consolidados, especialmente na Itália, para plantios adensados de *Populus* e *Salix*. No Brasil, esse sistema de colheita ainda é recente e está em fase de adaptação para as florestas de *Eucalyptus* (GUERRA et al., 2012). Atualmente, vem sendo utilizada a colhedora autopropelida (modelo FR9060 e marca New Holland) acoplada com uma plataforma de corte (modelo 130FB e marca New Holland) que recolhe de forma contínua toda biomassa acima do solo, incluindo fuste, galhos e a copa das árvores dos SFCR. A biomassa é cavaqueada e transferida simultaneamente para um transbordo (Figura 2).



Figura 2. Sistema mecanizado de SFCR de *Eucalyptus* no Brasil.

Quando comparado com o sistema tradicional (Figura 3), o sistema mecanizado do SFCR possui menor número de etapas, sendo que não há necessidade de uma chipadora estacionária, evitando os custos adicionais com outras máquinas e equipamentos. Além disso, a biomassa florestal fracionada (cavacos) acelera o processo de secagem, pois aumenta a área superficial em contato com o ambiente.

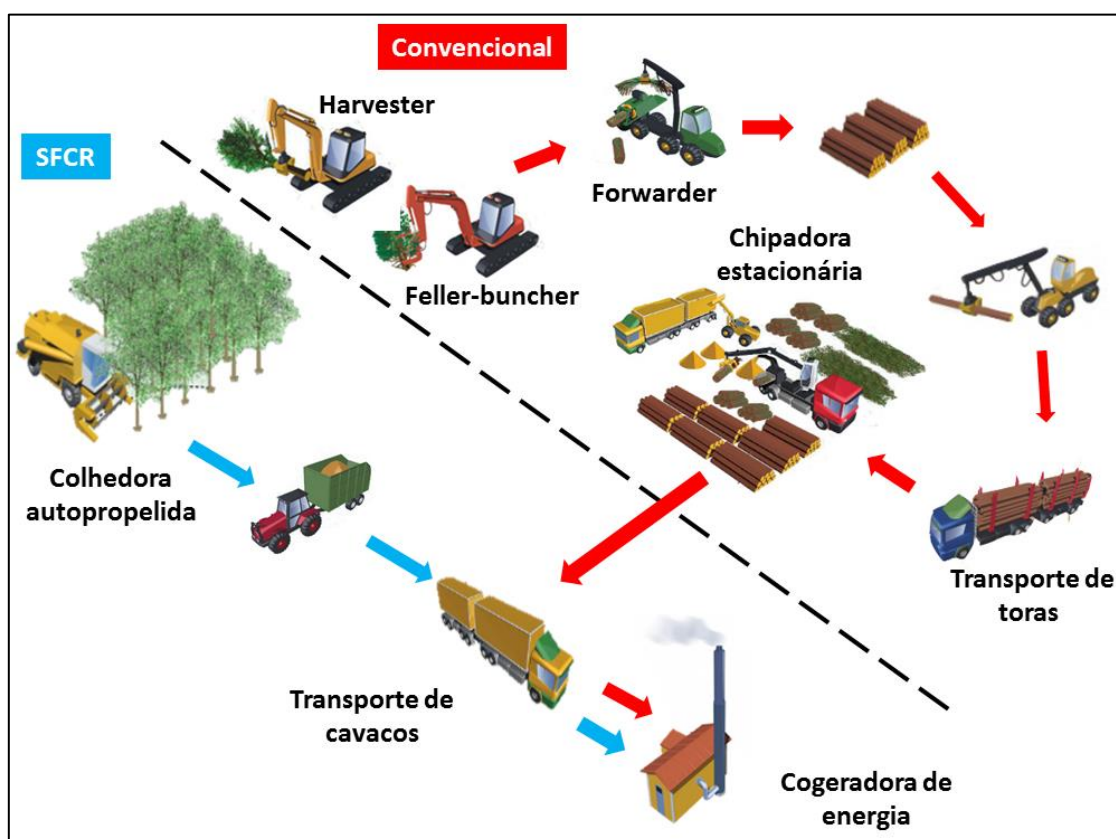


Figura 3. Comparação entre os sistemas de colheita mecanizado do SFCR e convencional.
Fonte: Forest Energy Portal (2015) modificado pelo autor.

As primeiras pesquisas foram conduzidas pelos professores Saulo Philipe Sebastião Guerra e Kléber Pereira Lanças da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), Botucatu-SP.

2.1.3 Conversão direta da biomassa florestal em energia

As tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa florestal podem ser classificadas em dois grupos. O primeiro refere-se à utilização da biomassa como recurso energético primário, a partir de sua combustão direta, e o segundo faz o uso de combustíveis derivados de processos termoquímicos, como a pirólise, gaseificação e liquefação, ou processos biológicos, como a fermentação e a digestão (BRIDGEWATER, 2006).

A combustão da biomassa fornece o calor que deve ser utilizado imediatamente para o aquecimento ou geração de eletricidade (BRIDGWATER, 2003). A combustão direta pode ocorrer em fogões para cozimento de alimentos, fornos ou fornalhas utilizados na siderurgia e caldeiras para geração de vapor. Os sistemas típicos usados para a madeira são: queima em grelha, queima de combustível pulverizado e queima em leito fluidizado. O mais comum é o que acontece sobre as grelhas que podem ser fixas ou móveis (BRAND, 2010).

A combustão é um processo de oxidação que resulta na liberação de energia (Tabela 2) e os principais elementos combustíveis na madeira são o carbono e o hidrogênio. A oxidação completa do carbono forma dióxido de carbono (CO_2) e calor (energia); a oxidação completa de hidrogênio (H_2) produz água (H_2O) e calor. Entretanto, a combustão nem sempre é completa, o que resulta na liberação de quantidades menores de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, e outras substâncias (KARCHESY; KOCH, 1979).

Tabela 2. Reações químicas básicas durante a combustão.

Conversão	Reação química	Calor de reação (MJ.kg^{-1})
Combustão completa do carbono	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	33,9
Combustão incompleta do carbono	$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	10,2
Combustão do hidrogênio	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	141,9
Combustão do enxofre	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	9,2

Fonte: CETEC (1988) adaptado pelo autor

Karchesy e Koch (1979), citando Fernandes (1979), reportaram que a queima da madeira pode ser dividida em três fases consecutivas. Na primeira fase, o teor de água é evaporado até secar a madeira. Na segunda fase, a temperatura do combustível aumenta promovendo a evaporação e queima dos componentes voláteis. Na terceira fase, o carbono fixo (carbono restante após a liberação dos componentes voláteis) é queimado, tanto mais rápido quanto mais oxigênio é colocado em contato com ele.

Geralmente, a eficiência da combustão tende a ser bastante baixa, de cerca de 15% para as pequenas plantas até 30% para as maiores plantas industriais e mais modernas (BRIDGWATER, 2003).

2.2 Caracterização física e química da biomassa para fins energéticos

O conhecimento sobre a composição e as propriedades da biomassa é importante na busca da melhor utilização desse material do ponto de vista energético e ambiental (CHIANG et al., 2012). Com tal conhecimento é possível conciliar o manejo florestal à qualidade do produto final obtendo, assim, maior rentabilidade (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989). A qualidade energética da biomassa envolve o estudo das seguintes propriedades: a densidade, teor de minerais, poder calorífico, composição química (elementar imediata e estrutural) e umidade (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2009).

Ragland et al. (1991) agruparam as propriedades da madeira como combustível em propriedades físicas, térmicas, químicas e minerais. Essa divisão também pode ser aplicada para a biomassa no geral. Segundo o autor, as propriedades físicas englobam a densidade, tamanho de partícula, a área interna e externa da superfície por unidade de volume, porosidade e cor. As propriedades químicas incluem a análise elementar, a análise imediata, poder calorífico, entre outras. As propriedades térmicas incluem calor específico, condutividade e emissividade térmica e, por último, as propriedades minerais que avaliam a quantidade e composição das cinzas.

Em geral, a composição química elementar, imediata e estrutural dos tipos de biomassa (culturas agrícolas e florestais) tem uma variação considerável (DEMIRBAS, 2004; CUIPING et al., 2004; VASSILEV et al., 2010). Essas variações nas propriedades têm implicações para o manuseio de matéria-prima, transporte, secagem, armazenamento e para o arranjo dos sistemas de conversão de energia (SENELWA; SIMS, 1999).

Particularmente para a biomassa florestal, a madeira destinada a energia deve possuir elevada densidade, alto teor de lignina; elevado poder calorífico; baixa umidade (na hora da queima), e baixo teor de minerais (BARCELLOS et al., 2005).

2.2.1 Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira é uma das propriedades mais estudadas na tecnologia da madeira (PANSIN; DE ZEEUW, 1980). É definida como a massa seca por unidade de volume saturado (verde) (BOWYER et al., 2003).

O uso de madeiras com baixa densidade para a produção direta de energia na forma de calor implica em uma queima rápida e numa menor produção de energia por unidade de volume, ao contrário do observado para madeiras com maiores densidades. Porém, densidades elevadas implicam em dificuldade de iniciar a queima do material (VALE et al., 2002).

Na Tabela 3 são apresentados valores de densidade básica da madeira de espécies de rápido crescimento para bioenergia no mundo.

Tabela 3. Densidade básica da madeira de algumas espécies florestais em sistemas florestais de curta rotação.

Espécie	D _b (kg.m ⁻³)	Idade (anos)	Número de árvores.ha ⁻¹	Local e Autores
<i>Eucalyptus grandis</i>	367	3	5000	Brasil, Eloy et al. (2014)
<i>Acacia dealbata</i>	366	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Alnus glutinosa</i>	316	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Eucalyptus nitens</i>	411	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Eucalyptus saligna</i>	446	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Eucalyptus ovata</i>	407	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Pinus radiata</i>	282	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Salix kinuyanagi</i>	450	3	3470	Nova Zelândia, Senelwa e Sims (1999)
<i>Salix alba</i>	381	2	4444	Iugoslávia, Klasnja et al. (2002)
<i>Populus deltoides</i>	402	2	4444	Iugoslávia, Klasnja et al. (2002)

Trugilho et al. (1996), estudando árvores de *Eucalyptus saligna* de 12 a 48 meses de idade, constataram que a densidade básica apresentou coeficientes de correlação negativos e significativos com o teor de extrativos totais e lignina, e positivo com o teor de holocelulose, demonstrando que a densidade básica está relacionada com a composição química da madeira.

Brito e Barrichelo (1980) destacaram a alta correlação da densidade básica da madeira com a densidade aparente do carvão vegetal. Os autores reportaram que a escolha de espécies de eucalipto cujas densidades sejam elevadas seria mais interessante para produção do carvão vegetal.

2.2.2 Composição química elementar, estrutural e imediata

A composição elementar corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa. Expressa normalmente os conteúdos de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), cinzas (A) e, em algumas vezes, também o de cloro (Cl).

Vassilev et al. (2010) revisando os teores elementares das mais diversas fontes de biomassa, encontraram os seguintes intervalos de valores médios: C (42-71%); O (16-49%); H (3-11%); N (0,1-12%); S (0,01-2,3%), e Cl (0,01-0,9%).

A Tabela 4 apresenta a composição elementar de diversas fontes de biomassa para energia.

Tabela 4. Análise elementar para diversas fontes energéticas de biomassa.

Biomassa	C(%)	O(%)	H(%)	N(%)	S(%)
Eucalipto (folhas)	50,15±2,55	39,64±3,88	7,45±0,46	0,5±0,47	0,02±0,03
Willow (árvore)	46,79±1,14	40,60±3,75	7,10±0,44	0,77±0,79	0,30±0,17
Poplar (árvore)	47,46±0,45	44,50±1,36	6,74±0,02	0,17±0,06	0,10±0,09
Pinus (árvore)	49,41±0,24	42,19±0,61	7,67±0,42	0,10±0,02	0,05±0,04
Palha de arroz	38,52±1,03	39,28±2,14	6,13±0,49	0,69±0,21	0,29±0,17
Palha de trigo	42,11±2,12	40,51±2,67	6,53±0,46	0,58±0,28	0,32±0,10
Palha de milho	42,69±1,47	42,69±2,11	6,16±0,81	0,99±0,20	0,21±0,13
Soja	43,16±1,13	44,76±2,42	6,9±0,13	0,95±0,28	0,20±0,04
Casca de amendoim	45,90±0,54	42,79±0,05	6,74±0,27	1,17±0,09	0,18±0,05

Fonte: Cuiping et al. (2004)

A composição química estrutural da biomassa consiste principalmente na determinação dos teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas. Segundo Lewin e Goldstein (1991), a composição média da madeira apresenta 40 a 45% de celulose, 20 a 30% de hemiceluloses, 18 a 35% de lignina, 3 a 8% de extrativos e 0,4% de cinzas. Pereira (2012) reportou que a biomassa tem uma natureza lignocelulósica, entretanto essa conotação é uma aproximação grosseira da sua complexidade química.

A celulose é composta por unidades de D-glicopirranose, interligadas por ligações glicosídicas β 1-4 formando longas cadeias. As hemiceluloses são polímeros de várias unidades de açúcares diferentes que originam cadeias ramificadas. As ligninas são moléculas amorfas e complexas, formadas principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano. Já os extrativos são compostos químicos formados a partir de graxas, ácidos graxos, fenóis, terpenos, resinas ácidas, resinas, ceras, e outros tipos de compostos orgânicos (ROWELL et al., 2005).

A energia da combustão varia consideravelmente com o conteúdo químico; há uma alta correlação linear significativa entre o poder calorífico superior e os teores de extrativos e lignina na madeira (WHITE, 1987), ao contrário da holocelulose (DEMIRBAS, 2001). Resina, taninos, lignina, terpenos e ceras têm valores elevados de energia, já carboidratos têm valores relativamente baixos (HOWARD, 1973).

Normalmente as coníferas apresentam maiores teores de extrativos e lignina do que as folhosas (RAGLAND et al., 1991). Howard (1973) estudou espécies de pinus e comparou o poder calorífico dos componentes isoladamente, e encontrou os maiores valores para os extrativos (resina) de 34,9 a 37,2 MJ.kg⁻¹, lignina de 23,3 a 25,6 MJ.kg⁻¹ e holocelulose de 18,60 MJ.kg⁻¹, constatando que os extrativos foram os que mais contribuíram energeticamente.

Existem também diferenças nas estruturas de diferentes espécies de materiais lignocelulósicos, relacionadas aos tipos de lignina e extrativos (DEMIRBAS, 2001). A lignina das gramíneas, folhosas e coníferas, por exemplo, difere na composição, principalmente nas proporções de unidades *p*-hidroxifenila, guaiacila e siringila. A Tabela 5 apresenta os teores de celulose, hemiceluloses e lignina para diversas fontes de biomassa.

Tabela 5. Composição química estrutural percentual de biomassas para energia.

Biomassas	Celulose	Hemicelulose	Lignina total
Palha de trigo	45,2	33,8	20,9
Palha de milho	30,9	51,5	17,6
Casca da madeira	30,3	25,6	44,1
Madeira de folhosas	32,3	45,9	21,9
Madeira de coníferas	24,8	42,7	32,5

Fonte: Demirbas (2001)

A Tabela 6 exemplifica as diferenças da composição química estrutural dos componentes da biomassa de uma mesma árvore.

Tabela 6. Composição química estrutural percentual para as frações da biomassa de uma árvore.

	Madeira	Casca	Folhas
Celulose	40-60	20-40	15-35
Lignina	20-35	20-30	10-15
Hemicelulose	15-30	20-30	10-15
Extrativos	1-10	5-30	15-50
Suberina	-	2-45	1-4
Cinzas	> 1	2-15	2-7

Fonte: Pereira (2012)

A composição química imediata de um combustível quantifica as percentagens de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas. Ela fornece a percentagem do material que se queima no estado gasoso - material volátil - e no estado sólido - carbono fixo, bem como fornece uma indicação do material residual - cinzas (BRITO, BARRICHELO, 1978).

A Tabela 7 apresenta a composição imediata de materiais lignocelulósicos para energia.

Tabela 7. Análise imediata e poder calorífico para diversas fontes de biomassa para energia.

Biomassas	MV (%)	CF (%)	CZ (%)	U (%)	PCS (MJ.kg)
Eucalipto (folhas)	67,75±5,01	20,19±2,77	5,55±2,24	6,5±1,2	19,33±1,60
Willow (árvore)	69,2±5,08	15,55±1,99	6,17±3,7	9,08±1,45	18,79±0,40
Poplar (árvore)	74,04±0,36	15,42±1,14	2,63±0,87	7,91±1,65	18,57±0,17
Pinus (árvore)	76,50±2,45	14,45±0,41	0,89±0,13	8,61±1,91	19,38±0,35
Palha de arroz	61,10±2,51	15,54±1,36	15,25±2,64	8,11±1,51	14,66±0,71
Palha de trigo	63,96±7,29	14,96±1,49	12,25±9,02	8,63±2,03	16,56±1,05
Palha de milho	62,74±6,15	14,83±2,13	13,12±8,79	9,21±2,05	16,64±0,38
Soja	68,95±1,74	15,62±0,17	6,08±1,10	9,34±1,88	16,96±0,62
Casca de amendoim	61,64±1,9	16,85±0,71	12,15±3,02	9,36±0,41	18,62±0,21

MV(%) = material volátil; CF(%) = carbono fixo; CZ(%) = cinzas; U(%)= umidade; PCS (MJ.kg⁻¹) = poder calorífico superior.

Fonte: Cuiping et al. (2004)

A composição imediata afeta diretamente a biomassa como fonte energética. A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível pelo fato dos componentes voláteis, quando

aquecidos, saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa. O carbono fixo queima-se vagarosamente na fase sólida como carvão (BRITO; BARRICHELLO, 1978).

Brand (2010) citou que os teores de voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais e por meio deles pode-se estimar o grau de combustão de uma fonte energética. A autora afirmar, ainda, que os voláteis possuem um papel importante na queima da biomassa, pois quando volatilizados, esses componentes químicos no estado gasoso se misturam com o oxigênio do ar, promovendo as reações de combustão.

O conteúdo de voláteis reflete a reatividade do combustível: quanto maior o teor de voláteis, maior a reatividade e mais rápida é a ignição. Durante a combustão da biomassa, são convertidos em voláteis aproximadamente 70 a 80 % da matéria seca (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997).

A umidade reduz o calor disponível a partir do combustível, pois diminui o poder calorífico da madeira; afeta a eficiência de combustão uma vez que o calor é absorvido na evaporação de água nas fases iniciais da combustão (SENELWA; SIMS, 1999). Para a maioria dos combustíveis de biomassa o limiar térmico para o próprio material manter a combustão é próximo a 65% de umidade na base úmida. Acima deste valor, a energia liberada pela combustão é insuficiente para evaporar a água e aquecer a biomassa. Na prática, quando a biomassa está com 50 a 55% de umidade, é necessário um combustível suplementar para queima do material (JENKINS et al., 1998). A umidade também é determinante para escolha do sistema de armazenamento e secagem da biomassa entre o período da colheita e sua utilização energética (JIRJIS, 1995).

As cinzas (matéria mineral) da madeira são constituídas principalmente de sais de cálcio, potássio e magnésio, mas sais de muitos outros elementos também estão presentes em quantidades menores (RAGLAND et al., 1991). Nas árvores, o teor de sílica da casca é mais elevado do que a de madeira, pois é agravado devido à contaminação pelo solo carregado pelo vento e durante a colheita florestal, o teor mineral da madeira é de 0,1% a 0,6% e da casca varia de 3% a 5% (RAGLAND et al., 1991).

Os altos teores de água e cinzas podem causar problemas de ignição e combustão (DEMIRBAS, 2004). Para entender o que ocorre durante a combustão é essencial para investigar com mais detalhes a composição elementar e as reações que ocorrem em sua formação. Estudos contemplam a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV) nessas análises (OLANDERS; STEENARI, 1995).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) se baseia no uso de um feixe de elétrons, extremamente estreito, aplicado para varrer uma amostra, isto é, o feixe de elétrons atravessa a amostra, fazendo que a mesma emita elétrons. Assim a imagem é construída em sequência, no tempo, à medida que a amostra é varrida (GALLETI, 2003).

Essa tecnologia também é aplicada para outros estudos tecnológicos. Belini et al. (2008) analisaram as alterações na estrutura anatômica de cavacos de madeira em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF (Medium-density fiberboard) e Lopes (2008) avaliou a região de fratura da interface madeira-adesivo em painéis de madeira colados lateralmente.

Para as cinzas, Etitgni e Campbell (1991) e Olanders e Steenari (1995) utilizaram o MEV associado com detectores de energia dispersiva de raios-X para estudar a composição química das cinzas de madeira e outras biomassas em função da temperatura de combustão. O espectrômetro por dispersão de energia de raios-X (EDS) é essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida, que é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-X. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas no ponto de incidência do feixe, é possível determinar quais elementos químicos estão presentes naquele local e, assim, identificar o mineral que está sendo observado (MICROLAB, 2015).

As imagens geradas pelo MEV também são obtidas para compreender a microestrutura das cinzas da madeira. São avaliados pontos na superfície da amostra detectando a presença de elementos (silicatos, carbonatos, sais) que podem ter implicações negativas nos equipamentos industriais (NAIK et al., 2001).

O conhecimento sobre a manutenção ou a volatilização de elementos metálicos alcalinos e halogênios nas cinzas durante a combustão da biomassa é importante para uma utilização em larga escala, eficiente e economicamente viável, de muitos resíduos agrícolas e florestais. A combustão da biomassa em caldeiras pode levar ao acúmulo de resíduos diversos e incrustações nas superfícies aquecedoras (como exemplo, nas resistências elétricas de fornos). Tais depósitos retardam a taxa de

transferência de calor, reduzindo a eficiência e aumentando a corrosão de superfícies metálicas (THY et al., 2006).

2.2.3 Poder calorífico

A eficiência final das culturas energéticas é resultado da interação de dois tipos de variáveis: a primeira relacionada à produção de biomassa por hectare em curto espaço de tempo; a segunda relacionada ao poder calorífico das diferentes partes que formam a biomassa, ou seja, a energia da espécie (PÉREZ, et al, 2011; VALE et al., 2000).

O poder calorífico de um corpo é a quantidade de calor liberada na combustão por unidade de massa (DOAT, 1977). É um dos principais parâmetros para diferenciação relativa entre combustíveis (KUMAR et al., 2010). Segundo o Sistema Internacional de Unidades – SI, ele é expresso em MJ.kg^{-1} ; entretanto muitos autores ao longo dos anos reportaram os resultados em cal.g^{-1} ou kcal.kg^{-1} .

O poder calorífico de um combustível pode ser relatado em duas bases, o poder calorífico bruto ou poder calorífico superior e o poder calorífico líquido ou poder calorífico inferior. O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa, determinado em laboratório com a amostra seca. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de energia disponível (calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis) considerando o calor perdido para a vaporização da água, desta forma determinado com a amostra com dado teor de água (SHENG; AZEVEDO, 2005, BRAND, 2010).

Na Tabela 7 (item 2.2.2), foi apresentado o poder calorífico superior para algumas fontes de biomassa. No geral, são encontrados valores médios de PCS de 14 MJ.kg^{-1} a 21 MJ.kg^{-1} para diversas biomassas (DEMIRBAS, 2004). Os valores médios de PCS encontrados por Brito e Barrichelo (1979) variaram de $12,54 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a $22,57 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Kollmann e Côté (1968) reportaram que o poder calorífico superior médio das madeiras é de $18,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Pérez et al. (2011), estudando a biomassa florestal de diferentes plantios jovens de diversas espécies de eucaliptos para fins energéticos na Espanha, concluíram que a fração folha é a parte com maior poder calorífico. Eles encontraram valores de $19,6$ a $23,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para as folhas, $18,1$ a $18,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para madeira e $16,9$ a $18,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para os galhos.

O poder calorífico tem uma relação negativa com a umidade (LIMA et al., 2008) e com as cinzas (SHENG; AZEVEDO, 2005; HOWARD, 1973). No momento da combustão, a umidade influencia fortemente o valor do poder calorífico, sendo até duas vezes maior para a biomassa no estado seco (PÉREZ et al., 2011).

2.2.4 Macro e micronutrientes

A determinação de macro e micronutrientes na biomassa vegetal é muito importante, pois permite estudar a quantidade de nutrientes que será exportado pela colheita e, desta forma, identificar quais as práticas de manejo que deverão ser adotadas para manter a sustentabilidade nutricional dos futuros plantios (OGURI, 2012). Sob o aspecto energético, destaca-se também que o conhecimento dos macro e micronutrientes permite estabelecer uma relação com a quantidade de cinzas geradas da biomassa após a combustão.

O planejamento e manejo dos sistemas florestais de curta rotação devem levar em consideração o objetivo principal (produção de biomassa), mas também a ciclagem de nutrientes dentro do povoamento. Se a floresta de curta rotação é plantada exclusivamente para a produção de biomassa para energia, preferencialmente, deve ser utilizado uma espécie, família ou clone de rápido crescimento, com alto rendimento e alta eficiência no aproveitamento de nutrientes (GUO et al., 2002).

Guo et al. (2002) estudando plantios com 1 e 3 anos de idade de *Eucalyptus botryoides*, *E. globulus* e *E. ovata* na Nova Zelândia, estabeleceram que a proporção relativa de nutrientes em diferentes componentes acima do solo foi, em geral, na seguinte ordem: folha > fuste (madeira com casca) > galhos > ramos pequenos > partes reprodutivas.

Cuiping et al. (2004) estudaram uma ampla gama de fontes de biomassa na China, com resultados já reportados na Tabela 7. Para as biomassas florestais, os mesmos autores encontraram a seguinte sequência dos elementos $Ca > K > Fe, Mg > Al, P > Na, Si$, eles relataram que a biomassa agrícola no geral contém mais cinzas do que a biomassa florestal.

Viera et al. (2012) avaliaram a composição nutricional da biomassa aérea de *Eucalyptus urograndis* com 18 meses de idade, a exportação de nutrientes obedeceu à seguinte ordem decrescente: $Ca > N > K > Mg > P > S$ para os macronutrientes

e $Mn > Fe > B > Zn > Cu$ para os micronutrientes. Os mesmos autores salientaram que as folhas apresentaram as maiores concentrações de nutrientes.

Andrade et al. (2011) avaliaram a exportação de nutrientes da biomassa acima do solo para florestas de *Eucalyptus urograndis* com três anos de idade e plantadas no espaçamento convencional, os autores encontraram que as maiores exportações foram nitrogênio, potássio e cálcio, respectivamente $324,4 \text{ kg.ha}^{-1}$, $255,5 \text{ kg.ha}^{-1}$ e $198,5 \text{ kg.ha}^{-1}$.

2.3 Efeito do espaçamento e da adubação na biomassa

As operações silviculturais têm como objetivo mudar os padrões de crescimento de uma árvore e, desta forma, alterar a qualidade da madeira (que não é previsível). A única maneira de conhecê-la com exatidão é submeter às árvores às condições de campo (ZOBEL, 1992).

O espaçamento de plantio tem uma série de implicações do ponto de vista silvicultural, tecnológico e econômico. Ele afeta as taxas de crescimento das plantas, qualidade da madeira, idade de corte, bem como as práticas de exploração e manejo florestal e, conseqüentemente, os custos de produção (BALLONI; SIMÕES, 1980).

O espaçamento maior de plantio acarreta um aumento no diâmetro das árvores; entretanto há uma produção menor de biomassa por hectare (BERNARDO et al., 1998; SANTOS, 2011; SARTÓRIO, 2014). Sartório (2014) ainda constatou que o adensamento do plantio resultou em povoamentos com grande número de árvores de pequenas dimensões, com grande variação entre indivíduos, maior número de árvores dominadas e elevada taxa de mortalidade em sistemas florestais de curta rotação.

Estudando florestas de *Eucalyptus globulus*, *E. occidentalis* e *Pinus radiata* para bioenergia na Austrália com espaçamento variando de 500 a 4000 árvores.ha⁻¹ com três anos de idade, Sochacki et al. (2007) constaram que as maiores produções de biomassa ocorreram na maior densidade de plantio.

A influência do espaçamento na densidade básica da madeira de sistemas florestais de curta rotação não é um consenso. Garcia (2013) e Machado (2014) constataram que a densidade básica da madeira foi menor nos espaçamentos mais adensados, entretanto Eloy et al. (2014) não observou a mesma tendência.

O efeito da adubação mineral sobre as propriedades da madeira também é polêmico (ZOBEL, 1992; SETTE JÚNIOR et al., 2014). Barreiros et al. (2007), estudando a madeira de *Eucalyptus grandis* produzida de plantios com 5 anos de idade com diferentes doses de lodo de esgoto tratado, concluíram que os teores de hemiceluloses e de cinzas aumentaram com a dose aplicada, exceto os teores de celulose, lignina e extrativos e o poder calorífico da madeira, que não foram influenciados.

Vale et al. (2000) e Guerra et al. (2014), estudando plantios de *Eucalyptus*, não encontraram influência da adubação no poder calorífico superior. As diferenças mais significativas nessa propriedade estão mais associadas à idade (KUMAR et al., 2010; LEMENIH; BEKELE, 2004).

2.4 Considerações sobre a revisão bibliográfica realizada

As pesquisas com biomassa para fins energéticos ganharam importância com os esforços realizados para redução dos combustíveis fósseis no mundo. O potencial do Brasil no desenvolvimento das culturas energéticas coloca o país em posição de destaque internacional.

A biomassa é estudada em quatro frentes: a primeira está relacionada à produtividade da cultura no ambiente que foi plantada; a segunda refere-se à qualidade do material, incluindo também os processos de densificação (produção de briquetes ou pellets) e avanço da biotecnologia (melhoramento genético); a terceira busca explicar ou relacionar o manejo no campo com a qualidade energética, e a última envolve a análise (de eficiência e financeira) dos sistemas de colheita, transporte, armazenagem e queima da biomassa.

Devido às diferentes partes que compõe o material lignocelulósico, os estudos avaliam separadamente as frações da biomassa (madeira, casca, folhas, galhos e raiz). O estudo individual dos componentes da biomassa é parte fundamental para a sustentabilidade dos sistemas de curta rotação, principalmente para análise da ciclagem e reposição dos nutrientes ao longo do tempo. As pesquisas voltadas para a caracterização química da biomassa de florestas energéticas (1-3 anos) no Brasil ainda são escassas.

Na composição química da biomassa, as análises elementar (C, H, N, O e S) e estrutural (lignina, extrativos e holocelulose) explicam melhor as possíveis correlações existentes entre as propriedades da biomassa; porém, a análise imediata

(umidade, cinzas, carbono fixo e material volátil) e poder calorífico são balizadores para classificar as melhores fontes de biomassa para energia.

No geral, não há um consenso na literatura a respeito da variação das propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa em relação ao manejo adotado, como densidade do plantio, doses de adubação, idade de colheita, desbastes, entre outros. Dentre as técnicas de manejo mencionadas, pertinente a madeira, há uma tendência de maior variação das propriedades em função da idade de corte, possivelmente devido à maturidade da madeira, conquistada ao longo do tempo (madeira adulta e cerne).

As pesquisas apontam com mais clareza a influência do manejo florestal nas características gerais das florestas, como diâmetro e altura dos indivíduos, produtividade e proporção entre os componentes da árvore (fuste, casca, galho, folha e raiz). Entretanto, existem poucos estudos no Brasil que abordam a relação do manejo (densidade do plantio e adubação) com todas as frações da biomassa para fins energéticos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área e delineamento experimental

O experimento foi implantado na Fazenda Três Sinos, localizada na Rodovia Gastão Dal Farra, km 5, no município de Botucatu, estado de São Paulo em abril de 2012. O local está situado na longitude 48°25'33" W e latitude 22°58'28" S e possui aproximadamente 872m de altitude. O clima predominante no município, segundo os critérios adotados por Koppen, é Cfa – clima mesotérmico – com temperaturas médias superiores a 10°C, temperatura do mês mais quente igual ou superior a 22°C e índice pluviométrico anual em torno de 1516 mm. A classe de solo do local foi identificada como Latossolo Vermelho Amarelo com textura média de acordo com o mapa de solos de Botucatu adaptado por Vettorato (2003).

Inicialmente, o experimento foi concebido e implantado para outras pesquisas acadêmicas sendo, posteriormente, aproveitado para o presente estudo. O delineamento experimental instalado no campo era inteiramente casualizado devido à semelhança das condições de sítio do local. Os tratamentos estavam dispostos em esquema fatorial com dois fatores, sendo cinco espaçamentos de plantio e três doses de adubação, totalizando quinze tratamentos. Todos possuíam área retangular de 30m x 80m e foram instalados de forma aleatória na área. (Figura 4)

Para este trabalho foi considerado um esquema fatorial (2x2x3) com três fatores, sendo dois espaçamentos de plantio, duas doses de adubação e três frações da biomassa (madeira com casca, galhos e folhas). As frações da biomassa foram

selecionadas em função do sistema de colheita mecanizado adotado nos SFCR, como apresentado no item 2.1.2.

O preparo do campo aconteceu pela técnica do cultivo mínimo, ou seja, preparo somente nas linhas de plantio e com adubação individual das mudas. Foi utilizado um híbrido interespecífico de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* (clone C219) aos 24 meses de idade.

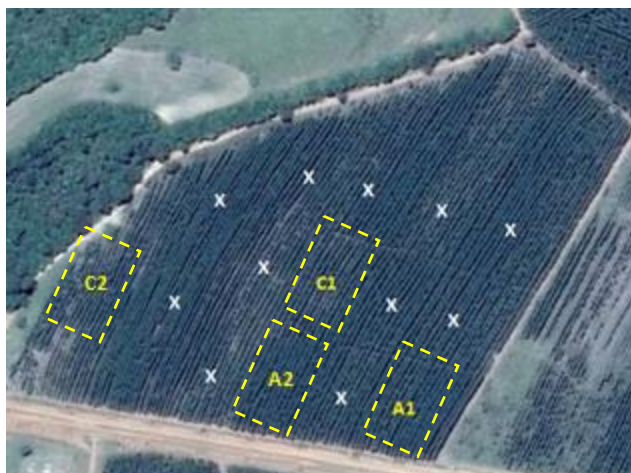


Figura 4. Área experimental com os tratamentos aproveitados para este estudo (destacados em amarelo). A marcação “X” refere-se a outros tratamentos não utilizados.

O espaçamento A (Figura 5 – I), mais adensado, possuía 0,5m entre plantas na linha do plantio e 2,8m entre linhas (teoricamente 7142 plantas por hectare); o espaçamento C (Figura 5 – II), menos adensado, possuía 1,5m entre plantas na linha do plantio e 2,8m entre linhas (teoricamente 2380 plantas por hectare).



Figura 5. Espaços de plantio. I – Espaçamento 2,8m x 0,5m; II – Espaçamento 2,8m x 1,5m.

As adubações de plantio e de cobertura foram realizadas em duas dosagens diferentes. A Dose 1 foi caracterizada como sendo um quarto da Dose 2, que é a dosagem convencional, adotada comercialmente pelas empresas florestais do setor. As doses estão detalhadas a seguir:

Dose 1 (sub-dosagem):

- 35 g/planta pré-plantio com NPK (6-30-10);
- 27,5 g/planta aos 180 dias após o plantio com NPK (19-00-19) com adição de Boro (0,7%) e Zinco (3%);
- 27,5 g/planta aos 360 dias após o plantio com NPK (19-00-19) com adição de Boro (0,7%) e Zinco (3%).

Dose 2 (comercial):

- 140 g/planta pré-plantio com NPK (6-30-10);
- 110 g/planta aos 180 dias após o plantio com NPK (19-00-19) com adição de Boro (0,7%) e Zinco (3%);
- 110 g/planta aos 360 dias após o plantio com NPK (19-00-19) com adição de Boro (0,7%) e Zinco (3%).

Desta foram, os tratamentos analisados possuíam condições distintas e extremas de densidade de plantio e adubação, sendo identificados como:

- Tratamento A1 – espaçamento 2,8m x 0,5m, dose 1;
- Tratamento A2 – espaçamento 2,8m x 0,5m, dose 2;
- Tratamento C1 – espaçamento 2,8m x 1,5m, dose 1;
- Tratamento C2 – espaçamento 2,8m x 1,5m, dose 2.

Para o desenvolvimento e determinação das variáveis aplicadas ao estudo, cada árvore-amostra do tratamento foi considerada como uma repetição. O fluxograma das etapas realizadas durante o trabalho está sumarizado na Figura 6.

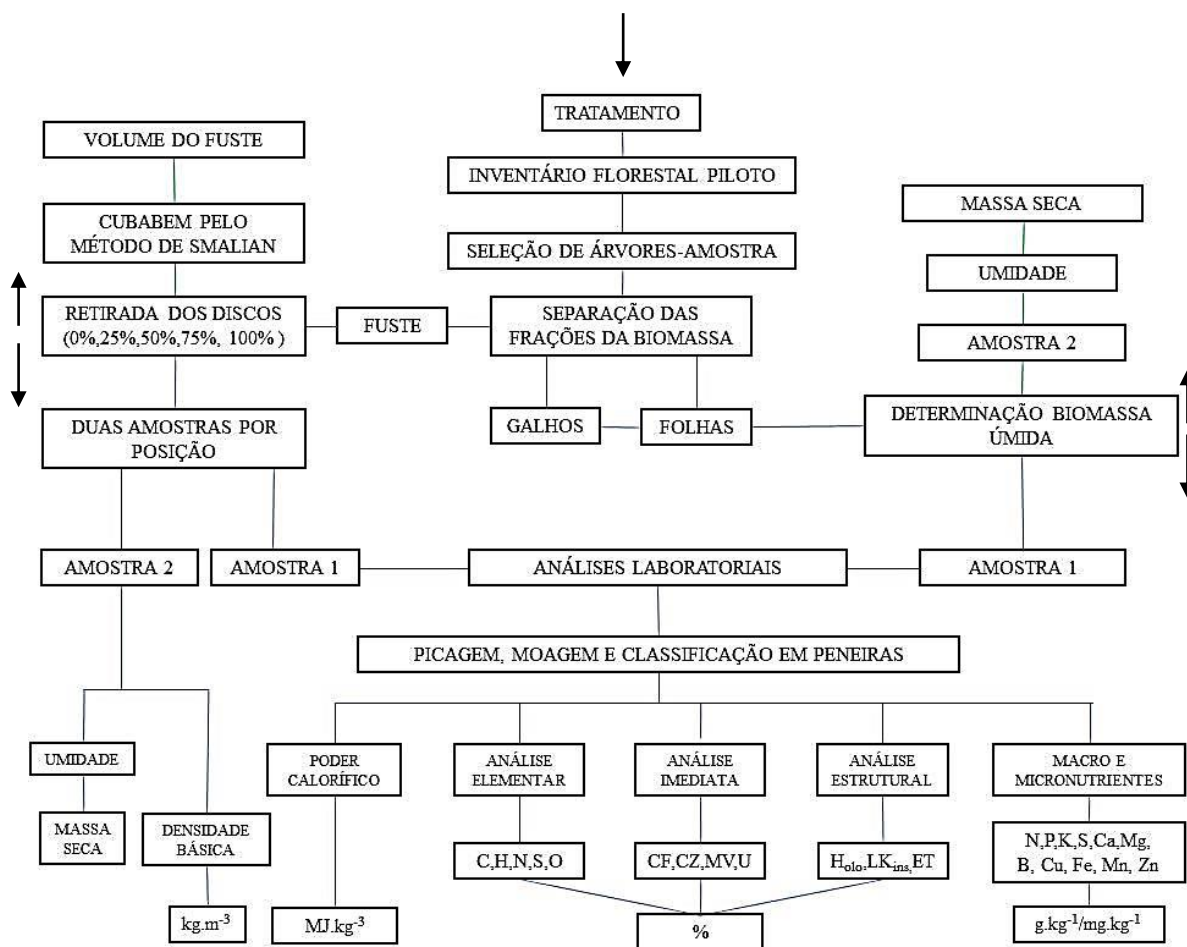


Figura 6. Fluxograma das etapas durante a pesquisa.

3.2 Amostragem e escolha das árvores-amostra

A escolha das árvores-amostra recaiu sobre árvores médias na parcela, determinadas a partir do inventário florestal. Assim, foram selecionadas árvores com área seccional média ou diâmetro quadrático médio do tratamento (D_g). O diâmetro quadrático médio das árvores de cada tratamento foi obtido por meio da área transversal média do povoamento (Equação 1-3).

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} d_i^2}{n} \quad (1)$$

$$\bar{g} = \frac{\pi d_g^2}{4} \quad (2)$$

$$D_g = \sqrt[2]{\frac{4\bar{g}}{\pi}} \quad (3)$$

Em que:

$\bar{g}$ = área transversal média do povoamento;

d_i = diâmetro à altura do peito (DAP) da árvore;

n = número de observações;

D_g = diâmetro quadrático médio do povoamento (cm).

Para o experimento foram derrubadas quatro árvores-amostra por tratamento para determinação da biomassa aérea nas frações madeira com casca (fuste), galhos e folhas e densidade do lenho com casca.

3.3 Inventário e determinação da massa seca

No inventário florestal, foi aberta uma parcela central de 450 m² (15m x 30m) em cada tratamento, excluindo-se as bordas para evitar influência periférica. De cada parcela foram analisadas cinco subparcelas, sendo que cada linha de plantio dentro da parcela foi considerada uma subparcela, como exemplificado na Figura 7.

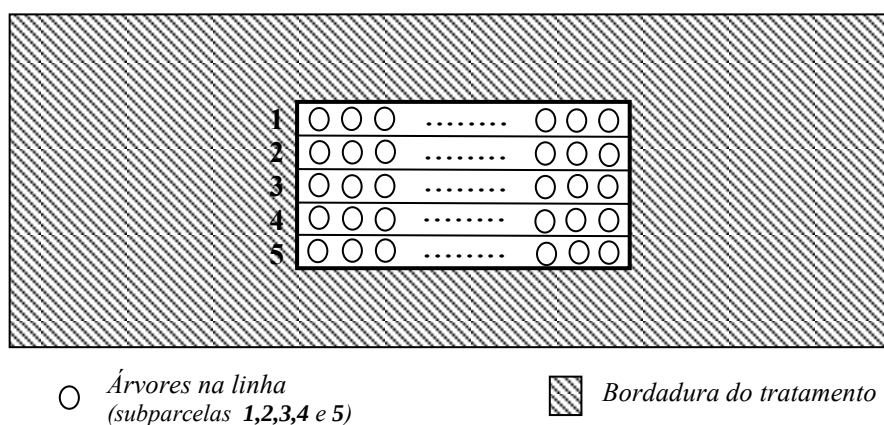


Figura 7. Parcelas mensuradas no campo.

Foram coletados todas as alturas e os diâmetros à altura do peito (DAP) das árvores de cada subparcela. A altura foi mensurada por meio do clinômetro digital e o diâmetro com auxílio de uma suta, ambos da marca Haglöff.

A cubagem das árvores foi realizada pelo método de Smalian. A partir da base da árvore, coletou-se o diâmetro e a espessura da casca a cada metro no fuste. Considerando duas medidas de diâmetro consecutivas, foi calculado o volume da seção (tora) conforme as Equações 4, 5 e 6. A última seção da árvore, no topo, foi assumida como um cone, com volume determinado com a Equação 7.

$$V_i = \frac{(g_1 + g_2)}{2} l \quad (4)$$

$$g_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (5)$$

$$g_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (6)$$

Em que:

V_i = volume da seção i;

g_1 = área transversal na ponta mais grossa da tora;

g_2 = área transversal na ponta mais fina da tora;

d_1 = diâmetro na base da seção (m);

d_2 = diâmetro no topo da seção(m);

l = comprimento da tora.

$$V_p = \frac{g_p \ell_p}{3} \quad (7)$$

Em que:

V_p = Volume do ponteiro (m³);

g_p = Área transversal da ultima seção (m²);

ℓ_p = Comprimento da última seção (m).

O volume total do fuste (V_t) com casca foi obtido pelo somatório dos volumes de cada seção, conforme Equação 8:

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n + V_p \quad (8)$$

A partir da cubagem determinou-se o fator de forma médio do fuste com casca do povoamento (Equação 9) que foi utilizado no cálculo do volume em metro cúbico (m³) de cada subparcela (Equação 10).

$$F_{f\ c/c} = \left(\frac{V_{fuste}}{V_{cilindro}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

$F_{f\ c/c}$ = fator de forma médio do fuste com casca;

V_{fuste} = volume do fuste obtido pelo método de Smalian (m³);

$V_{cilindro}$ = volume do fuste cilíndrico considerando o DAP (m³).

$$V_s = \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4} h F_{f\ c/c} \quad (10)$$

Em que:

V_s = volume da subparcela (m³);

h = altura média do povoamento (m);

d_i = diâmetro à altura do peito (DAP) de cada indivíduo na subparcela;

$F_{f\ c/c}$ = fator de forma médio do fuste com casca do povoamento.

A massa seca ou biomassa seca foi determinada pelo método da árvore individual descrito por Sanquetta (2002), a partir das amostras que possuíam o diâmetro quadrático médio do tratamento (D_g) como descrito no item 3.2. Para cada tratamento foram coletadas quatro árvores-amostra para determinação da biomassa aérea nas frações lenho com casca, galhos e folhas.

Inicialmente, as árvores-amostra foram desgalhadas e desfolhadas para pesagem úmida dos componentes galhos e folhas separadamente (Figura 8) com uso de uma balança digital da marca Black & Decker modelo BB20.



Figura 8. Separação da biomassa e amostras. I – Biomassa de galhos e folhas separadas; II – amostras para análises laboratoriais.

Foi retirada uma amostra de 200 a 300 gramas para cálculo da umidade na base úmida (Equação 11) das frações no momento da coleta. Desta forma, foi determinado o teor de secos (Equação 12) de cada fração, ou seja, a quantidade de matéria seca contida na biomassa durante a pesagem no campo.

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100 \quad (11)$$

$$T_s = 100 - (U) \quad (12)$$

Em que:

m_u = massa úmida da fração coletada (g);

m_s = massa seca da fração após secagem na estufa a $105 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (g);

U = Teor de umidade na base úmida (%);

T_s = Teor de secos na fração considerada (%).

Para cálculo da massa seca de folhas e galhos utilizaram-se as Equações 13 e 14:

$$MS_{folhas} = P_{uf} \frac{T_{sf}}{100} \quad (13)$$

$$MS_{galhos} = P_{ug} \frac{T_{sg}}{100} \quad (14)$$

Em que:

MS_{folhas} = Massa seca de folhas (kg.árvore⁻¹);

MS_{galhos} = Massa seca de galhos (kg.árvore⁻¹);

P_{uf} = Peso úmido de folhas no campo (kg);

P_{ug} = Peso úmido de galhos no campo (kg);

T_{sf} = Teor de secos na fração folhas (%);

T_{sg} = Teor de secos na fração galhos (%).

Para determinação da massa seca do fuste com casca, optou-se pela obtenção indireta, por meio do produto entre o volume dos fustes (obtido na cubagem pelo método de Smalian) e o valor de densidade básica (Equação 15).

$$MS_{fuste} = V_{fuste} D_{b,pond} \quad (15)$$

Em que:

MS_{fuste} = Massa seca do fuste com casca (kg.árvore⁻¹);

V_{fuste} = Volume do fuste com casca (m³);

$D_{b,pond}$ = densidade básica da madeira com casca ponderada pelo volume (kg.m⁻³)
– apresentada no item 3.4.5.

Com os valores de massa seca, também foi possível obter as relações percentuais das três frações estudadas (fuste, galhos e folhas) na árvore. As relações mensuradas foram utilizadas para os cálculos de produtividade de massa seca, potencial energético e exportação de nutrientes por hectare.

3.4 Análises físicas e químicas

Para essas análises foram utilizadas três árvores-amostra para cada tratamento (três repetições), com exceção dos ensaios de densidade básica e energética do fuste com casca, nos quais foram utilizadas quatro árvores-amostra (4 repetições).

De cada árvore selecionada foram coletadas duas amostras compostas para cada fração da biomassa analisada – madeira com casca (fuste), galhos e folhas. A primeira amostra foi usada na determinação da umidade das frações no campo. Para a fração fuste, a mesma amostra foi aproveitada também para obtenção da densidade básica. A segunda amostra foi destinada às análises químicas. A preparação dessas amostras foi realizada de acordo com a norma TAPPI T264cm-97, adaptada para as frações galhos e folhas. As amostras de lenho com casca (discos) e galhos foram secas ao ar em local coberto; entretanto a fração folha foi imediatamente colocada na estufa para secagem inicial à baixa temperatura (50°C) a fim de evitar a degradação biológica desse material.

Todos os componentes da biomassa foram moídos em moinho tipo Wiley (Figura 9), marca Tecnal, e posteriormente classificados em três tamanhos no agitador de peneiras (marca Produtest): partículas que ficaram retidas na peneira de 40 mesh (>40 mesh), partículas que passaram na peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh (40-60 mesh), e por último as partículas que passaram da peneira de 60 mesh (<60 mesh). Para os ensaios, foi utilizada a fração de 40-60 mesh, exceto para a análise de poder calorífico superior que foi a fração de 60 mesh.

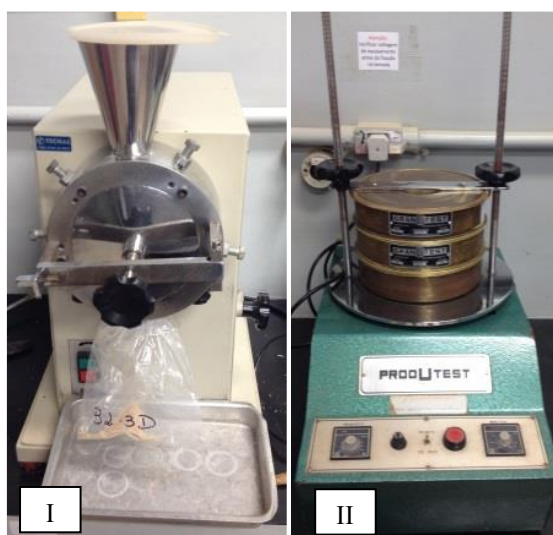


Figura 9. Moagem e classificação das amostras. I – Moinho tipo Wiley; II - agitador de peneiras.

Os ensaios laboratoriais foram realizados com base nas normas e metodologias apresentadas na Tabela 8. As adaptações normativas e as análises foram detalhadas nos itens a seguir.

Tabela 8. Normas e metodologia das análises realizadas.

Propriedade	Metodologia adotada	Unidade
<i>Análise elementar</i>		
C,H,N,S	Método Pregl-Dumas	%
Oxigênio (O)	$O = 100 - (C+H+N+S+CZ)$	%
<i>Análise imediata</i>		
Umidade (U)	ASTM E871 – 82 (2006)	%
Cinzas (CZ)	ASTM D1102 – 84 (2007)	%
Carbono fixo (CF)	ASTM E870-82 (2006)	%
Material volátil (MV)	ASTM E872 – 82 (2006)	%
<i>Análise estrutural</i>		
Holocelulose (H_{olo})	Deslignificação com $NaClO_2$	%
Lignina insolúvel (LK_{ins})	TAPPI T222 cm-11 (2011)	%
Extrativos totais (ET)	TAPPI T204 cm-07 (2007)	%
<i>Macro e micronutrientes</i>		$g.kg^{-1}$; $mg.kg^{-1}$
N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn	Malavolta et al. (1989)	
<i>Poder calorífico superior</i> (PCS)	ASTM E711-84 (2004)	$MJ.kg^{-1}$
<i>Densid. básica da madeira</i> (D_b)	ABNT NBR 11941 (2003)	$kg.m^{-3}$
<i>Densid. básica ponderada</i> ($D_{b,pond}$)	Vital (1984)	$kg.m^{-3}$
<i>Densid. energética do fuste</i> (D_e)	$D_e = PCS \times D_{b,pond}$	$GJ.m^{-3}$

3.4.1 Análise elementar

Essas amostras foram ensaiadas no Laboratório de Solos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, FCA/UNESP, campus de Botucatu- SP.

A análise elementar consiste na determinação dos seguintes elementos químicos: carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O). Para análise foi utilizado um Analisador Elementar (CHNS) da marca Perkin Elmer e modelo 2400. O equipamento faz a determinação dos elementos com base no método clássico de Pregl-Dumas modificado. Resumidamente, uma conhecida massa de amostra é queimada a alta temperatura na presença de oxigênio, ocorrendo a combustão completa e liberação dos gases CO_2 , H_2O , N_2 e SO_2 . Os mesmos são separados pela técnica de cromatografia frontal e, por meio de um detector de condutividade térmica, os teores dos elementos químicos são determinados (THOMPSON, 2008).

O teor de oxigênio foi determinado indiretamente a partir da Equação 16, como adotado pela norma ASTM E870 – 82 (2006).

$$O = 100 - (C + H + N + S + CZ) \quad (16)$$

Em que:

O = teor de oxigênio na biomassa (%);

C = teor de carbono na biomassa (%);

H = teor de hidrogênio na biomassa (%);

N = teor de nitrogênio na biomassa (%);

S = teor de enxofre na biomassa (%);

CZ = teor de cinzas na biomassa obtido na análise imediata (%).

3.4.2 Análise imediata

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Bioenergia e Materiais Lignocelulósicos, do Departamento de Ciências Ambientais na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus de Sorocaba-SP.

A análise imediata consiste na determinação dos seguintes componentes: teor de umidade, material volátil (queimado no estado gasoso), carbono fixo (queimado no estado sólido) e cinzas (componente residual após combustão). Na Figura 10 estão apresentadas amostras típicas dos resíduos em duas etapas de análise.

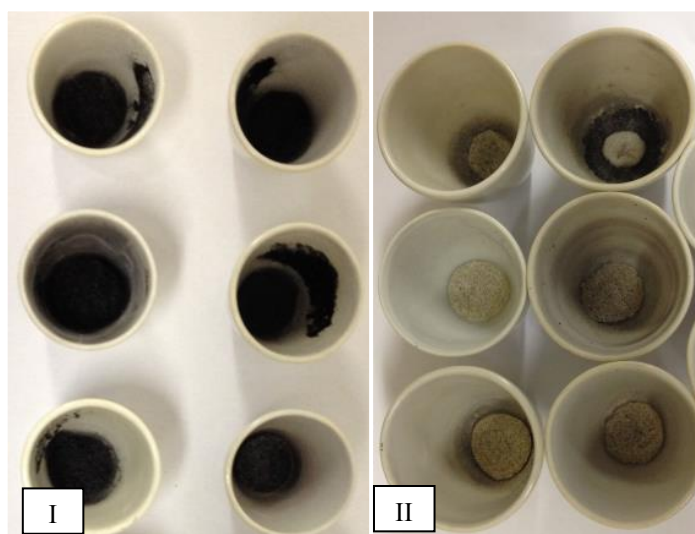


Figura 10. Análise imediata. I - Resíduos após queima de material volátil; II - Cinzas residuais.

O teor de umidade (U%) foi determinado com base úmida para o material verde (fresco) como encontrado no campo (Equação 11).

Para determinação dos componentes - carbono fixo (CF), material volátil (MV) e cinzas (CZ) foi utilizado um forno mufla marca Jung modelo 0202 com capacidade até 1200°C (Figura 11). As amostras foram secadas em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para obtenção do material seco. Para os ensaios de MV e CZ foi utilizado um grama de material na fração 40-60mesh, e o CF foi obtido por diferença. A amostra foi colocada em cadinho de porcelana com a tara conhecida, o mesmo foi utilizado com tampa para o ensaio de material volátil. A pesagem foi realizada com balança de precisão (0,001g) após as amostras serem armazenadas no dessecador com sílica gel para resfriamento sem ganho de umidade.



Figura 11. Forno mufla utilizado na análise imediata.

O teor de matérias voláteis (MV) foi obtido após a amostra permanecer na mufla a $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por sete minutos. A mufla utilizada no ensaio foi diferente da proposta pela norma americana; desta forma, para contornar a situação, o tempo foi cronometrado somente quando a mufla atingiu a temperatura próxima a 900°C .

O teor de cinzas (CZ) foi obtido após manter a amostra na mufla a $600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ após três horas.

Para determinação dos componentes MV e CZ, foi utilizada Equação Geral 17.

$$Y = \frac{(M_i - M_f)}{(M_i)} \times 100 \quad (17)$$

Em que:

Y = teor do componente avaliado (%);

M_i = massa inicial da amostra (g);

M_f = massa final após condicionamento específico (temperatura e tempo) na mufla (g).

O CF foi obtido indiretamente, com uso da Equação 18.

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (18)$$

Em que:

CF = teor de carbono fixo (%);

MV = teor de material volátil na mesma umidade de referência (%);

CZ = teor de cinzas na mesma umidade de referência (%).

Adicionalmente, foi realizada a análise quantitativa e qualitativa das cinzas das frações estudadas a partir de uma amostra composta das frações (madeira com casca, galhos e folhas).

Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Hitachi modelo TM3000 (Figura 12) equipado com detectores de energia dispersiva de raios-X (EDS). As imagens foram geradas com zoom de 500x e diferença de potencial de 15 kV no modo de funcionamento EDS, elas foram manipuladas por meio dos softwares Hitachi TM3000 (visualização) e Quantax 70 (identificação dos elementos).

A fim padronizar a aquisição de imagens foram realizadas dez avaliações por amostra composta, ou seja, foram determinados os elementos químicos minerais presentes em dez posições ao acaso na amostra composta. Então, avaliou-se a sequência dos elementos nas cinzas e a presença de silicatos e outras estruturas.

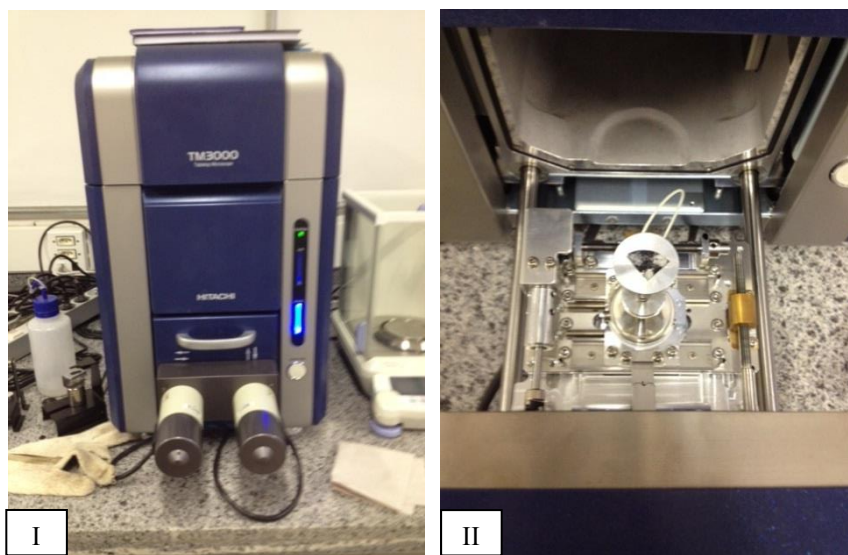


Figura 12. Análise das cinzas. I – Microscópio eletrônico de varredura (MEV); II – detalhes da amostra.

3.4.3 Análise estrutural

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Recursos Naturais, FCA / UNESP, Botucatu-SP. A análise estrutural consistiu na determinação dos seguintes componentes: teor de lignina insolúvel, extrativos totais e holocelulose (Figura 13).

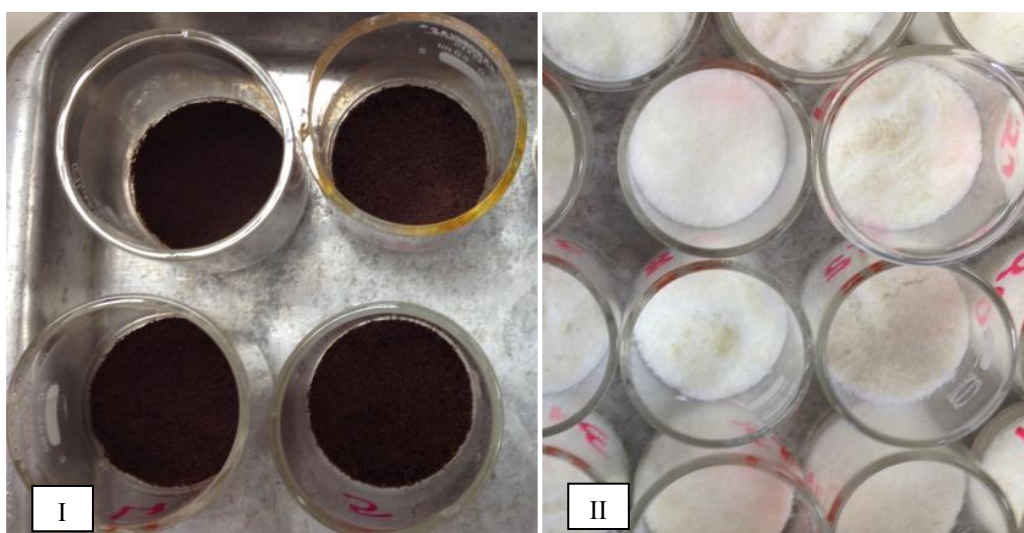


Figura 13. Lignina e holocelulose das amostras. I -Lignina Klason insolúvel; II- holocelulose.

Inicialmente, foi determinado o teor de secos em cada amostra, desta forma para determinação dos componentes extrativos totais e holocelulose foram

utilizados 2,000g equivalente seco de material na fração 40-60 mesh, já para o teor de lignina apenas 1,000g equivalente seco. Todas as pesagens foram realizadas com uma balança de precisão de 0,1mg.

As amostras foram levadas para o conjunto extrator de Soxhlet (Figura 14), o processo de extração foi dividido em três etapas. A primeira consistiu na extração do material na solução de tolueno e álcool 96°GL, respectivamente na proporção 2:1 durante seis a oito horas, a segunda etapa a extração ocorreu somente com o álcool 96°GL durante seis a oito horas, e por último, as amostras foram removidas do conjunto extrator e fervidas durante 3 horas com água quente deionizada.

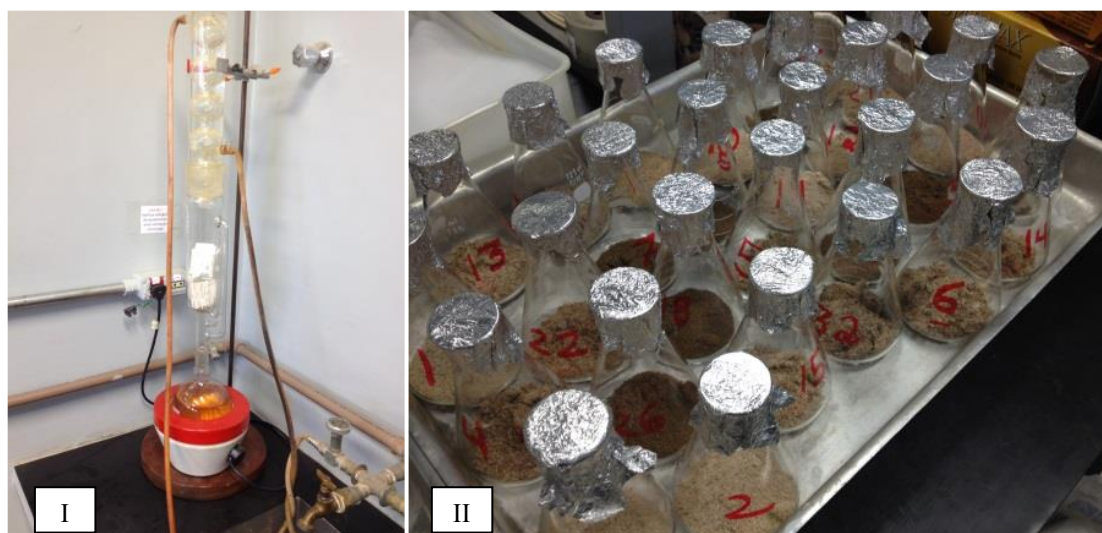


Figura 14. Processo de extração. I – Extrator Soxhlet; II – amostras após a extração.

O teor de extrativos totais foi determinado para cada amostra após o processo de extração conforme a Equação 19.

$$ET = \frac{2,000 - M_f}{2,000} \times 100 \quad (19)$$

Em que:

ET = teor de extrativos totais (%);

M_f = massa final seca após extração (g).

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason por meio da hidrólise ácida. As amostras permaneceram em banho-maria a 18-20°C durante duas horas com ácido sulfúrico – H_2SO_4 (72% de concentração). Depois foram transferidas

para um erlenmeyer de um litro com adição de água destilada, ferveu-se por quatro horas. Após a sedimentação total da lignina, ela foi filtrada (Figura 15).

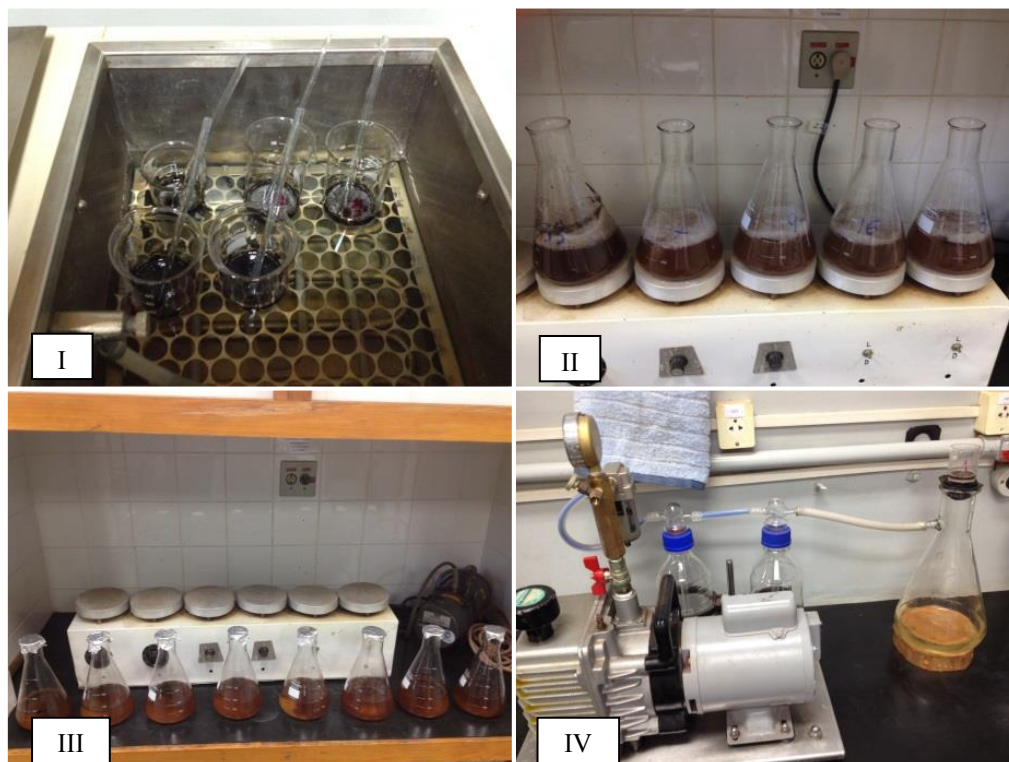


Figura 15. Procedimento na determinação da lignina Klason insolúvel. I – Amostras com H_2SO_4 (72%) em banho-maria; II – Amostras em fervura (4 horas); III – Amostras em descanso (sedimentação) e IV – Filtragem.

Por último, as amostras foram secadas na estufa e o teor de lignina foi determinado pela Equação 20.

$$LK_{ins} = \left(\frac{M_f}{1,000} \times 100 \right) - CZ \quad (20)$$

Em que:

LK_{ins} = teor de lignina Klason insolúvel em ácido (%);

M_f = massa final da lignina após secagem em estufa (g).

CZ = teor de cinzas da biomassa seca (%).

Para determinação do teor de holocelulose foi realizada a deslignificação das amostras, este procedimento foi descrito por Collings et al. (1978) e

Vital et al. (1986). Em resumo, foram realizadas adições de clorito de sódio - NaClO_2 (20% de concentração) e ácido acético - $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ (1:5) nas amostras com água destilada, durante intervalos de tempo determinados e mantidos em banho-maria a $70^\circ\text{-}80^\circ\text{C}$ (Figura 16).

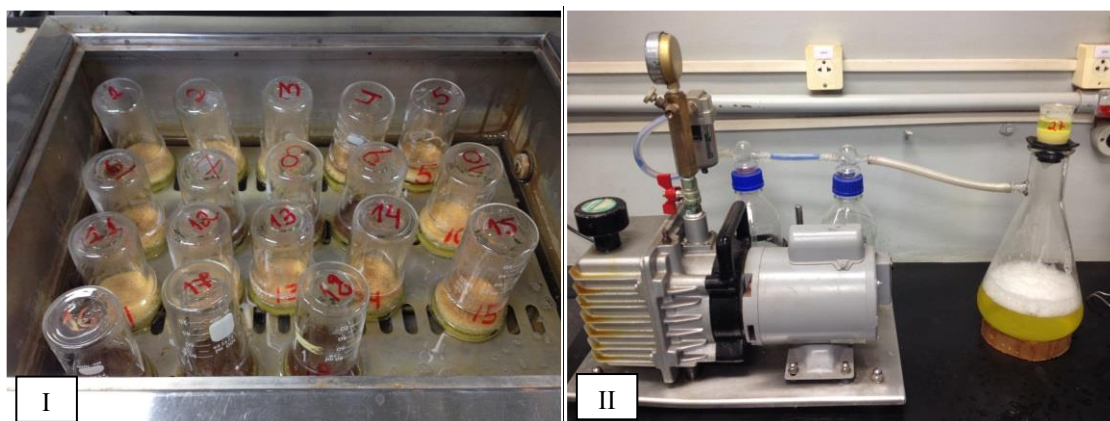


Figura 16. Determinação da holocelulose. I – Amostras com solução de clorito de sódio e ácido acético em banho-maria; II – Filtragem.

Após esse processo, as amostras foram filtradas, secas e pesadas, e o teor de holocelulose foi calculado de acordo com a Equação 21.

$$H_{olo} = \left(\frac{M_f}{2,000} \times 100 \right) - CZ \quad (21)$$

Em que:

H_{olo} = teor de holocelulose (%);

M_f = massa final da holocelulose após secagem em estufa (g);

CZ = teor de cinzas da biomassa seca (%).

3.4.4 Poder calorífico superior

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Bromatologia, localizado no Departamento de Melhoramento e Nutrição animal, FMVZ / UNESP, campus de Botucatu-SP.

Para a análise do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro do modelo C2000 conectado a um termostato modelo KV 400 e uma bomba calorimétrica (ou frasco de decomposição) modelo C5010, ambos da marca IKA® WERKE (Figura 17). As amostras utilizadas (fração de 60 mesh) foram levadas à estufa a

105°C $\pm$ 2 °C para obtenção do material seco. Nesse caso, foi utilizado aproximadamente 0,5 g por amostra e a pesagem realizada com balança de precisão de 0,1 mg.

Após a determinação da massa seca, cada amostra foi colocada no cadinho de combustão (20 mm de diâmetro e 19,5 mm de altura). O fio de algodão (padrão) faz a ligação entre a amostra e a haste metálica de ignição, como exemplificado na Figura 18. Após o preparo da amostra, a cápsula principal é fechada e há o preenchimento automático de oxigênio dentro da bomba calorimétrica e a água (temperatura controlada) na cuba que envolve o mesmo.



Figura 17. Calorímetro utilizado para determinação do PCS.

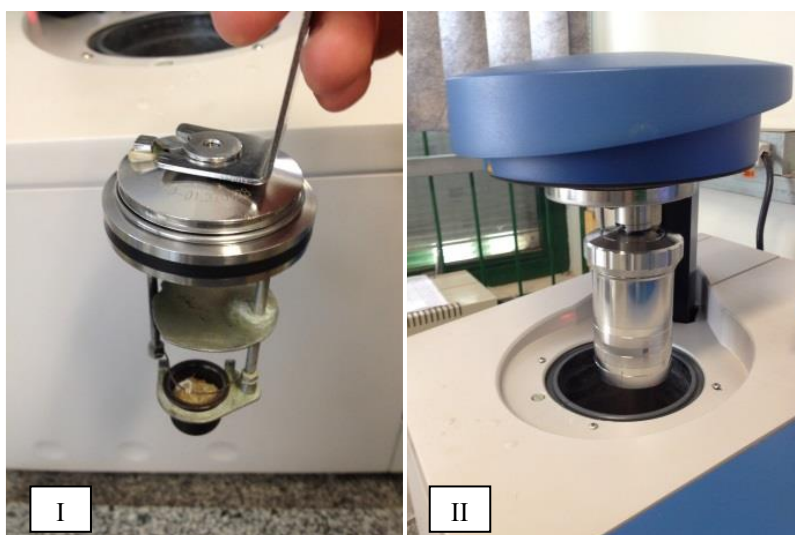


Figura 18. Preparação para análise do PCS. I- Detalhe da amostra preparada no suporte do frasco de decomposição; II- Frasco de decomposição sendo posicionado para o ensaio.

Os discos com casca foram submersos em água para saturação imediatamente após a coleta e posteriormente, secos em estufa (a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) para obter a massa seca. O volume saturado foi obtido pelo método da balança hidrostática (Figura 21).



Figura 21. Densidade básica dos discos. I – Discos submersos para saturação; II – Esquema da balança hidrostática.

Desta forma, a densidade básica da madeira com casca em cada posição foi calculada pela relação entre a massa seca e o volume saturado. Com esses valores, foi obtida a densidade básica da madeira com casca ponderada pelo volume de cada posição dos discos da árvore-amostra (Equação 22).

$$D_{b,pond} = \left(\frac{Db_{(0-25\%)} \times V_{(0-25\%)} + \dots + Db_{(75-100\%)} \times V_{(75-100\%)}}{V_{(0-25\%)} + V_{(25-50\%)} + V_{(50-75\%)} + V_{(75-100\%)}} \right) \quad (22)$$

Em que:

$D_{b,pond}$ = densidade básica da madeira com casca ponderada pelo volume (kg.m^{-3});

Db = densidade básica média entre os discos na posição considerada (kg.m^{-3});

V = volume da seção do fuste na posição considerada (m^3).

3.4.6 Densidade energética da madeira

A densidade energética (DE) foi determinada com base na Equação 23 utilizada por Carneiro et al. (2014) e Lima et al. (2011). Entretanto, o parâmetro foi

avaliado somente para o fuste da árvore, assim, a densidade energética foi o produto entre a densidade básica ponderada pelo volume do fuste e o poder calorífico da madeira com casca.

$$D_e = PCS \times D_{b,pond} \quad (23)$$

Em que:

D_e = densidade energética (MJ.m^{-3});

PCS = poder calorífico superior (MJ.kg^{-1});

$D_{b,pond}$ = densidade básica da madeira ponderada pelo volume (kg.m^{-3});

3.5 Potencial energético

O potencial energético (PE) pode ser avaliado para cada fração da biomassa por árvore ou por hectare. Ele foi determinada de acordo com a Equação 24 descrita por Vale et al. (2000).

$$PE = PCS \times M_s \quad (24)$$

Em que:

PE = potencial energético da fração considerada (MJ.árvore^{-1} ; GJ.ha^{-1});

PCS = poder calorífico superior da fração considerada (MJ.kg^{-1});

M_s = biomassa seca da fração considerada (kg.árvore^{-1} ; t.ha^{-1}).

Para o estudo foi determinado o potencial energético por tratamento para cada fração da biomassa aérea e posteriormente, o potencial energético total. Ressalta-se que é dado como potencial, já que considera que a biomassa seja queimada seca.

3.6 Exportação dos nutrientes

A análise de macro e micronutrientes foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Malavolta et al. (1989) no Laboratório de Solos do Departamento de Recursos Naturais - Ciência do Solo, FCA/UNESP, campus de Botucatu-SP.

As amostras utilizadas (fração de 60 mesh) foram levadas à estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtenção do material seco. Posteriormente, foi realizada a extração dos nutrientes dos compostos orgânicos a partir de digestões ácidas em alta temperatura (digestão sulfúrica e digestão nítrico-perclórica) para produção de extratos que são avaliados por métodos físico-químicos (como turbidimetria, colorimetria, entre outros) para determinação de cada nutriente considerado.

A exportação de nutrientes para cada tratamento foi determinado a partir dos dados obtidos nas análises de macro e micronutrientes para cada fração da biomassa, extrapolados para hectare a partir dos valores de massa seca de biomassa das cinco subparcelas (Equação 25).

$$Exp_y = N_y \times MS_f \quad (25)$$

Em que:

Exp_y = exportação do nutriente considerado “y” por subparcela ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$);

N_y = concentração média do nutriente “y” considerado ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);

MS_f = massa seca da fração da biomassa considerada por subparcela ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Portanto, com os dados das subparcelas, foi determinada a exportação média de nutrientes por hectare para cada fração da biomassa aérea e para cada nutriente nos tratamentos.

3.7 Análises estatísticas

Para cada uma das variáveis mensuradas na biomassa florestal procedeu-se avaliação da homogeneidade da variância e normalidade dos resíduos, a fim de atender o pré-requisito para análise de variância (ANOVA). Assim, os efeitos das fontes de variação e suas possíveis interações nos tratamentos foram avaliados pela ANOVA, complementada pelo teste de comparação de médias (Tukey), considerados significativos quando $p\text{-valor} < 0,05$.

No experimento foram considerados três fatores de variação: espaçamentos de plantio (A e C), as doses de adubação (dose 1 e 2) e as frações da biomassa (madeira com casca, galhos e folhas). A Tabela 9 apresenta as variáveis

mensuradas e o número de repetições para cada ensaio físico e químico. No geral, os ensaios laboratoriais foram realizados com três repetições, as variáveis analisadas por árvore com quatro repetições (indivíduos coletados) e as variáveis analisadas por hectare usaram cinco repetições (subparcelas).

Tabela 9: Propriedades físicas e químicas da biomassa florestal para análise estatística.

Variáveis mensuradas	Número de repetições por tratamento
C,H,N,S, O	3
U, CZ, CF, MV	3
H _{olo} , LK _{ins} , ET	3
N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn	3
PCS	3
D _{b,pond}	4
D _e	4
PE (por árvore)	4
MS (por árvore)	4
PE (por hectare)	5
MS (por hectare)	5
Exportação de nutrientes (por hectare)	5

A massa seca e potencial energético foram avaliados por árvore e hectare, considerando cada fração da biomassa (fuste, galhos e folhas) ou quantidade total (somatório das três frações). A exportação de nutrientes foi avaliada somente por hectare.

As análises foram realizadas no programa estatístico *Minitab 16 Statistical Software* (MINITAB, 2010). As tabelas completas das análises de variância (ANOVA) das variáveis foram apresentadas no Apêndice.

De forma sistemática, foi inicialmente discutida a significância dos dados para o fator de variação - biomassa - a fim de comparar as frações madeira com casca, galhos e folhas. As demais interações significativas da biomassa com outros fatores de variação (espaçamento e adubação), quando existiram, foram analisadas sequencialmente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como informação complementar, são apresentadas na Tabela 10 as características dendrométricas dos sistemas florestais de curta rotação estudados. Elas fazem referência ao tamanho médio das árvores em cada tratamento.

Tabela 10. Resumo das variáveis dendrométricas dos sistemas florestais adensados de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idade.

Parâmetros gerais*	Tratamentos			
	A1	A2	C1	C2
H (m)	10,9	9,7	9,5	10,7
DAP (cm)	5,8	6,6	7,0	8,3
D _g (cm)	5,9	6,7	7,1	8,4
IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	40,7	41,7	19,5	28,5

* H = altura média das árvores; DAP = diâmetro à altura do peito médio das árvores (1,3m do solo); D_g = Diâmetro quadrático médio das árvores; IMA = incremento médio anual da floresta (madeira com casca).

4.1 Caracterização física e química

4.1.1 Composição química elementar

A composição química elementar determinou os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) nas amostras. Os resultados para os tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 11.

Na Tabela 12 estão sumarizados os valores de *p-valor* da análise de variância (ANOVA) para composição química elementar. No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-1 a A-5).

Tabela 11. Composição química elementar da biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Espaçamento		Dose	Frações		
			Madeira com casca	Galhos	Folhas
C - Carbono (%)					
A	1	43,9 ± 0,33	44,6 ± 0,22	48,9 ± 0,40	
A	2	43,9 ± 0,44	44,6 ± 0,27	49,1 ± 0,05	
C	1	44,7 ± 0,14	44,4 ± 0,86	48,7 ± 0,76	
C	2	44,8 ± 0,16	45,0 ± 0,20	49,7 ± 0,66	
H - Hidrogênio (%)					
A	1	7,1 ± 0,59	7,5 ± 0,12	8,2 ± 0,25	
A	2	7,4 ± 0,54	7,8 ± 0,11	8,4 ± 0,04	
C	1	7,7 ± 0,41	7,2 ± 0,36	8,2 ± 0,06	
C	2	7,5 ± 0,51	7,6 ± 0,15	8,1 ± 0,54	
O - Oxigênio (%)					
A	1	47,5 ± 1,02	45,4 ± 0,54	37,5 ± 0,57	
A	2	47,2 ± 0,79	45,8 ± 0,29	36,6 ± 0,36	
C	1	45,8 ± 0,31	46,7 ± 1,11	37,8 ± 0,54	
C	2	46,2 ± 0,62	45,2 ± 0,21	37,8 ± 1,23	
N - Nitrogênio (%)					
A	1	0,5 ± 0,04	0,6 ± 0,03	2,4 ± 0,04	
A	2	0,4 ± 0,06	0,5 ± 0,03	2,1 ± 0,07	
C	1	0,3 ± 0,01	0,4 ± 0,06	1,6 ± 0,09	
C	2	0,2 ± 0,04	0,3 ± 0,06	1,8 ± 0,10	
S - Enxofre (%)					
A	1	0,09 ± 0,002	0,10 ± 0,001	0,14 ± 0,016	
A	2	0,09 ± 0,002	0,10 ± 0,001	0,14 ± 0,014	
C	1	0,10 ± 0,001	0,10 ± 0,001	0,13 ± 0,006	
C	2	0,09 ± 0,003	0,09 ± 0,001	0,14 ± 0,001	

Tabela 12. Resumo do *p-valor* da análise de variância da composição química elementar.

Fator de variação	<i>p-valor</i>				
	C	H	O	N	S
Espaçamento (E)	0,019*	0,916	0,687	0,0001*	0,235
Dose (D)	0,042*	0,261	0,199	0,0001*	0,625
Biomassa (B)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
E x D	0,086	0,456	0,883	0,004*	0,914
E x B	0,097	0,102	0,003*	0,0001*	0,725
D x B	0,326	0,548	0,541	0,472	0,305
E x D x B	0,587	0,536	0,040*	0,0001*	0,452

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Todos os elementos da composição química elementar foram significativos ($p\text{-valor} < 0,05$) para o fator de variação biomassa (Figura 22).

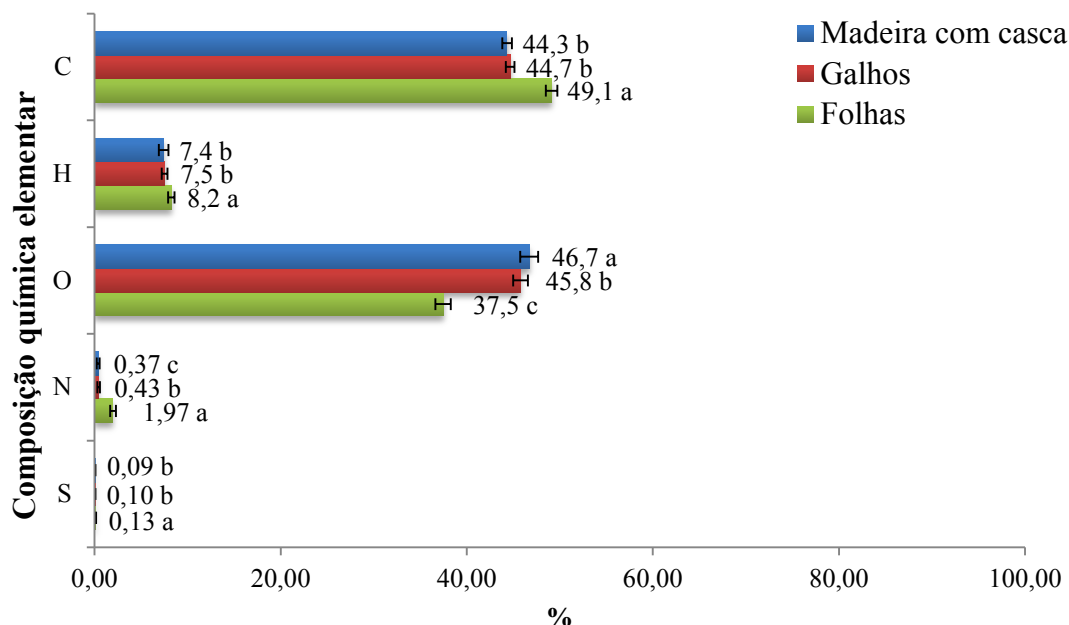


Figura 22. Composição química elementar nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, na mesma propriedade, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Os resultados encontrados para o fuste estão de acordo com os obtidos por Santana (2009) para clones de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* e Reis et al. (2012) estudando *Eucalyptus urophylla*, ambos destinados ao uso energético.

As folhas sempre foram diferentes das demais frações, apresentando maior teor de hidrogênio e carbono, ambos os elementos químicos que mais contribuem energeticamente durante a combustão, como reportado na Tabela 2. A maior quantidade de C e H também tem uma relação positiva com o poder calorífico da biomassa, ao contrário do teor de oxigênio, que não contribui para o aumento do mesmo, apesar de ser um elemento essencial para promover a combustão (SHENG; AZEVEDO, 2005; PROTÁSIO et al., 2011b). Entretanto, as folhas também possuíram as maiores quantidades de nitrogênio e enxofre, que não são interessantes do ponto de vista ambiental, devido a emissão de óxidos de enxofre e de nitrogênio (LORA, ANDRADE, 2009).

Outro ponto importante na composição química elementar das biomassas estudadas é a relação C/N, que tem algumas implicações no aproveitamento da biomassa. Após a colheita mecanizada dos SFCR, a biomassa pode ser empilhada no campo, promovendo-se sua secagem antes do transporte para a indústria. A relação C/N é

muito importante, pois está intimamente ligada a velocidade de decomposição desse material e pode afetar seu rendimento energético. Das frações analisadas, as folhas teriam uma alta decomposição (relação C/N baixa, próxima a 25), já as frações lenhosas teriam uma menor decomposição (relação C/N alta, próxima a 104 e 120, respectivamente para os galhos e a madeira com casca), sendo estas últimas mais interessantes para o armazenamento e secagem no campo.

Para o carbono (C) houve efeito do espaçamento de plantio e dose de fertilizantes (Tabela 13).

Tabela 13. Teor de carbono (C%) nos espaçamentos e nas doses estudadas.

Espaçamento	C (%)
A	45,9 B
C	46,2 A
Dose	
1	45,9 B
2	46,2 A

Na mesma coluna, para o mesmo fator de variação, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

O teor de carbono foi estatisticamente superior no espaçamento menos adensado e nas maiores dosagens. Do ponto de vista energético, quanto maior o teor de carbono, melhor o combustível.

A Figura 23 exemplifica a interação tripla para o nitrogênio (N). Os resultados encontrados nas biomassas variaram entre os tratamentos, sendo que as folhas foram muito superiores à madeira e aos galhos. As frações lenhosas, quando avaliadas no mesmo tratamento, sempre foram iguais estatisticamente. Os teores de N das biomassas foram maiores para os espaçamentos mais adensados; o tratamento A com a dose 1 obteve os valores mais altos.

O oxigênio também sofreu uma interação tripla (Figura 24). Porém, os valores foram estatisticamente iguais para todos os tratamentos. A possível interação tripla pode ter acontecido devido à diferença entre as biomassas, principalmente as folhas. As frações madeira e galhos foram iguais estatisticamente na maioria dos tratamentos e, em todos os casos, ambas foram maiores do que a fração folhas.

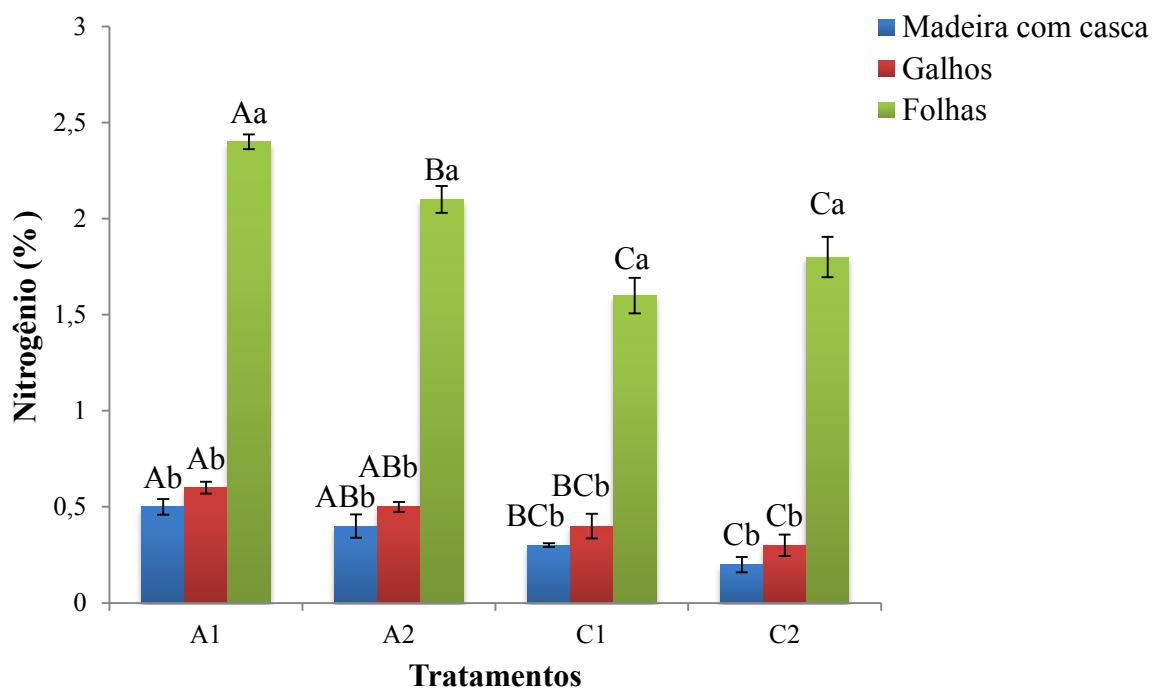


Figura 23. Interação dos efeitos E x D x B no teor de nitrogênio. Letras minúsculas iguais no mesmo tratamento e letras maiúsculas iguais na mesma biomassa, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

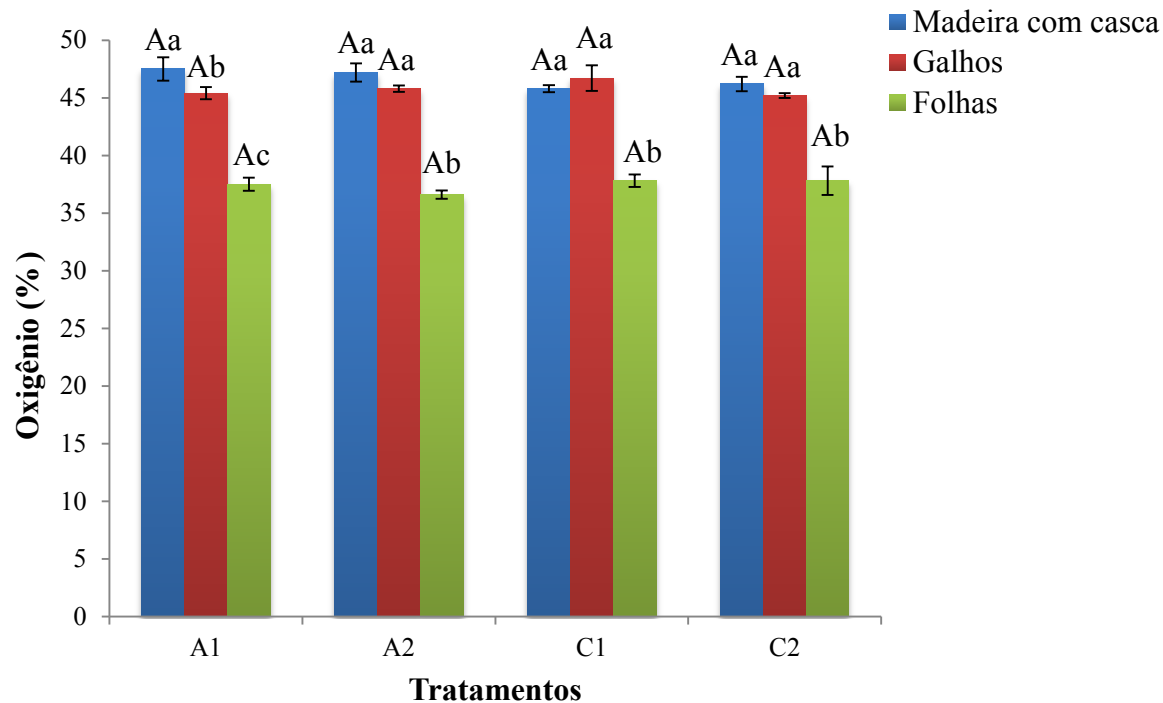


Figura 24. Interação dos efeitos E x D x B no teor de oxigênio. Letras minúsculas iguais no mesmo tratamento e letras maiúsculas iguais na mesma biomassa, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

4.1.2 Composição química imediata

A composição química imediata determinou os teores de carbono fixo (CF), material volátil (MV), cinzas (CZ) e água (U) nas amostras. Os resultados para os tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 14.

Na Tabela 15 estão sumarizados os valores de *p-valor* da análise de variância (ANOVA) para composição química imediata. No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-6 a A-9).

Tabela 14. Composição química imediata da biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Espaçamento	Dose	Frações		
		Madeira com casca	Galhos	Folhas
U - Umidade (%)				
A	1	65,3 ± 0,9	44,9 ± 6,0	61,5 ± 1,0
A	2	63,5 ± 1,0	46,8 ± 9,7	57,0 ± 1,2
C	1	64,5 ± 1,4	52,1 ± 2,8	54,9 ± 5,1
C	2	62,7 ± 1,2	52,8 ± 1,5	58,7 ± 0,4
CZ - Cinzas (%)				
A	1	0,86 ± 0,1	1,73 ± 0,2	2,77 ± 0,1
A	2	0,94 ± 0,1	1,22 ± 0,1	3,62 ± 0,2
C	1	1,39 ± 0,2	1,23 ± 0,1	3,55 ± 0,3
C	2	1,18 ± 0,2	1,79 ± 0,2	2,44 ± 0,1
MV - Material volátil (%)				
A	1	84,8 ± 1,1	81,6 ± 0,5	78,8 ± 0,5
A	2	85,9 ± 1,2	82,2 ± 0,8	78,6 ± 0,6
C	1	83,6 ± 0,5	81,4 ± 0,9	77,9 ± 0,5
C	2	83,8 ± 1,3	79,8 ± 0,4	78,9 ± 0,9
CF- Carbono fixo (%)				
A	1	14,3 ± 1,2	16,7 ± 0,6	18,5 ± 0,5
A	2	13,2 ± 1,2	16,6 ± 1,2	17,8 ± 0,4
C	1	15,0 ± 0,6	17,4 ± 0,6	18,5 ± 0,6
C	2	15,0 ± 1,3	18,4 ± 1,3	18,7 ± 0,9

Tabela 15. Resumo do *p*-valor da análise de variância da composição química imediata.

Fator de variação	<i>p</i> -valor			
	U	CZ	MV	CF
Espaçamento (E)	0,325	0,212	0,001*	0,001*
Dose (D)	0,797	0,321	0,547	0,700
Biomassa (B)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
E x D	0,278	0,002*	0,258	0,080
E x B	0,004*	0,001*	0,123	0,409
D x B	0,511	0,540	0,243	0,335
E x D x B	0,173	0,0001*	0,060	0,958

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Todas as propriedades da análise imediata foram significativas (*p*-valor<0,05) para o fator de variação biomassa. Os valores comparados pelo teste de médias Tukey ($\alpha=0,05$) estão apresentados na Figura 25.

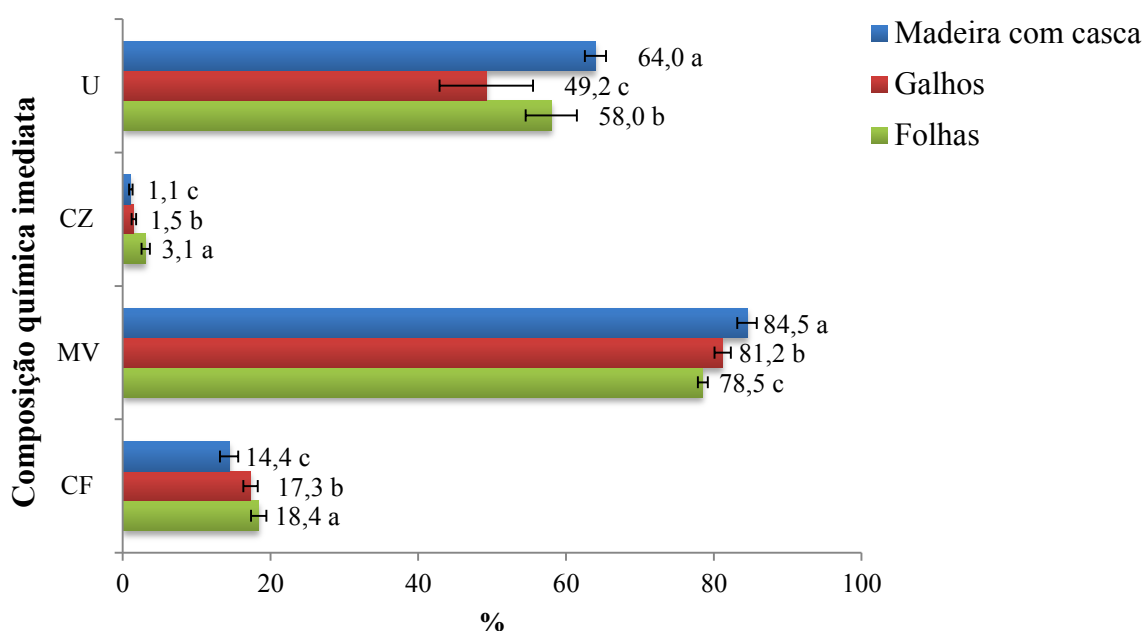


Figura 25. Composição química imediata nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, na mesma propriedade, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

A umidade na colheita foi superior para a madeira com casca, seguido das folhas e galhos. A maior variação da umidade na fração galhos poder ser explicada pela inclusão de ramos mais secos, localizados na base da árvore, na amostra composta. A média aritmética total das três biomassas (madeira com casca, galhos e

folhas) consideradas foi de 57,1%, próximo ao obtido por Brito et al. (1979) para resíduos florestais de eucalipto.

A umidade encontrada no campo é superior à recomendada para queima direta (menor ou igual a 30%) como reportado por Garstang et al. (2002) estudando cavacos de madeira. Desta forma, há necessidade de realizar a estocagem ou secagem do material para a redução da umidade até valor recomendado, aumentando o rendimento e eficiência da biomassa na geração de energia (BRAND; MUÑIZ, 2010).

O maior teor de cinzas foi encontrado para a fração folha, posteriormente os galhos e a madeira com casca. Sartório (2014), estudando quatro clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em sistemas adensados, também constatou que o teor de cinzas para os componentes variaram entre as frações. O autor obteve teores de cinzas de até 6,1% para casca, 4,8% para folhas, 2,3% para galhos e 0,7% para a madeira.

As folhas possuíram o dobro de cinzas das outras biomassas estudadas. A maior quantidade de cinzas é um ponto negativo para o aproveitamento das folhas, uma vez que são materiais abrasivos que desgastam e podem formar incrustações nos equipamentos metálicos (BRAND, 2010; BRITO, 1979).

O teor de cinzas na madeira com casca (1,1%) foi maior que o obtido em outros trabalhos com eucaliptos, como Protásio et al. (2014), Brito e Barrichelo (1978) e Barreiros et al. (2007). Possivelmente, eles foram influenciados pela casca que possui 2 a 15% de cinzas (PEREIRA, 2012), devido à contaminação pelo solo (RAGLAND et al., 1991). Comumente, a madeira tem menor teor de cinzas, carbono fixo e extrativos do que a casca (SENELWA; SIMS, 1999).

Os materiais voláteis foram maiores na madeira com casca, seguido dos galhos e folhas. O alto teor de materiais voláteis facilita a ignição (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997). Os valores encontrados foram menores que os obtidos por Senelwa e Sims (1999) para *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* e *E. saligna* de 3 a 5 anos em povoamentos adensados na Nova Zelândia para todas as frações avaliadas.

O teor de carbono fixo da folha foi superior aos dos galhos e da madeira. O alto índice de carbono fixo na biomassa faz aumentar o tempo de residência na fornalha para queima total (BRAND, 2010). Os resultados encontrados de CF foram menores do que os encontrados por Vale et al. (2002) para madeira de espécies do cerrado (20,7%) e maiores que os dos eucaliptos estudados por Senelwa e Sims (1999). Em

comparação com outras biomassas agrícolas e florestais, o teor de carbono fixo e materiais voláteis estão próximos ao descrito por Cuiping et al. (2004).

Para o CF e MV houve efeito do espaçamento de plantio (Tabela 16).

Tabela 16. Teor de carbono fixo (CF) e material volátil (MV) nos espaçamentos estudados.

Espaçamento	CF (%)	MV (%)
A	16,2 B	82,0 A
C	17,2 A	80,9 B

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Foram encontrados maiores teores de carbono fixo no maior espaçamento (2,8m x 1,5m), e para o material volátil, os maiores valores foram encontrados no espaçamento mais adensado (2,8m x 0,5m).

Para o teor de cinzas ocorreu uma interação tripla entre o espaçamento, dose de adubação e biomassa (Figura 26).

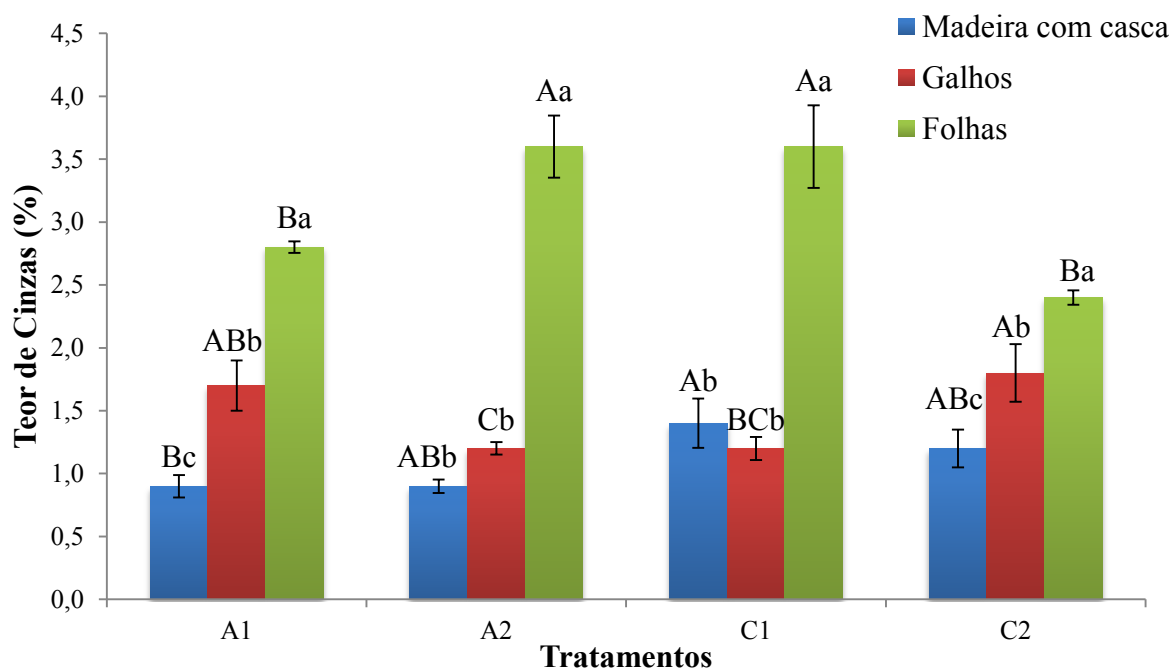


Figura 26. Interação dos efeitos E x D x B no teor de cinzas. Letras minúsculas iguais no mesmo tratamento e letras maiúsculas iguais na mesma biomassa, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

No geral, os resultados indicam que o teor de cinzas é maior para as folhas, seguido dos galhos e, por último, a madeira.

Para a madeira com casca observa-se uma diferença entre os espaçamentos de plantio, sendo que o maior teor de cinzas foi encontrado na menor densidade de plantio.

Para as folhas, o teor de cinzas teve um comportamento inverso para cada espaçamento e dosagem. No espaçamento 2,8 x 0,5m os maiores valores foram encontrados na maior dosagem, e no espaçamento 2,8 x 1,5m, os maiores valores foram para a menor dosagem.

Conforme comentado na metodologia, a análise qualitativa e quantitativa das cinzas, com uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV) com detectores de energia dispersiva de raios-X (EDS). As cinzas de cada biomassa foram avaliadas separadamente e foram determinados os principais elementos químicos presentes em suas composições (Figuras 27 e 28).

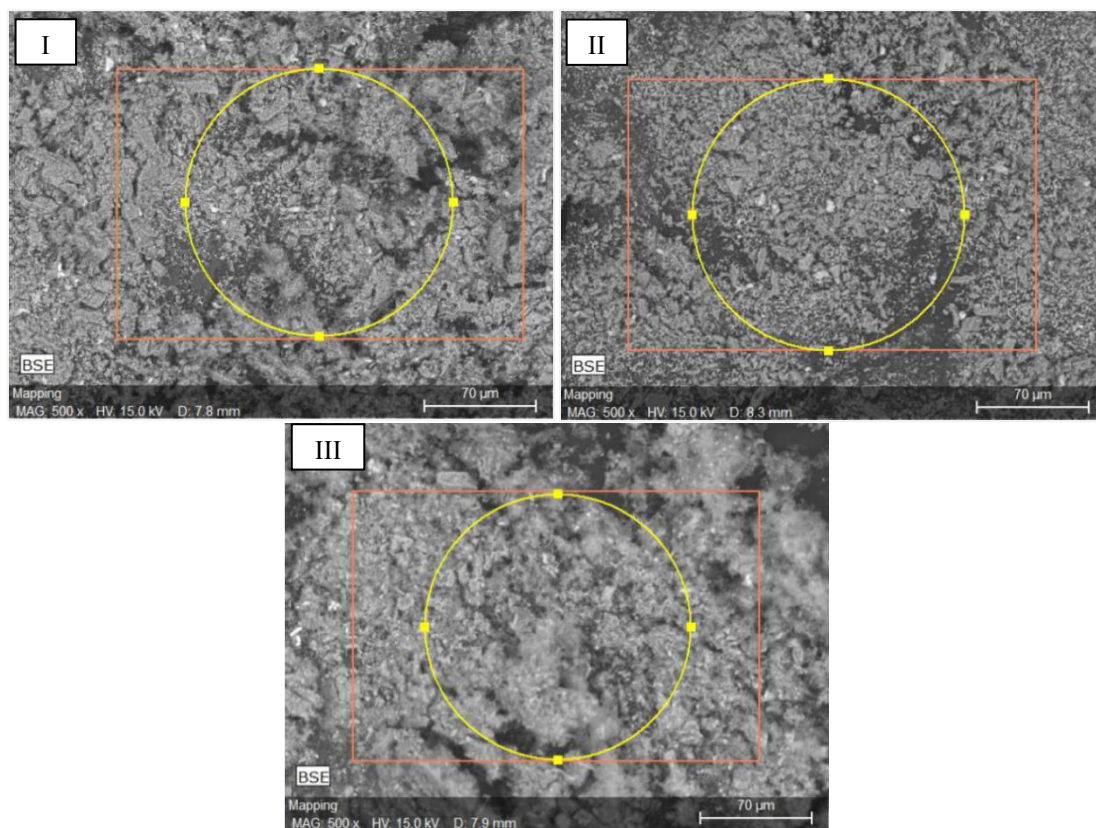


Figura 27. Amostras de cinzas visualizadas no MEV em 500x. I – madeira com casca; II – galhos e III – folhas.

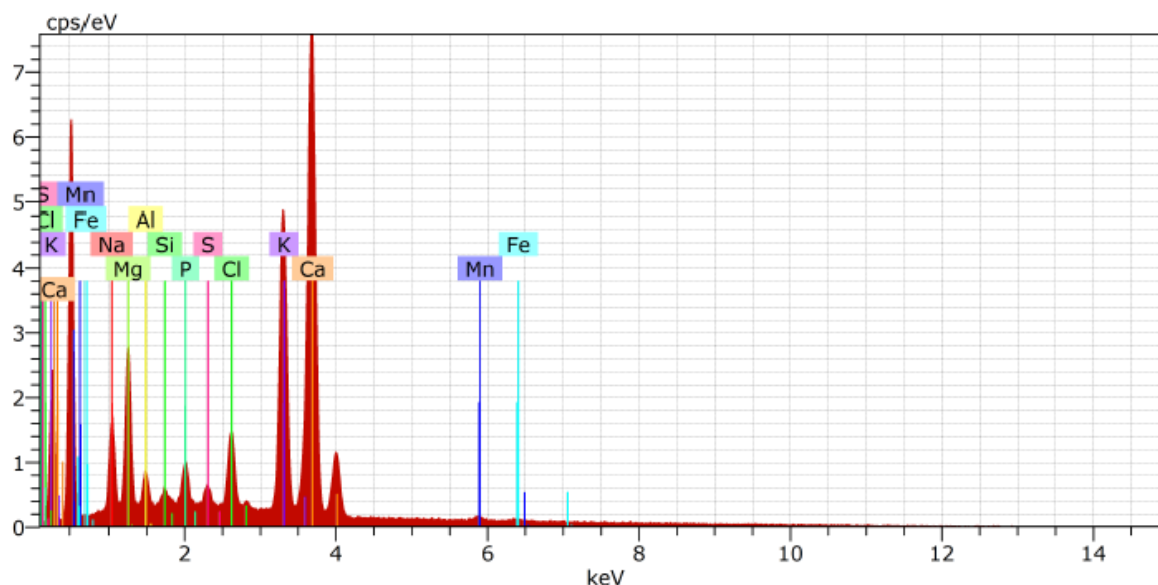


Figura 28. Avaliação dos elementos químicos presentes nas cinzas pelo MEV – EDS.

A Tabela 17 apresenta os valores médios em porcentagem dos principais elementos químicos minerais presentes nas cinzas das biomassas.

Tabela 17. Composição química das cinzas das frações da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Elementos químicos	Madeira com casca (%)	Galhos (%)	Folhas (%)
Ca	49,97 ± 2,5	55,31 ± 2,9	36,90 ± 2,3
K	22,19 ± 1,6	21,54 ± 1,6	21,43 ± 2,3
Mg	10,27 ± 1,2	9,50 ± 1,2	20,24 ± 1,7
Na	7,32 ± 0,6	4,57 ± 0,8	2,20 ± 0,5
Cl	2,70 ± 0,9	1,76 ± 1,0	1,68 ± 0,3
P	2,29 ± 0,3	2,79 ± 0,3	7,24 ± 0,7
Al	1,68 ± 0,7	1,32 ± 0,5	3,16 ± 1,2
Mn	1,34 ± 0,6	1,22 ± 0,4	1,08 ± 0,2
S	0,79 ± 0,3	0,56 ± 0,3	1,01 ± 0,3
Fe	0,91 ± 0,5	0,91 ± 0,7	1,80 ± 0,5
Si	0,54 ± 0,2	0,61 ± 0,3	3,15 ± 0,6

Cabe destaque ao elemento cálcio que, correspondeu a praticamente metade das cinzas nas frações lenhosas e a um terço nas folhas. Considerando todas as biomassas, os elementos Ca, K e Mg representaram aproximadamente 80% da fase mineral das cinzas. Outros elementos como Al, Mn, S, Fe, Si tiveram uma variação maior, porém representavam menos de 10% da composição.

Para a madeira com casca foi estabelecida a seguinte sequência dos elementos químicos - $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Cl}$, $\text{P} > \text{Al}$, $\text{Mn} > \text{Fe}$, $\text{S} > \text{Si}$; para a biomassa dos galhos - $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{P} > \text{Cl}$, Al , $\text{Mn} > \text{Fe}$, Si , S ; e para a biomassa das folhas - $\text{Ca} > \text{K}$, $\text{Mg} > \text{P} > \text{Si}$, $\text{Al} > \text{Na} > \text{Cl}$, $\text{Fe} > \text{Mn}$, S .

Foi constatada presença pequena de sílica nas cinzas lenhosas, sendo ela maior nas folhas (Figura 29). Os baixos teores desse elemento podem estar associados à forma de coleta e tratamento das amostras (mínimo contato com o solo) descrita no item 3 deste trabalho.

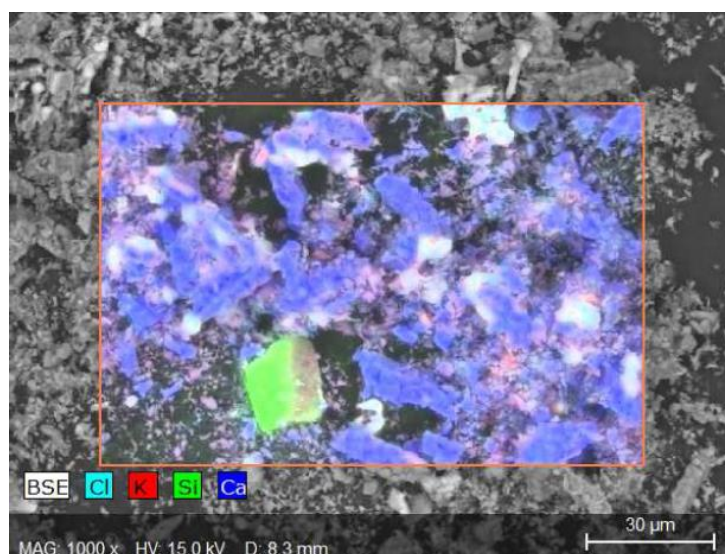


Figura 29. Detalhe do silicato (destacado em verde) na amostra de cinzas da madeira.

As imagens também revelaram a presença de outras estruturas com predominância dos elementos ferro e alumínio (Figura 30). Esses compostos podem conduzir a um problema técnico sério quando a biomassa é utilizada como matéria-prima para a produção de energia. Geralmente, os metais alcalinos são os principais causadores da produção de escórias e incrustações (CUIPING et al., 2004), danificando os equipamentos e produzindo resíduos indesejáveis ao processo.

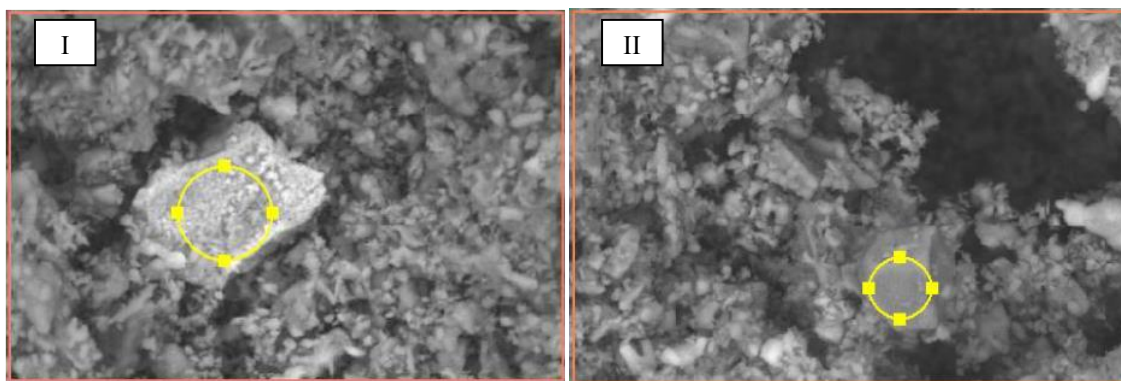


Figura 30. Presença de outras estruturas nas cinzas das biomassas visualizadas no MEV em 1500x. I – Estrutura com predominância de Fe, Ca e K; II – Estrutura com predominância de Si e Al.

4.1.3 Composição química estrutural

A composição química estrutural foi realizada para obtenção dos valores de holocelulose (H_{olo}), extrativos totais (ET) e lignina insolúvel (LK_{ins}) pelo método Klason. Observem os resultados para as frações e tratamentos estudados na Tabela 18.

Tabela 18. Composição química estrutural da biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Espaçamento	Dose	Frações		
		Madeira com casca	Galhos	Folhas
LK _{ins} - Lignina (%)				
A	1	21,7 ± 0,4	20,8 ± 0,6	17,9 ± 1,4
A	2	21,2 ± 0,4	21,0 ± 0,2	18,4 ± 2,2
C	1	22,4 ± 0,3	21,3 ± 0,3	21,7 ± 1,9
C	2	20,9 ± 1,3	19,8 ± 1,4	22,8 ± 1,8
ET- Extrativos totais (%)				
A	1	2,1 ± 1,0	11,2 ± 1,0	38,4 ± 1,2
A	2	2,7 ± 0,2	12,4 ± 0,3	37,5 ± 0,8
C	1	1,5 ± 0,7	13,0 ± 1,0	37,6 ± 1,3
C	2	1,6 ± 0,4	12,9 ± 1,6	38,2 ± 2,2
H _{olo} - Holocelulose (%)				
A	1	83,1 ± 0,5	70,3 ± 0,3	34,6 ± 0,3
A	2	81,8 ± 1,2	69,4 ± 0,1	33,0 ± 0,4
C	1	80,6 ± 0,4	67,2 ± 2,8	35,3 ± 1,6
C	2	80,6 ± 1,8	66,9 ± 2,2	36,7 ± 2,3

Na Tabela 19 estão sumarizados os valores de *p*-valor da análise de variância (ANOVA) para composição química estrutural. No apêndice são apresentadas as tabelas completas dessas análises de variância (A-10 a A-12).

Tabela 19. Resumo do *p*-valor da análise de variância da composição química estrutural.

Fator de variação	<i>p</i> -valor		
	LK _{ins}	ET	H _{olo}
Espaçamento (E)	0,004*	0,847	0,119
Dose (D)	0,515	0,481	0,346
Biomassa (B)	0,034*	0,0001*	0,0001*
E x D	0,393	0,849	0,101
E x B	0,0001*	0,114	0,001*
D x B	0,183	0,788	0,876
E x D x B	0,554	0,275	0,602

* *p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Todas as propriedades da análise estrutural foram significativas (*p*-valor<0,05) para o fator de variação biomassa. A Figura 31 apresenta os valores comparados pelo teste de médias Tukey ($\alpha=0,05$).

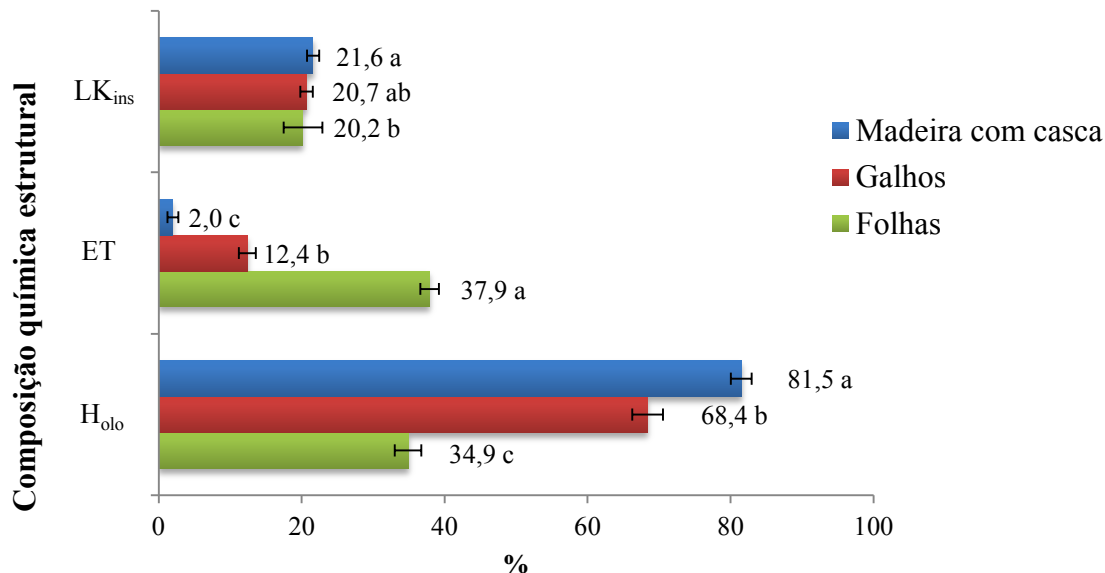


Figura 31. Composição química estrutural nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, na mesma propriedade, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Os teores de lignina e extrativos para a madeira com casca são semelhantes aos reportados por Garcia (2013), Demirbas (2001) e Pereira (2012). A fração folha teve maior teor de extrativos totais (37,9%), resultados semelhantes aos reportados

por Pereira (2012) e Senelwa e Sims (1999). Apesar dos teores de lignina insolúvel encontrados nas frações serem próximos, houve diferença significativa entre a madeira e as folhas.

A maior porcentagem de holocelulose (H_{olo}) foi encontrada na madeira com casca, seguido pelos galhos e folhas. A H_{olo} foi influenciada pela interação E x B, sendo que o espaçamento mais adensado aumentou o teor de holocelulose nos galhos (Tabela 20).

Tabela 20. Teor de holocelulose (H_{olo}) da biomassa nos espaçamentos estudados.

Esp.	Biomassa		
	Madeira com casca	Galhos	Folhas
A	82,4 Aa	69,8 Ab	33,8 Ac
C	80,6 Aa	67,1 Bb	36,0 Ac

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Os efeitos do espaçamento e da interação E x B foram significativos ($p\text{-valor}<0,05$) para a propriedade lignina insolúvel (Tabela 21).

Tabela 21. Teor de lignina insolúvel (LK_{ins}) da biomassa nos espaçamentos estudados.

Esp.	Biomassa		
	Madeira com casca	Galhos	Folhas
A	21,5 Aa	20,9 Aa	18,1 Bb
C	21,7 Aa	20,5 Aa	22,2 Aa

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Quando analisado os fatores espaçamento de plantio e biomassa, o teor de lignina Klason da fração folha foi maior no espaçamento mais amplo. Os valores de lignina da madeira com casca e galhos foram estatisticamente iguais para os dois espaçamentos estudados.

4.1.4 Poder calorífico superior

Os resultados do poder calorífico superior (PCS) para os tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Poder calorífico superior (PCS) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Espaçamento	Dose	PCS (MJ.kg ⁻¹)		
		Madeira com casca	Galhos	Folhas
A	1	18,6 ± 0,3	19,3 ± 0,2	22,2 ± 0,1
A	2	18,9 ± 0,1	19,2 ± 0,3	21,9 ± 0,1
C	1	19,1 ± 0,2	19,1 ± 0,1	21,8 ± 0,1
C	2	19,0 ± 0,2	19,3 ± 0,4	22,2 ± 0,1

O poder calorífico superior foi influenciado pelo tipo de biomassa e pela interação E x D x B (Tabela 23). No apêndice está apresentado a tabela completa da análise de variância (A-13).

Tabela 23. Resumo do *p-valor* da análise de variância do poder calorífico superior.

Fator de variação	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	0,351
Dose (D)	0,183
Biomassa (B)	0,0001*
E x D	0,107
E x B	0,058
D x B	0,735
E x D x B	0,006*

* *p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

O maior valor de PCS foi encontrado para fração folha, seguido pelos galhos e por último a madeira com casca (Figura 32).

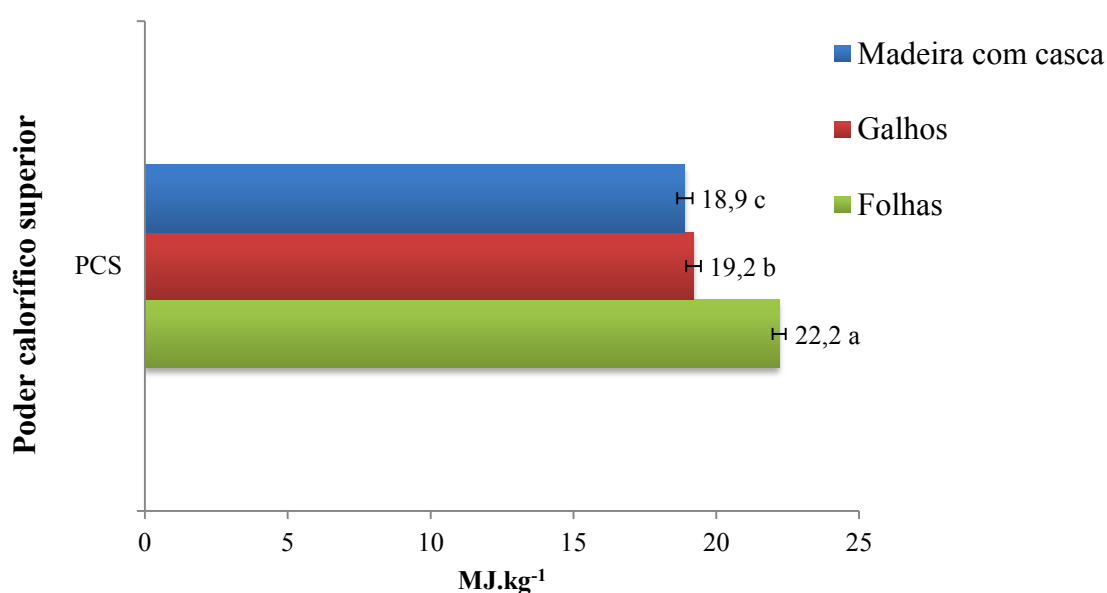


Figura 32. Poder calorífico nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

O PCS da madeira ficou próximo ao reportado por Carneiro et al. (2014) que encontraram valor médio de 19 MJ.kg^{-1} para clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Oguri (2012) obteve valor próximo a 20 MJ.kg^{-1} para o componente galhos no mesmo clone utilizado neste estudo.

O alto poder calorífico das folhas pode ser explicado pela sua composição elementar (maiores valores de hidrogênio e carbono) e seu alto teor de extrativos (SENELWA; SIMS, 1999). Os valores de extrativos encontrados para as folhas (Figura 22) foram aproximadamente vinte vezes maiores que os obtidos para o fuste (madeira com casca) e três vezes maiores que os da fração galhos.

White (1987) salienta que as diferenças entre os valores de poder calorífico superior normalmente estão mais relacionadas à presença de produtos extratáveis do que ao teor de lignina. Estudando algumas espécies florestais da Índia, Kataki e Konwer (2001) constataram que o poder calorífico nas frações da biomassa sem extrativos (após processo de extração de 5 a 6 horas com álcool e benzeno) foi menor do que o da mesma biomassa com extrativos (sem o processo de extração), evidenciando uma contribuição positiva com o poder calorífico.

A interação tripla foi desdobrada por meio do teste de Tukey ($\alpha=0,05$) na Figura 33.

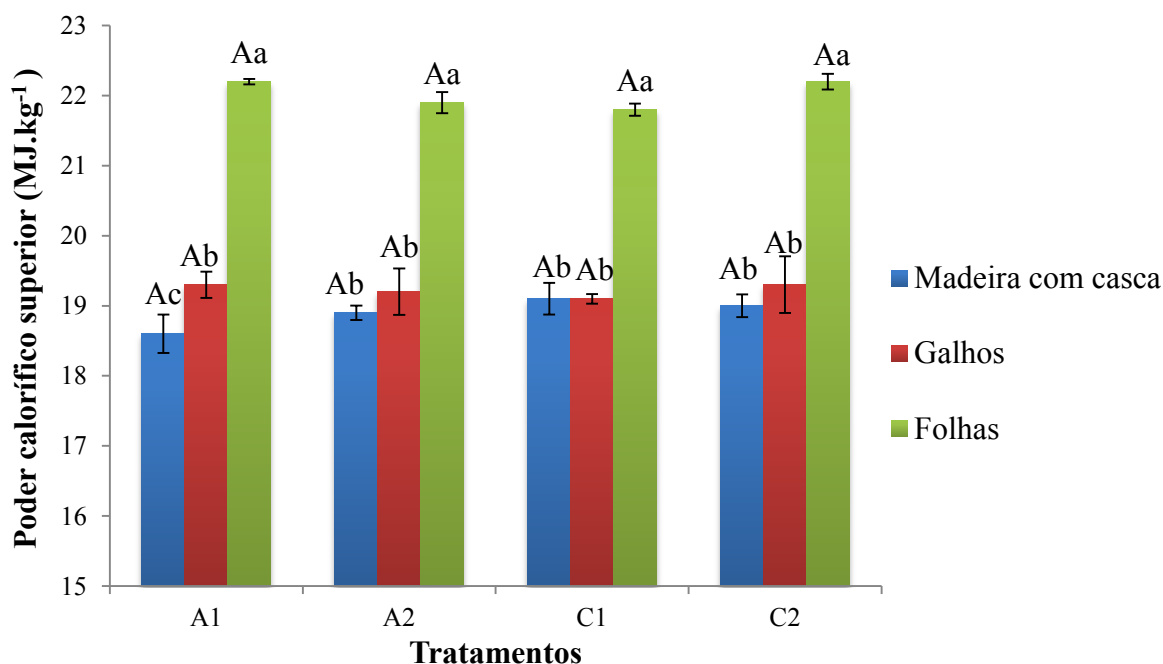


Figura 33. Interação dos efeitos E x D x B no poder calorífico superior. Letras minúsculas iguais no mesmo tratamento e letras maiúsculas iguais na mesma biomassa, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

A interação tripla pode ter acontecido devido à grande influência do fator biomassa. O PCS da madeira e dos galhos, em cada tratamento (A1, A2, C1, C2), foi muito semelhante, e as folhas sobressaíram em relação às demais frações, fato também constatado por Pérez et al. (2011) e Kataki e Konwer (2001).

Desconsiderando-se o efeito da biomassa, os resultados foram estatisticamente iguais para todos os tratamentos. Desta forma, considerou-se que o espaçamento de plantio e a dose de adubação não influenciaram o poder calorífico, como constatado por Guerra et al. (2014) para o mesmo clone estudado. Eloy et al. (2014) também verificaram que os diferentes espaçamentos de plantio não induziram a variação do PCS da madeira de indivíduos jovens (1 a 3 anos) de *Acacia mearnsii*, *Eucalyptus grandis*, *Mimosa scabrella* e *Ateleia glazioviana*, e Sartório (2014) não encontrou efeito do espaçamento no poder calorífico dos galhos para eucalipto.

4.1.5 Densidade básica e energética da madeira

As densidades básica e energética foram avaliadas apenas para madeira com casca. Na Tabela 24 estão valores de densidade básica e energética da madeira com casca dos tratamentos avaliados.

Tabela 24. Densidade básica e energética da madeira com casca.

Espaçamento	Dose	$D_{b,pond}$	D_e
		$kg.m^{-3}$	$GJ.m^{-3}$
A	1	$354,5 \pm 7,9$	$6,58 \pm 0,1$
A	2	$370,7 \pm 14,0$	$7,02 \pm 0,3$
C	1	$368,8 \pm 22,4$	$7,03 \pm 0,4$
C	2	$381,6 \pm 11,4$	$7,26 \pm 0,2$
Média		$368,9 \pm 16,6$	$6,97 \pm 0,4$

Os fatores de variação considerados, ao nível de 5%, foram significativos apenas para a densidade energética (Tabela 25). No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-14 e A-15).

Tabela 25. Resumo do *p-valor* da análise de variância da densidade básica e energética.

Fator de variação	<i>p - valor</i>	
	$kg.m^{-3}$	$GJ.m^{-3}$
Espaçamento (E)	0,117	0,029*
Dose (D)	0,077	0,037*
E x D	0,823	0,479

* *p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A densidade básica da madeira com casca ponderada pelo volume da árvore não sofreu efeito significativo ($p\text{-valor}<0,05$) do espaçamento e da adubação. Eloy et al. (2014) e Sereghetti (2012) trabalhando com plantios jovens de eucaliptos também não evidenciaram efeito do espaçamento na densidade básica ponderada da madeira. Entretanto, Garcia (2013) e Machado (2014) constataram influência do fator de espaçamento e idade na densidade da madeira, sendo que a densidade diminuiu com o adensamento do plantio e aumenta com a idade.

Para o mesmo clone estudado aos 24 meses, porém com o dobro de fertilizantes, Garcia (2013) reportou a densidade básica da madeira de 447 kg.m^{-3} para o espaçamento $2,8 \times 1,5\text{m}$ e 410 kg.m^{-3} para o espaçamento $2,8\text{m} \times 0,5\text{m}$. Os valores foram muito acima do que os encontrados no presente estudo, tal constatação pode estar relacionada a alta dosagem de adubo utilizada pelo autor. Para a mesma espécie, Sereghetti (2012) encontrou densidades básicas de 338 a 413 kg.m^{-3} de 1250 a 5000 árvores.ha⁻¹.

Em sistemas adensados para *Eucalyptus grandis* de 24 a 36 meses de idade, a densidade básica variou entre 320 a 390 kg.m^{-3} (ELOY et al., 2014, MACHADO, 2014), corroborando com os resultados deste estudo.

A densidade energética está relacionada à quantidade de energia contida em determinado volume de madeira (LIMA et al., 2011). É uma propriedade que pode ser utilizada para classificar o combustível, até mesmo comparar com outras fontes de energia não sólidas como petróleo, álcool e gás natural.

A densidade energética da madeira com casca sofreu efeito significativo ($p\text{-valor}<0,05$) do espaçamento e da adubação (Tabela 26).

Tabela 26. Densidade energética (GJ.m^{-3}) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Esp. \ Dose			Média
	1	2	
A	6,58	7,02	6,80 B
C	7,03	7,26	7,15 A
Média	6,81 b	7,14 a	

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

A densidade energética foi maior para o espaçamento com menor densidade de plantio e com maior dose de adubação. Ela tende a aumentar com a maturidade da madeira. Lima et al. (2011) reportaram um valor de $9,29 \text{ GJ.m}^{-3}$ para a

madeira de *Eucalyptus benthamii* aos 6 anos no espaçamento 3 x 2m. Apesar da pouca idade do material utilizado neste estudo, os valores obtidos para densidade energética podem ser considerados altos.

Para serragem e briquetes de eucalipto, Protásio et al. (2011a) determinaram valores de $4,14 \text{ GJ.m}^{-3}$ e $17,46 \text{ GJ.m}^{-3}$, respectivamente. Os mesmos autores salientam que aumentar a concentração de energia amplia a utilização da biomassa na transformação energética.

Na Tabela 27 são apresentados os valores médios de todas as propriedades físicas e químicas avaliadas na biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em SFCR.

Comparando as biomassas estudadas e avaliando sob o ponto de vista energético, as folhas tiveram um desempenho melhor, apesar dos altos valores de cinzas que são prejudiciais a seu aproveitamento. Outro ponto negativo seria a densidade aparente muito baixa das folhas, implicando diretamente no transporte desse material que não foi contemplada neste estudo. Entretanto, em trabalhos paralelos e complementares a esta pesquisa, foi encontrada uma densidade à granel média seco ao ar de $36,2 \text{ kg.m}^{-3}$ para as folhas, $71,5 \text{ kg.m}^{-3}$ para os galhos e $128,4 \text{ kg.m}^{-3}$ para cavacos de madeira com casca.

Tabela 27. Resumo das propriedades (valores médios e desvio padrão) da biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 24 meses nos sistemas florestais de curta rotação (SFCR).

Propriedades	Frações		
	Madeira com casca	Galhos	Folhas
Carbono (%)	$44,3 \pm 0,5$	$44,7 \pm 0,5$	$49,1 \pm 0,6$
Hidrogênio (%)	$7,4 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,3$	$8,2 \pm 0,3$
Oxigênio (%)	$46,7 \pm 1,0$	$45,8 \pm 0,8$	$37,5 \pm 0,8$
Nitrogênio (%)	$0,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,3$
Enxofre (%)	$0,1 \pm 0,0$	$0,1 \pm 0,0$	$0,1 \pm 0,0$
Umidade após colheita (%)	$64,0 \pm 9,6$	$49,2 \pm 11,0$	$58,0 \pm 10,0$
Cinzas (%)	$1,1 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,6$
Carbono fixo (%)	$14,4 \pm 1,2$	$17,3 \pm 1,0$	$18,4 \pm 0,6$
Material volátil (%)	$84,5 \pm 1,3$	$81,2 \pm 1,1$	$78,5 \pm 0,7$
Holocelulose (%)	$81,5 \pm 1,5$	$68,4 \pm 2,1$	$34,9 \pm 1,9$
Lignina Klason insolúvel (%)	$21,6 \pm 0,8$	$20,7 \pm 0,9$	$20,2 \pm 2,7$
Extrativos totais (%)	$2,0 \pm 0,8$	$12,4 \pm 1,2$	$37,9 \pm 1,3$
Poder calorífico superior (MJ.kg^{-1})	$18,9 \pm 0,3$	$19,2 \pm 0,3$	$22,2 \pm 0,2$
Densidade básica (kg.m^{-3})	$368,9 \pm 16,6$	-	-
Densidade energética (GJ.m^{-3})	$7,0 \pm 0,4$	-	-

4.2 Massa seca

A massa seca relativa nas frações da biomassa das árvores está representada na Figura 34.

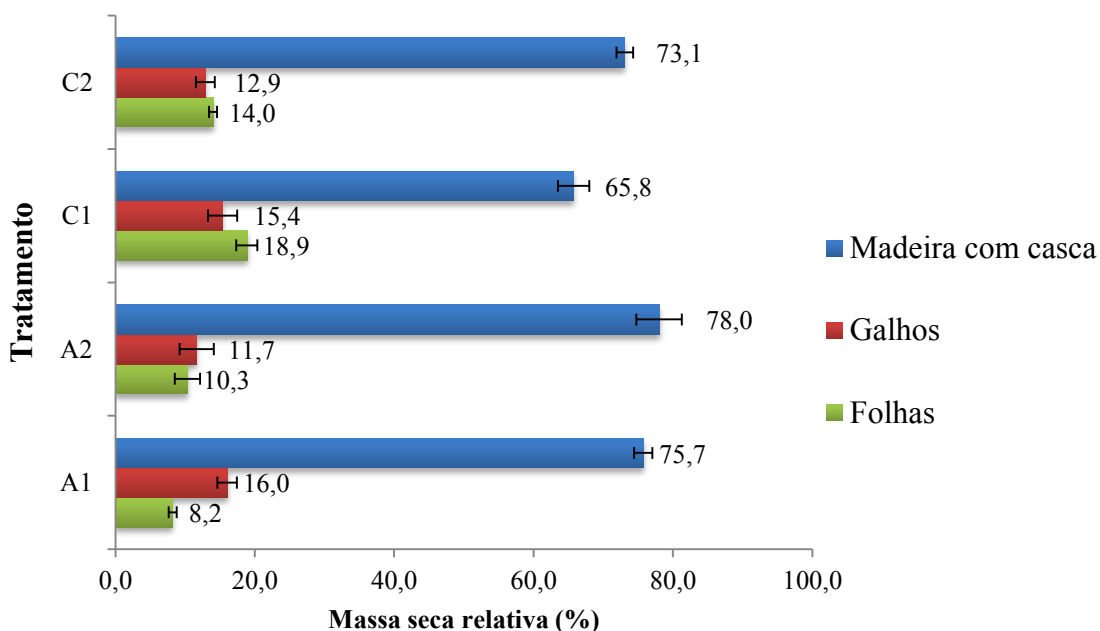


Figura 34. Massa seca relativa da biomassa na árvore para os tratamentos avaliados.

Para os espaçamentos mais adensados a seguinte ordem foi obtida: madeira>galhos>folhas; essa relação sofreu uma inversão nos dois últimos componentes para os espaçamentos menos adensados, sendo: madeira>folhas>galhos. Essas relações podem ser explicadas a partir da análise do comportamento natural da floresta: quanto maior o espaçamento útil entre as árvores, maior a disponibilidade solar e, consequentemente, maior é o crescimento da copa.

As maiores proporções de massa seca de fuste na árvore foram encontradas nos espaçamentos A1 e A2. Silva (2005) estudando a alocação dos componentes na árvore (6 anos) para o mesmo clone avaliado neste estudo encontrou 93,6% de fuste com casca, 4,0% para galhos e 2,4% para as folhas, sugerindo uma maior alocação de massa seca no fuste com a idade.

A Tabela 28 apresenta os resultados da massa seca das frações da biomassa florestal estudada.

Tabela 28. Massa seca (MS) das frações da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Espaçamento	Dose	Massa seca		
		Madeira com casca	Galhos	Folhas
kg.árvore ⁻¹				
A	1	5,4 ± 0,4 Da	1,2 ± 0,2 Ab	0,6 ± 0,04 Bb
A	2	8,7 ± 0,8 Ba	1,3 ± 0,3 Ab	1,1 ± 0,1 ABb
C	1	7,2 ± 1,1 Ca	1,7 ± 0,4 Ab	2,1 ± 0,5 Ab
C	2	12,9 ± 1,2 Aa	2,3 ± 0,4 Ab	2,5 ± 0,3 Ab
	<i>Média</i>	8,5 ± 2,9 a	1,6 ± 0,5 b	1,6 ± 0,8 b
t.ha ⁻¹				
A	1	28,9 ± 2,6 Aa	6,1 ± 0,5 Ab	3,1 ± 0,3 Ab
A	2	30,9 ± 2,7 Aa	4,6 ± 0,4 Ab	4,1 ± 0,4 Ab
C	1	14,4 ± 2,7 Ca	3,4 ± 0,6 Ab	4,1 ± 0,8 Ab
C	2	21,7 ± 1,7 Ba	3,8 ± 0,3 Ab	4,2 ± 0,3 Ab
	<i>Média</i>	24,0 ± 7,0 a	4,5 ± 1,2 b	3,9 ± 0,6 b

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

A massa seca, por árvore ou hectare, foi significativa a 5% na análise de variância entre e dentro dos fatores de variação (Tabela 29). No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-16 e A-17).

Tabela 29. Resumo do *p-valor* da análise de variância da massa seca considerando as frações da biomassa.

Fator de variação	<i>p - valor</i>	
	kg.árvore ⁻¹	t.ha ⁻¹
Espaçamento (E)	0,0001*	0,0001*
Dose (D)	0,0001*	0,0001*
Biomassa (B)	0,0001*	0,0001*
E x D	0,010*	0,007*
E x B	0,0001*	0,0001*
D x B	0,0001*	0,0001*
E x D x B	0,008*	0,006*

* *p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A comparação entre os tratamentos revelou que a massa seca de madeira com casca por árvore foi maior para a dose mais elevada (Dose 2) e espaçamento mais amplo (2,8m x 1,5m). Já a massa seca de galhos e folhas por árvore não variaram em

função dos tratamentos, exceto para a fração folha no espaçamento mais adensado (2,8m x 0,5m) e menor dose de adubação.

Para a biomassa total por hectare, os valores estão na mesma faixa dos obtidos para florestas adensadas de eucalipto com dois anos de idade por Müller (2005), de 20 a 45 t.ha⁻¹.

No espaçamento de plantio mais adensado, a maior dose de adubação não aumentou significativamente a produção de massa seca. Tal fato permite supor que a quantidade de adubo aplicada por árvore com a menor dose foi suficiente para suprir a demanda nutricional dos sistemas florestais considerados.

Apesar da menor massa seca de madeira por árvore no espaçamento adensado (2,8m x 0,5m), os valores foram bem superiores aos observados no espaçamento 2,8m x 1,5m, quando comparados por hectare. Schönau e Coetzee (1989) relataram que para um determinado período de rotação, espaçamentos maiores ocasionam uma menor produção de biomassa total por unidade de área, entretanto maior biomassa por árvore.

Para avaliação do total da biomassa por árvore ou por hectare, constatou-se que os valores foram significativos na análise de variância para o espaçamento e dose (Tabela 30). No apêndice são apresentados os quadros de análise de variância (A-18 e A -19).

Tabela 30. Resumo do *p-valor* da análise de variância da massa seca total (somatório das três biomassas).

Fator de variação	<i>p - valor</i>	
	kg.árvore ⁻¹	t.ha ⁻¹
Espaçamento (E)	0,0001 *	0,0001 *
Dose (D)	0,0001 *	0,007 *
E x D	0,064	0,050

* *p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

As Tabelas 31 e 32 apresentam a interação E x D para a massa seca por árvore e por hectare.

Tabela 31. Massa seca total (kg.árvore^{-1}) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Esp.	Dose		Média
	1	2	
A	7,2	11,1	9,1 B
C	10,9	17,6	14,3 A
Média	9,0 b	14,4 a	

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Tabela 32. Massa seca total (t.ha^{-1}) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Esp.	Dose		Média
	1	2	
A	38,1	39,6	38,9 A
C	21,8	29,8	25,8 B
Média	30,0 b	34,7 a	

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

A massa seca total média por árvore (considerando o somatório de todas as biomassas) foi maior para espaçamento 2,8m x 1,5m e para a Dose 2. Esses valores estão na faixa reportada por Guerra et al. (2014) de 6,5 a 28,8 kg.árvore^{-1} para florestas energéticas com o mesmo clone aos dois anos de idade.

A produção de massa seca total por hectare foi maior para o espaçamento mais adensado; os valores também variaram em função da dose, sendo a produção de massa seca na dose 2 superior a dose 1. Os resultados são inferiores aos reportados por Garcia (2013) para florestas adensadas de *Eucalyptus urograndis* que foram manejadas com o dobro de fertilizantes utilizados neste estudo e obteve valores na faixa de 46 a 100 t.ha^{-1} aos dois anos de idade.

4.3 Potencial energético

A Tabela 33 apresenta os resultados do potencial energético (PE) para as frações da biomassa florestal estudada.

Tabela 33. Potencial energético (PE) das frações da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

		Potencial energético		
Espaçamento	Dose	Madeira com casca	Galhos	Folhas
		MJ.árvore ⁻¹		
A	1	100,5 ± 8,3 Ca	22,2 ± 3,8 Ab	13,0 ± 1,0 Cb
A	2	164,3 ± 14,6 Ba	24,9 ± 5,4 Ab	24,9 ± 2,9 BCb
C	1	136,8 ± 20,0 Ba	39,5 ± 8,7 Ab	45,1 ± 9,9 ABb
C	2	244,8 ± 22,0 Aa	44,0 ± 7,4 Ab	54,9 ± 7,2 Ab
	<i>Média</i>	<i>161,6 ± 64,7 a</i>	<i>32,6 ± 25,4 b</i>	<i>34,5 ± 17,3 b</i>
		GJ.ha ⁻¹		
A	1	536,1 ± 48,2 Aa	117,9 ± 10,6 Ab	69,7 ± 6,3 Ab
A	2	584,7 ± 51,0 Aa	88,8 ± 7,7 Ab	89,4 ± 7,8 Ab
C	1	273,9 ± 52,3 Ca	64,0 ± 12,2 Ab	89,7 ± 17,1 Ab
C	2	414,1 ± 31,9 Ba	74,1 ± 5,7 Ab	92,6 ± 7,1 Ab
	<i>Média</i>	<i>452,2 ± 130,6 a</i>	<i>86,2 ± 13,4 b</i>	<i>85,4 ± 22,6 b</i>

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

O potencial energético (PE) foi significativo para $p\text{-valor}<0,05$ entre e dentro dos fatores de variação (Tabela 34). No apêndice são apresentadas as tabelas completas da análise de variância (A-20 e A-21).

Tabela 34. Resumo do $p\text{-valor}$ da análise de variância do potencial energético considerando as frações da biomassa.

Fator de variação	$p\text{-valor}$	
	MJ.árvore ⁻¹	GJ.hectare ⁻¹
Espaçamento (E)	0,0001*	0,0001*
Dose (D)	0,0001*	0,0001*
Biomassa (B)	0,0001*	0,0001*
E x D	0,030*	0,012*
E x B	0,0001*	0,0001*
D x B	0,0001*	0,0001*
E x D x B	0,010*	0,014*

* $p\text{-valor} < 0,05$ = significativo a 5% pelo Teste F.

Sob o aspecto energético e com base na média do potencial energético por hectare, as biomassas galhos e folhas, quando aproveitadas para queima, representariam 28,5% da quantidade de energia gerada. Observa-se que os galhos e folhas

possuem o mesmo potencial energético relativo, quando contabilizado por árvore ou por hectare. Os valores encontrados para a madeira estão dentro da faixa de 131 a 580 MJ.árvore⁻¹ descrito por Guerra et al. (2014) para o mesmo clone estudado aos dois anos de idade.

Na avaliação do potencial energético total, considerando o somatório de todas as biomassas, houve efeito do espaçamento e da dose (Tabela 35). No apêndice são apresentados os quadros de análise de variância (A-22 a A-23).

Tabela 35. Resumo do *p-valor* da análise de variância do potencial energético total (somatório das três biomassas).

Fator de variação	<i>p - valor</i>	
	MJ.árvore ⁻¹	GJ.hectare ⁻¹
Espaçamento (E)	0,0001*	0,0001*
Dose (D)	0,0001*	0,005*
E x D	0,130	0,071

* *p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

As Tabelas 36 e 37 mostram os resultados do PE total comparados pelo teste de médias Tukey ($\alpha=0,05$).

Tabela 36. Potencial energético total (MJ.árvore⁻¹) de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Esp. \ Dose	1	2	Média
A	135,7	214,1	174,9 B
C	221,3	343,6	282,5 A
Média	178,5 b	278,9 a	

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Tabela 37. Potencial energético total (GJ.ha⁻¹) de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Esp. \ Dose	1	2	Média
A	723,8	762,9	743,3 A
C	427,6	580,8	504,2 B
Média	575,7 b	671,9 a	

Na mesma coluna, médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual, e na mesma linha, médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula igual, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Apesar da maior quantidade de energia gerada por árvore no espaçamento 2,8m x 1,5m, a produção total de energia por hectare é superior no espaçamento 2,8m x 0,5m. A dose de fertilizante mais elevada sugeriu um maior potencial energético por árvore e por hectare.

De acordo com Sartório (2014) e Eloy (2013), o potencial energético por hectare está intimamente relacionada com a produção de massa seca da floresta. Os resultados encontrados são condizentes com os reportados por Müller (2005) de 791 GJ.ha⁻¹, 666 GJ.ha⁻¹, 524 GJ.ha⁻¹ e 388 GJ.ha⁻¹, respectivamente para espaçamentos 3 x 0,5m, 3 x 1,0m, 3 x 1,5m e 3 x 2m, referentes a clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* com dois anos de idade.

Para florestas mais velhas, Pérez et al. (2011) determinaram uma produtividade energética por volta de 716 GJ.ha⁻¹ aos 7 anos de idade para plantios energéticos de *Eucalyptus nitens* na Espanha. Esse valor é inferior ao encontrado no presente trabalho para o espaçamento mais adensado (743 GJ.ha⁻¹) aos dois anos de idade no Brasil.

Os resultados foram reportados em tep (tonelada equivalente de petróleo) na Tabela 38.

Tabela 38. Potencial energético (PE) das frações da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em tep* (tonelada equivalente de petróleo).

Espaçamento	Dose	Potencial energético		
		Madeira com casca	Galhos	Folhas
10 ⁻³ tep.árvore ⁻¹				
A	1	2,40 ± 0,20	0,53 ± 0,09	0,31 ± 0,02
A	2	3,92 ± 0,35	0,59 ± 0,13	0,59 ± 0,07
C	1	3,27 ± 0,48	0,94 ± 0,21	1,08 ± 0,24
C	2	5,85 ± 0,53	1,05 ± 0,18	1,31 ± 0,17
	<i>Média</i>	3,86 ± 1,55	0,78± 0,61	0,82± 0,41
tep.ha ⁻¹				
A	1	12,80 ± 1,15	2,82 ± 0,25	1,67 ± 0,15
A	2	13,96 ± 1,22	2,12 ± 0,19	2,14 ± 0,19
C	1	6,54 ± 1,25	1,53 ± 0,29	2,14 ± 0,41
C	2	9,89 ± 0,76	1,77 ± 0,14	2,21 ± 0,17
	<i>Média</i>	10,80 ± 3,12	2,06 ± 0,53	2,04± 0,32

* Conversão: 1 tep - 41,868 x 10⁹ J (BEN, 2014).

4.4 Exportação de nutrientes

A Tabela 39 apresenta os valores de macro e micronutrientes para as frações da biomassa florestal dos SFCR.

Na Tabela 40 estão sumarizados os valores de *p-valor* da análise de variância (ANOVA) para os macro e micronutrientes. No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-24 a A-34).

Os resultados obtidos estão de acordo com os trabalhos de Oguri (2012) e Viera et al. (2012) estudando a biomassa de plantios de eucaliptos jovens (1 a 3 anos). Todos os nutrientes estudados foram influenciados pelo fator biomassa (Figura 35 e 36).

Tabela 39. Macro e micronutrientes nas biomassas estudadas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* nos SFCR aos 24 meses.

Esp	Dose	Frações	Macronutrientes (g.kg ⁻¹)						Micronutrientes (mg.kg ⁻¹)				
			N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
A	1	Madeira c/c	1,3 ± 0,32	0,2 ± 0,04	3,3 ± 0,47	4,6 ± 1,18	0,6 ± 0,06	0,9 ± 0,02	6,7 ± 1,17	4,0 ± 0,00	56,3 ± 20,01	51,0 ± 10,44	7,0 ± 1,00
A	1	Galhos	2,8 ± 0,47	0,3 ± 0,08	4,4 ± 0,46	6,6 ± 0,58	0,8 ± 0,21	1,0 ± 0,01	10,8 ± 0,60	6,7 ± 0,58	101,3 ± 13,58	86,3 ± 12,06	9,0 ± 2,65
A	1	Folhas	20,5 ± 0,67	1,0 ± 0,04	6,4 ± 0,26	6,0 ± 0,21	2,7 ± 0,15	1,4 ± 0,16	48,4 ± 3,89	6,0 ± 1,00	228,7 ± 10,69	104,7 ± 2,08	11,3 ± 1,15
A	2	Madeira c/c	1,5 ± 0,11	0,2 ± 0,02	3,8 ± 0,26	5,5 ± 0,84	0,5 ± 0,01	0,9 ± 0,02	8,7 ± 1,06	4,7 ± 0,58	70,7 ± 10,79	108,3 ± 7,64	6,7 ± 0,58
A	2	Galhos	2,4 ± 0,15	0,4 ± 0,13	5,2 ± 0,60	6,7 ± 1,91	0,7 ± 0,06	1,0 ± 0,01	11,0 ± 0,49	4,0 ± 0,00	88,7 ± 30,66	145,3 ± 50,08	6,3 ± 0,58
A	2	Folhas	18,4 ± 0,48	0,9 ± 0,03	6,6 ± 0,15	5,7 ± 0,23	1,8 ± 0,12	1,4 ± 0,14	40,1 ± 2,17	5,0 ± 1,00	256,3 ± 33,62	160,0 ± 33,87	9,3 ± 2,08
C	1	Madeira c/c	1,3 ± 0,28	0,1 ± 0,02	2,4 ± 0,17	4,8 ± 0,26	0,6 ± 0,06	1,0 ± 0,01	8,0 ± 1,03	6,0 ± 1,00	80,0 ± 15,72	63,7 ± 11,24	10,3 ± 1,53
C	1	Galhos	2,2 ± 0,50	0,3 ± 0,12	3,0 ± 0,69	7,5 ± 0,84	1,0 ± 0,21	1,0 ± 0,01	9,1 ± 1,95	4,7 ± 1,15	80,0 ± 14,00	140,7 ± 20,03	8,3 ± 1,15
C	1	Folhas	15,4 ± 0,99	0,8 ± 0,02	5,2 ± 0,46	8,6 ± 0,46	2,6 ± 0,26	1,3 ± 0,06	39,4 ± 1,82	5,7 ± 2,08	178,0 ± 12,49	200,7 ± 32,01	13,0 ± 1,00
C	2	Madeira c/c	1,3 ± 0,18	0,1 ± 0,02	2,6 ± 0,06	4,6 ± 0,21	0,6 ± 0,10	0,9 ± 0,03	7,3 ± 2,16	6,3 ± 0,58	59,7 ± 13,32	62,3 ± 11,24	7,0 ± 1,00
C	2	Galhos	3,0 ± 0,53	0,3 ± 0,07	3,7 ± 0,51	7,6 ± 2,03	1,0 ± 0,21	0,9 ± 0,01	8,5 ± 0,92	6,3 ± 1,53	85,7 ± 20,13	135,3 ± 43,06	8,0 ± 0,00
C	2	Folhas	18,6 ± 0,35	0,9 ± 0,03	5,6 ± 0,10	7,0 ± 0,35	2,7 ± 0,06	1,4 ± 0,01	38,5 ± 1,95	6,7 ± 0,58	195,0 ± 9,17	139,3 ± 37,74	10,7 ± 0,58

Tabela 40. Resumo do *p*-valor da análise de variância dos macro e micronutrientes nas frações da biomassa.

FV	<i>p</i> -valor										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
E	0,0001*	0,020*	0,0001*	0,015*	0,0001*	0,235	0,0001*	0,015*	0,003*	0,127	0,007*
D	0,089	0,211	0,001*	0,649	0,002*	0,625	0,034*	1,000	0,403	0,069	0,0001*
B	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,364	0,0001*	0,0001*	0,0001*
E x D	0,0001*	0,594	0,714	0,201	0,0001*	0,914	0,288	0,007*	0,475	0,0001*	0,704
E x B	0,0001*	0,428	0,442	0,026*	0,102	0,725	0,007*	0,140	0,001*	0,061	0,439
D x B	0,563	0,526	0,305	0,256	0,007*	0,305	0,004*	0,492	0,173	0,306	0,823
E x D x B	0,0001*	0,044*	0,724	0,651	0,002*	0,452	0,005*	0,032*	0,238	0,372	0,061

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

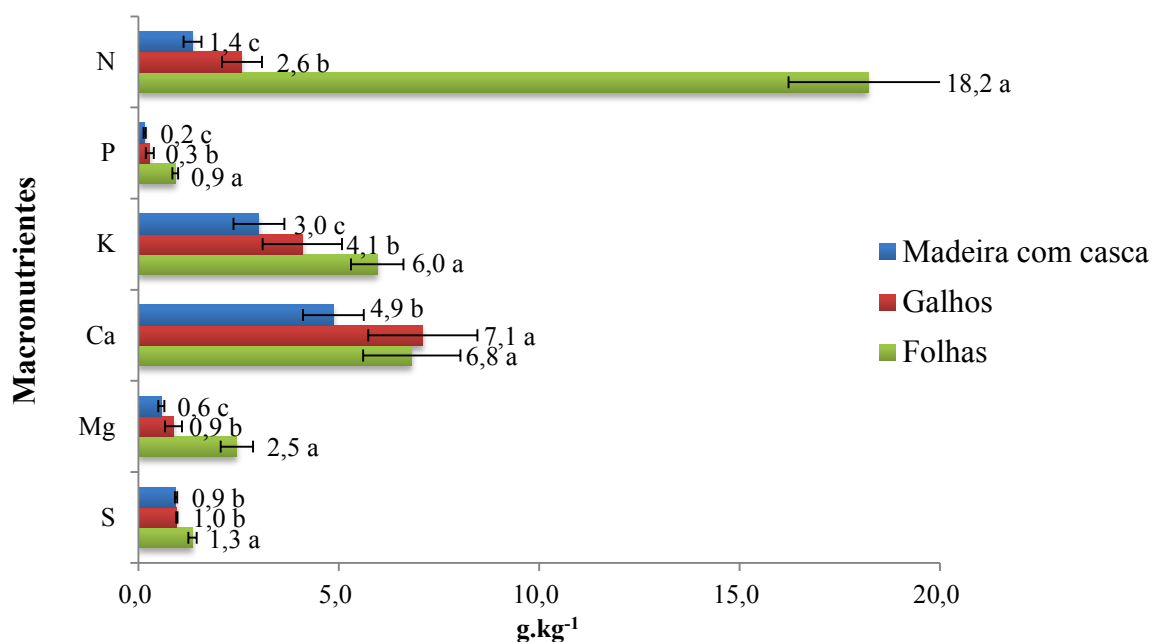


Figura 35. Macronutrientes nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

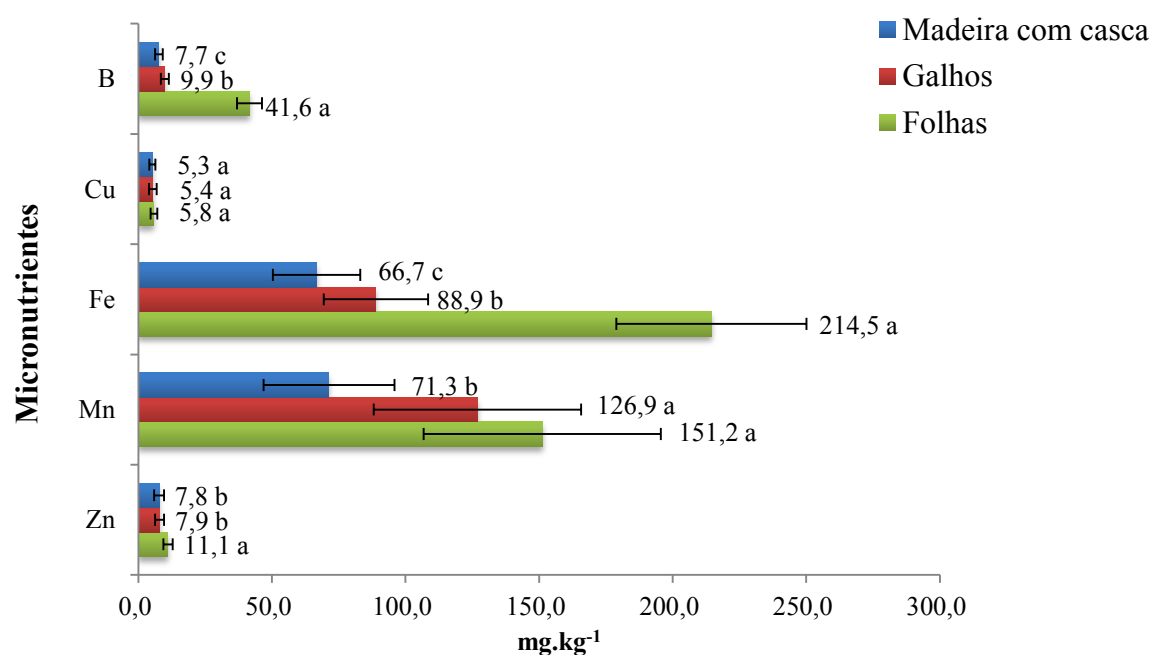


Figura 36. Micronutrientes nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

As proporções das concentrações nas frações podem ser visualizadas na Figura 37.

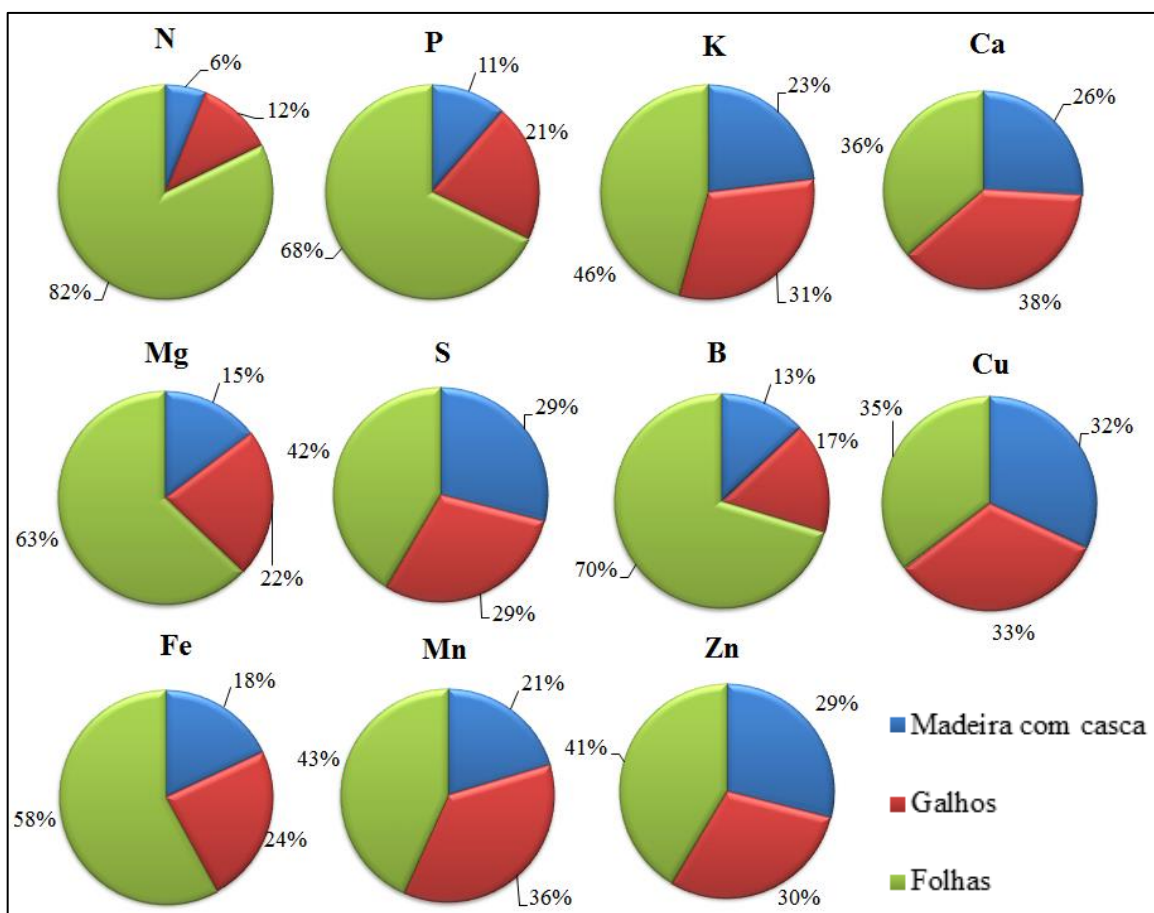


Figura 37. Concentração de nutrientes por fração da biomassa.

Cabe destaque às folhas, que apresentaram as maiores concentrações de macro e micronutrientes, seguidos dos galhos, como obtido por Viera et al. (2012) estudando *Eucalyptus urograndis* aos 18 meses de idade.

A Tabela 41 apresenta os valores da exportação de macro e micronutrientes por hectare para as frações da biomassa florestal nos SFCR estudados. Na Tabela 42 estão sumarizados os valores de *p-valor* da análise de variância (ANOVA) e no apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-35 a A-45).

Tabela 41. Macro e micronutrientes por hectare nos SFCR de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 24 meses de idade..

Esp	Dose	Frações	Macronutrientes (kg.ha ⁻¹)						Micronutrientes (kg.ha ⁻¹)				
			N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
A	1	Madeira c/c	37,7 ± 3,39	4,6 ± 0,42	94,4 ± 8,48	131,9 ± 11,86	16,4 ± 1,47	27,2 ± 2,45	0,19 ± 0,02	0,12 ± 0,01	1,63 ± 0,15	1,47 ± 0,13	0,20 ± 0,02
A	1	Galhos	16,8 ± 1,51	1,6 ± 0,14	26,9 ± 2,42	40,1 ± 3,61	5,1 ± 0,46	5,9 ± 0,53	0,07 ± 0,01	0,04 ± 0,00	0,62 ± 0,06	0,53 ± 0,05	0,06 ± 0,00
A	1	Folhas	64,4 ± 5,79	3,1 ± 0,28	20,1 ± 1,81	18,7 ± 1,68	8,6 ± 0,77	4,3 ± 0,38	0,15 ± 0,01	0,02 ± 0,00	0,72 ± 0,06	0,33 ± 0,03	0,04 ± 0,00
A	2	Madeira c/c	46,9 ± 4,09	5,2 ± 0,46	117,4 ± 10,24	170,9 ± 14,91	15,4 ± 1,35	29,3 ± 2,56	0,27 ± 0,02	0,14 ± 0,01	2,18 ± 0,19	3,35 ± 0,29	0,21 ± 0,02
A	2	Galhos	11,2 ± 0,98	1,7 ± 0,15	24,2 ± 2,11	30,8 ± 2,69	3,1 ± 0,27	4,5 ± 0,39	0,05 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,41 ± 0,04	0,67 ± 0,06	0,03 ± 0,00
A	2	Folhas	75,1 ± 6,55	3,8 ± 0,33	27,1 ± 2,37	23,5 ± 2,05	7,5 ± 0,65	5,7 ± 0,49	0,16 ± 0,01	0,02 ± 0,00	1,05 ± 0,09	0,65 ± 0,06	0,04 ± 0,00
C	1	Madeira c/c	18,8 ± 3,58	2,1 ± 0,40	34,5 ± 6,58	68,9 ± 13,16	9,1 ± 1,74	13,7 ± 2,62	0,11 ± 0,02	0,09 ± 0,02	1,15 ± 0,22	0,91 ± 0,17	0,15 ± 0,03
C	1	Galhos	7,3 ± 1,39	0,8 ± 0,16	10,1 ± 1,92	25,3 ± 4,83	3,2 ± 0,62	3,2 ± 0,62	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,00	0,27 ± 0,05	0,47 ± 0,09	0,03 ± 0,01
C	1	Folhas	63,4 ± 12,12	3,4 ± 0,65	21,4 ± 4,09	35,4 ± 6,77	10,7 ± 2,05	5,3 ± 1,00	0,16 ± 0,03	0,02 ± 0,00	0,73 ± 0,14	0,83 ± 0,16	0,05 ± 0,01
C	2	Madeira c/c	27,9 ± 2,15	3,1 ± 0,24	55,8 ± 4,31	99,3 ± 7,66	13,0 ± 1,01	19,8 ± 1,53	0,16 ± 0,01	0,14 ± 0,01	1,30 ± 0,10	1,36 ± 0,10	0,15 ± 0,01
C	2	Galhos	11,5 ± 0,88	1,0 ± 0,08	14,3 ± 1,11	29,3 ± 2,26	4,0 ± 0,31	3,6 ± 0,28	0,03 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,33 ± 0,03	0,52 ± 0,04	0,03 ± 0,00
C	2	Folhas	77,4 ± 5,97	3,9 ± 0,30	23,4 ± 1,80	29,2 ± 2,25	11,1 ± 0,86	5,7 ± 0,44	0,16 ± 0,01	0,03 ± 0,00	0,81 ± 0,06	0,58 ± 0,04	0,04 ± 0,00

Tabela 42. Resumo do *p*-valor da análise de variância da exportação de nutrientes (hectare) por fração da biomassa.

FV	<i>p</i> -valor										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
E	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,007*	0,0001*	0,0001*	0,322	0,0001*	0,0001*	0,038*
D	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,525	0,0001*	0,003*	0,322	0,0001*	0,0001*	0,004*
B	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
E x D	0,105	0,572	0,979	0,602	0,0001*	0,029*	0,733	0,322	0,037*	0,0001*	0,672
E x B	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,375	0,0001*	0,0001*	0,001*
D x B	0,0001*	0,013*	0,0001*	0,0001*	0,007*	0,0001*	0,001*	0,375	0,0001*	0,0001*	0,105
E x D x B	0,308	0,399	0,139	0,028*	0,058	0,027*	0,445	0,375	0,0001*	0,0001*	0,003*

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A exportação dos nutrientes foi estatisticamente diferente para cada biomassa considerada, como demonstrado nas Figuras 38 e 39.

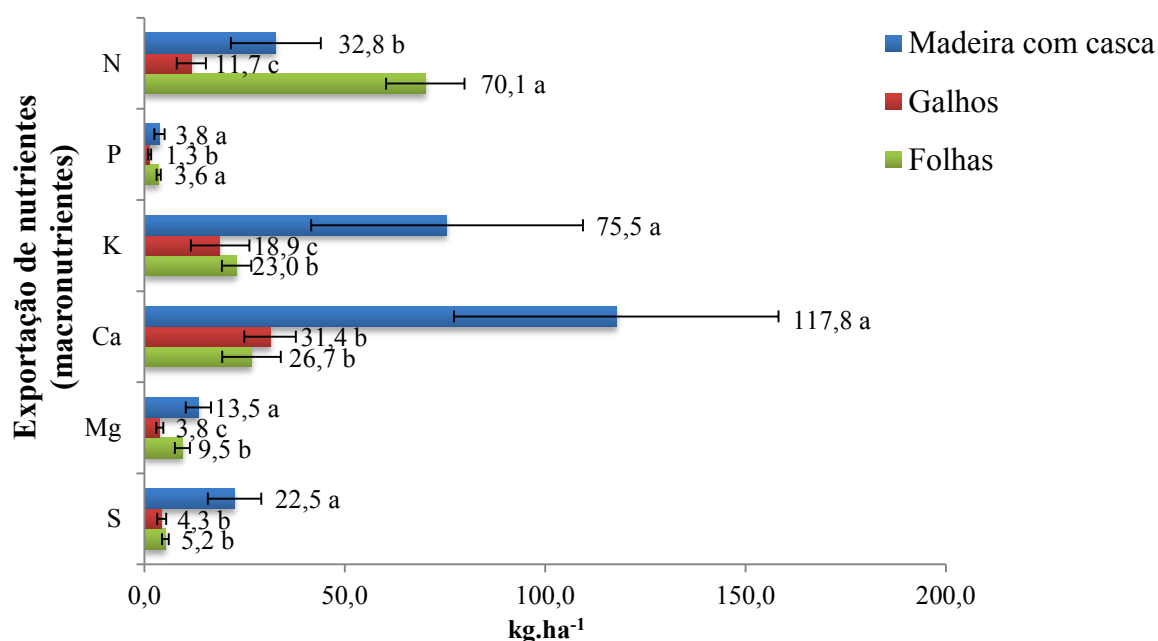


Figura 38. Exportação de macronutrientes nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

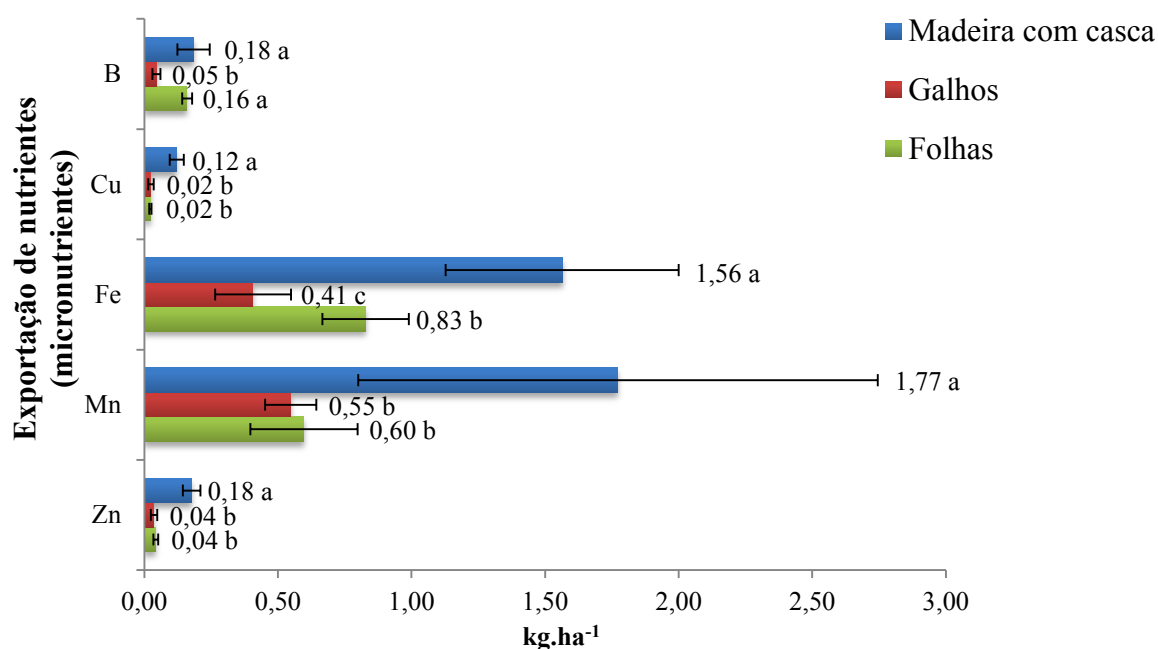


Figura 39. Exportação de micronutrientes nas frações da biomassa. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

As proporções entre os nutrientes exportados na floresta por cada fração da biomassa avaliada estão apresentadas na Figura 40.

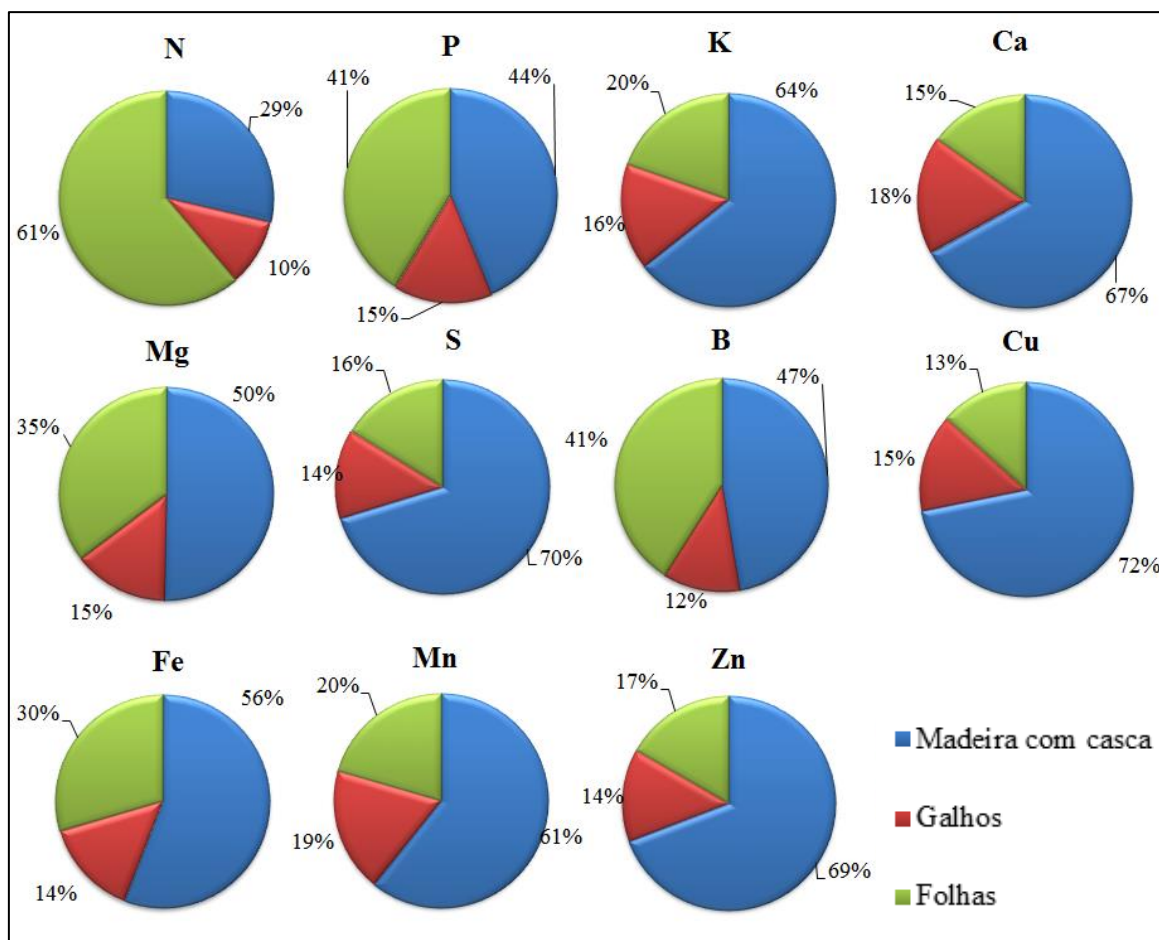


Figura 40. Proporção de nutrientes por biomassa na floresta (hectare).

O fuste das árvores são os responsáveis pelas maiores exportações de macro e micronutrientes, no geral. A exportação está intimamente relacionada a quantidade que cada fração representa na floresta. Entretanto, mesmo representando 8,2 a 18,9% da massa seca nos SFCR estudados, as folhas têm um papel muito importante na exportação do nitrogênio, fósforo, boro e magnésio.

Segundo Guo et al. (2002) quanto menor for a rotação da floresta, maior é a contribuição das folhas para a biomassa total acima do solo. Por ter uma vida curta, a colheita e retirada das folhas na cultura florestal deve ser realizada de forma cautelosa, pois está relacionada com uso sustentável do solo. O mesmo autor salienta que somente os componentes da árvore com alta eficiência na utilização de nutrientes deveriam ser removidos do plantio; deste modo uma quantidade menor de nutrientes teria que ser repostos por fertilizantes comerciais.

Com o intuito de avaliar a sustentabilidade das biomassas estudadas no aproveitamento dos nutrientes, foi adotado o índice de assimilação de nutrientes (NAI - Nutrient assimilation index) proposto por Sochacki et al. (2013). O NAI (t.kg^{-1}) foi obtido pela relação entre a massa seca média total produzida para cada biomassa (t.ha^{-1}) e a quantidade de nutrientes médios assimilados (kg.ha^{-1}), que é a exportação média de nutrientes para cada biomassa. Esta abordagem permite a padronização das medidas entre as diferentes biomassas e é uma forma de avaliar a sustentabilidade do SFCR pelos nutrientes. Assim, os valores maiores do NAI indicam uma boa eficiência de utilização de nutrientes e valores menores indicam uma baixa eficiência.

O NAI foi aplicado somente para os macronutrientes e os resultados foram apresentados na Figura 41.

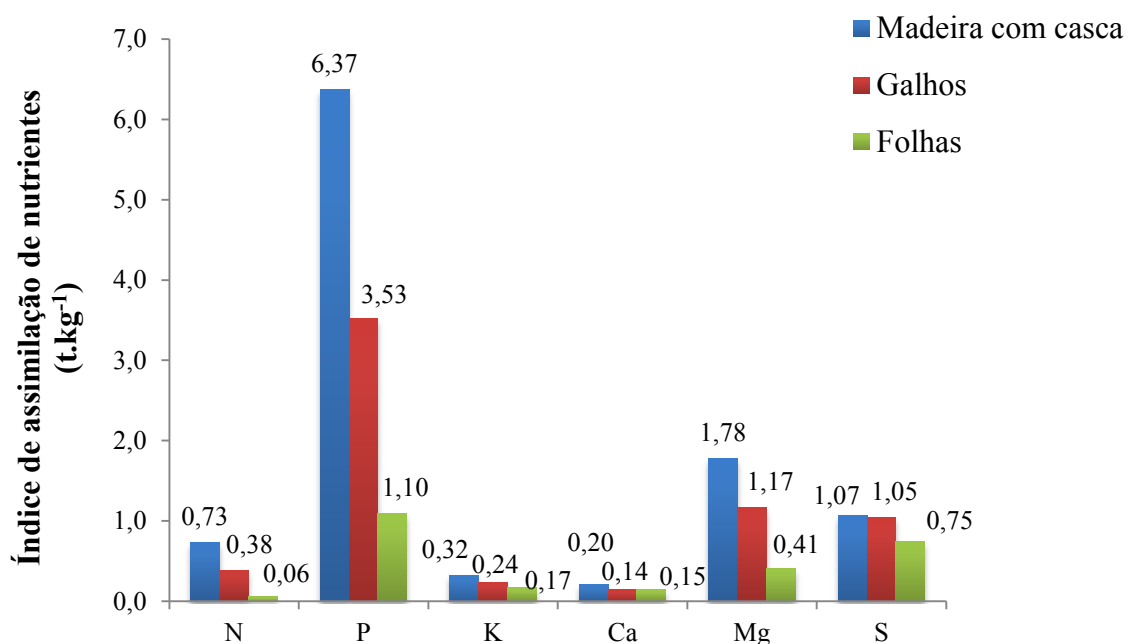


Figura 41. Índice de assimilação de nutrientes (NAI) para os macronutrientes das biomassas estudadas.

A madeira com casca (fuste) teve a maior eficiência na utilização de todos os macronutrientes, seguida dos galhos e das folhas, comprovando a alta sustentabilidade das frações lenhosas comparadas às folhas. Os valores de NAI encontrados foram muito superiores aos observados por Sochacki et al. (2013) para *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus occidentalis* aos 3 anos de idade, plantados no oeste da Austrália. A grande diferença nos resultados pode ser atribuída às condições climáticas enfrentadas nos experimentos, já que esses autores reportaram uma precipitação média de

304 mm.ano⁻¹, muito abaixo da precipitação média desse estudo – 1516 mm.ano⁻¹, que favoreceu a alta produtividade e consequentemente os maiores valores de NAI.

A fim de comparar os tratamentos analisados, a Tabela 43 apresenta os valores de macro e micronutrientes por hectare total (somatória das três frações da biomassa).

Os fatores de variação considerados, ao nível de 5%, foram significativos nos macro e micronutrientes, exceto para o magnésio (Tabela 44). No apêndice são apresentadas as tabelas completas das análises de variância (A-46 e A-56).

Tabela 43. Exportação de nutrientes em SFCR de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 24 meses de idade para biomassa acima do solo.

Nutrientes	A1	A2	C1	C2
N	119,0 ± 10,7	133,2 ± 11,6	89,5 ± 17,1	116,8 ± 9,0
P	9,3 ± 0,8	10,7 ± 0,9	6,4 ± 1,2	8,0 ± 0,6
K	141,4 ± 12,7	168,7 ± 14,7	66,0 ± 12,6	93,5 ± 7,2
Ca	190,8 ± 17,1	225,2 ± 19,6	129,6 ± 24,8	157,8 ± 12,2
Mg	30,0 ± 2,7	26,0 ± 2,3	23,0 ± 4,4	28,1 ± 2,2
S	37,4 ± 3,4	39,4 ± 3,4	22,2 ± 4,2	29,1 ± 2,2
B	0,4 ± 0,04	0,5 ± 0,04	0,3 ± 0,06	0,4 ± 0,03
Cu	0,2 ± 0,02	0,2 ± 0,02	0,1 ± 0,02	0,2 ± 0,01
Fe	3,0 ± 0,27	3,6 ± 0,32	2,2 ± 0,41	2,4 ± 0,19
Mn	2,3 ± 0,21	4,7 ± 0,41	2,2 ± 0,42	2,5 ± 0,19
Zn	0,3 ± 0,03	0,3 ± 0,02	0,2 ± 0,04	0,2 ± 0,02

Tabela 44. Resumo do *p*-valor da análise de variância da exportação de nutrientes total (somatório das frações da biomassa).

FV	<i>p</i> -valor										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
E	0,001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,090	0,0001*	0,0001*	0,016*	0,0001*	0,0001*	0,001*
D	0,002*	0,002*	0,0001*	0,002*	0,698	0,009*	0,008*	0,0001*	0,003*	0,0001*	0,420
E x D	0,257	0,739	0,986	0,718	0,004*	0,128	0,484	0,003*	0,177	0,0001*	0,531

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

As maiores exportações ocorreram nos espaçamentos mais adensados, pois foram os mais produtivos. Dentre os nutrientes, a maior exportação ocorreu para o cálcio (225,2 kg.ha⁻¹) devido à sua presença no fuste das árvores.

Entre os tratamentos, mesmo com um número menor de árvores, a exportação de nutrientes no tratamento C2 ficou próxima à do tratamento A1, exceto para os nutrientes K e Ca.

A exportação de nutrientes foi influenciada pelos fatores espaçamento (Figuras 42 e 43) e dose (Figuras 44 e 45).

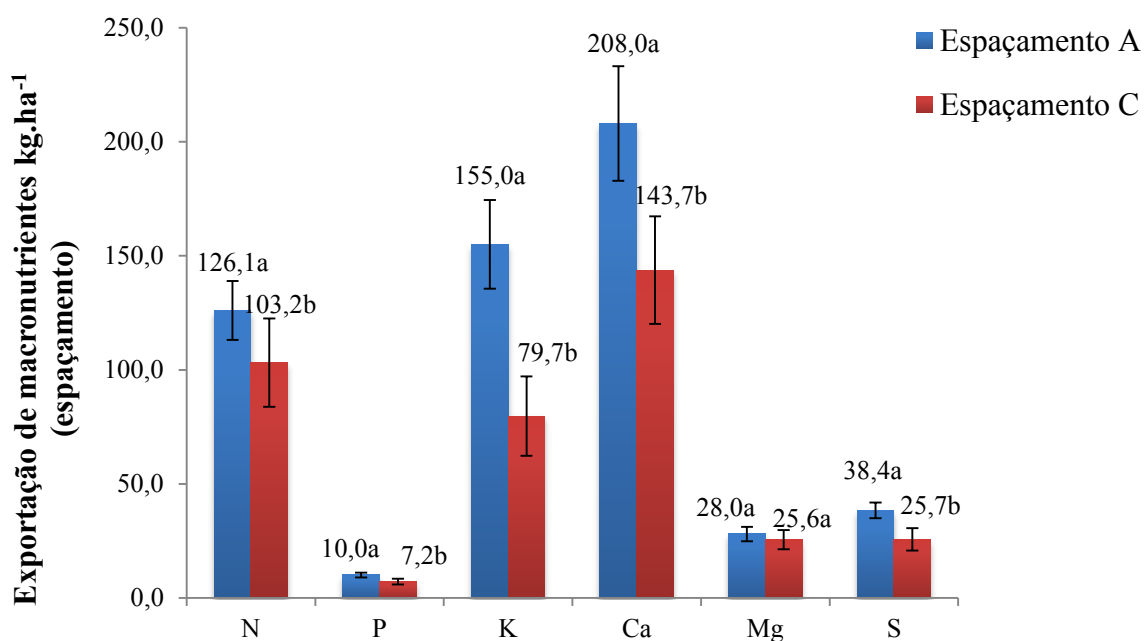


Figura 42. Exportação de macronutrientes nos espaçamentos estudados. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

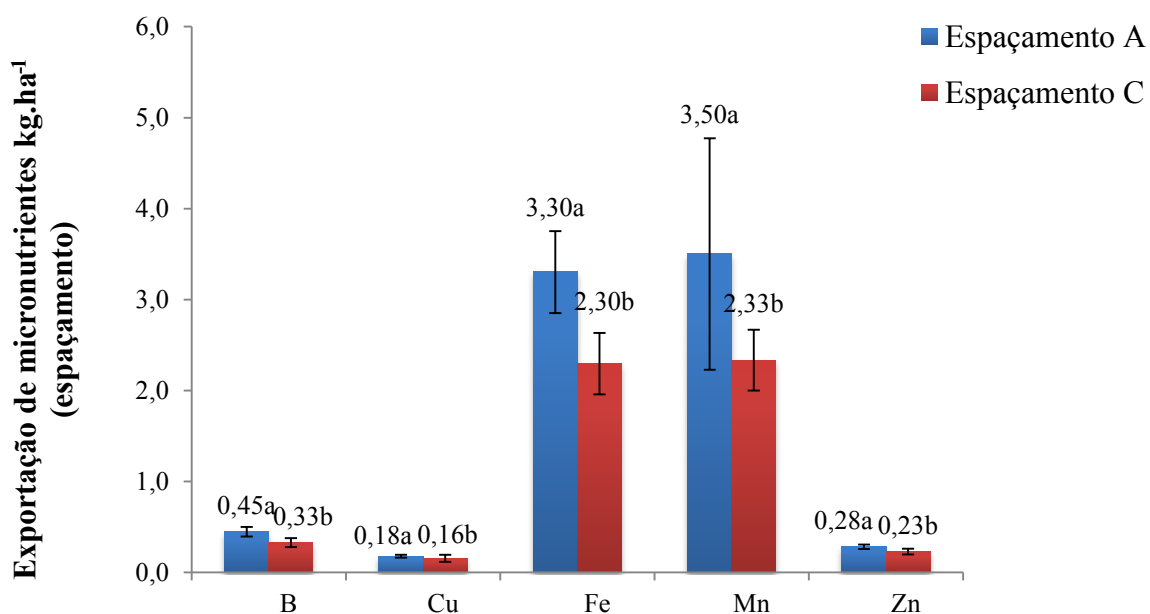


Figura 43. Exportação de micronutrientes nos espaçamentos estudados. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

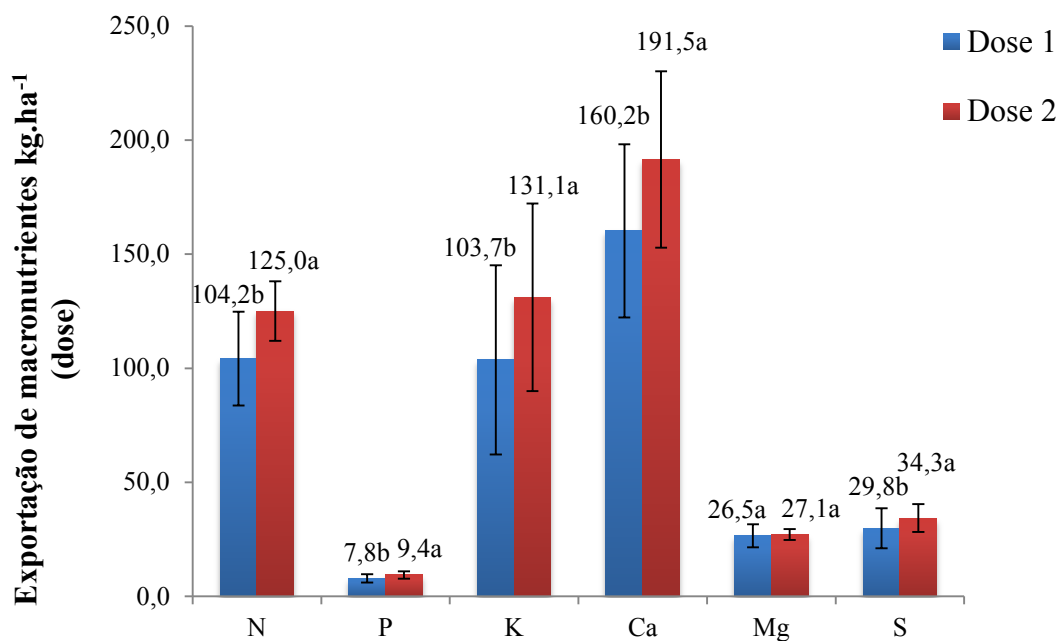


Figura 44. Exportação de macronutrientes nas doses estudadas. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

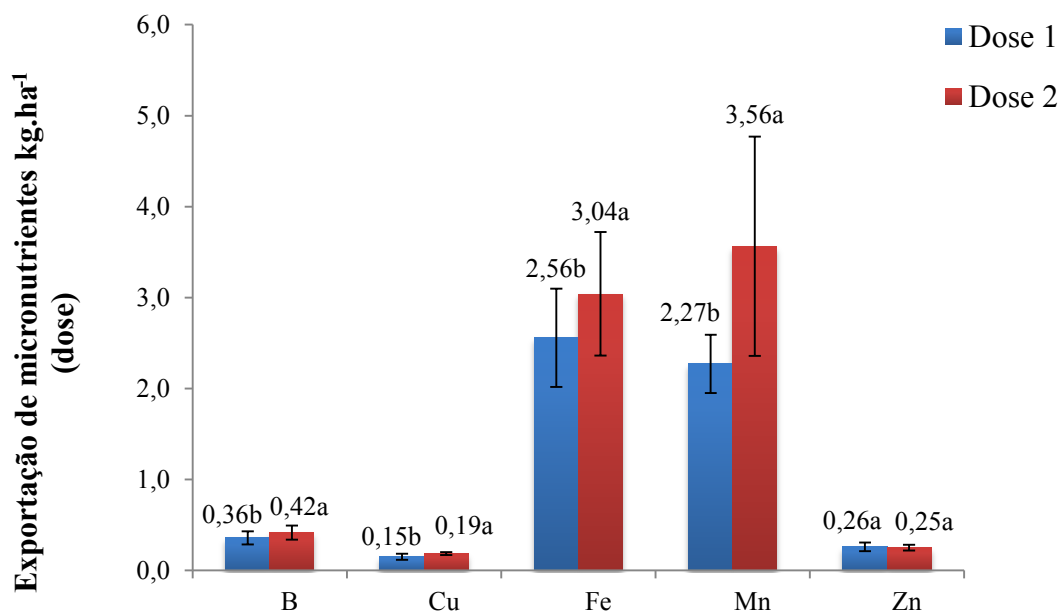


Figura 45. Exportação de micronutrientes nas doses estudadas. Letras minúsculas iguais, no mesmo nutriente, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ($\alpha=0,05$).

Para todos os macro e micronutrientes, o espaçamento 2,8m x 0,5m (maior densidade de plantio) sempre exportou mais do que o espaçamento 2,8m x 1,5m (menor densidade de plantio), e a exportação da dose 2 foi sempre superior à da dose 1.

Foi aplicado o índice de assimilação de nutrientes (NAI) aos tratamentos a fim de determinar o mais sustentável no aproveitamento dos nutrientes (Tabela 45).

Tabela 45. Índice de assimilação de nutrientes (NAI) em t.kg^{-1} para os SFCR de *Eucalyptus uroplylla* x *Eucalyptus grandis* aos 24 meses de idade para biomassa acima do solo.

Nutrientes	A1	A2	C1	C2
N	0,32	0,30	0,24	0,25
P	4,09	3,70	3,44	3,72
K	0,27	0,23	0,33	0,32
Ca	0,20	0,18	0,17	0,19
Mg	1,27	1,52	0,95	1,06
S	1,02	1,00	0,98	1,02

No geral, para a maioria dos nutrientes, os maiores valores de NAI foram encontrados para o tratamento A1, indicando ser o SFCR mais sustentável no aproveitamento dos nutrientes, seguido do A2 e C2, e por último o C1.

Ressalta-se porém que a sustentabilidade dos sistemas florestais de curta rotação deve ser estudada de forma mais ampla e abrangente, considerando, também, a demanda e aproveitamento hídrico, eficiência na utilização da energia solar, entre outros parâmetros.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos ensaios realizados na biomassa dos sistemas florestais de curta rotação aos dois anos de idade, as seguintes conclusões foram obtidas:

Em relação às propriedades físicas e químicas:

- As frações da biomassa da árvore, fuste, galhos e folhas, foram estatisticamente diferentes para todas as propriedades avaliadas;
- O espaçamento e a adubação influenciaram pouco as propriedades físicas e químicas da biomassa florestal;
- Dentre as frações das biomassas estudadas, do ponto de vista energético, as folhas possuíram um desempenho superior às frações lenhosas, entretanto apresentou maior teor de cinzas;
- Foi constatada presença pequena de sílica nas cinzas das frações avaliadas pelo microscópico eletrônico de varredura.

Em relação à massa seca, potencial energético e exportação de nutrientes:

- Houve diferenças expressivas nos sistemas estudados para massa seca e potencial energético (por árvore ou hectare) em função da adubação e do espaçamento de plantio;
- A massa seca e o potencial energético por árvore foram maiores no espaçamento maior e na maior dose de adubação. Entretanto, por hectare, a massa seca e o potencial energético foram maiores no espaçamento mais adensado. Como regra geral, o potencial energético acompanhou a produção de massa seca;
- O espaçamento mais adensado (2,8m x 0,5m) foi o mais indicado para geração de energia, pois apresentou o melhor potencial energético nas duas doses de adubo avaliadas;
- O espaçamento mais adensado (2,8m x 0,5m) com a menor dose de adubo conciliou melhor potencial energético com menor exportação de nutrientes (maior eficiência na utilização dos nutrientes). Portanto, contabilizando-se a sustentabilidade, deveria ser o indicado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84**: standard test methods for ash in wood. West Conshohocken, PA, 2007. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E711-87**: standard test methods for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. West Conshohocken, PA, 2004. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E870-82**: standard test methods for analysis of wood fuel. West Conshohocken, PA, 2006. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E871-82**: standard test methods for moisture analysis of particulate wood fuels. West Conshohocken, PA, 2006. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E872-82**: standard test methods for volatile matter in the analysis of particulate wood. West Conshohocken, PA, 2006. 3p.

ANDRADE, G. C.; BOGNOLA, I. A.; BELLOTE, A. F. J.; FRANCISCON, L.; WATERLOO, M. J.; BRUIJINZEEL, L. A. Site evaluation and productivity of 3-year-old stand of *Eucalyptus urograndis* in São Paulo, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p.331 – 346, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília, 2013. 148p.

BALLONI, E. A.; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Série Técnica, Piracicaba, v. 1, n. 3, p. 1-26, 1980. BARREIROS; R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSÍGOLO, C. A.;

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLLER, M. D.; COUTO, L. O estado da arte na qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: Um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S. Alterações na estrutura anatômica da madeira de cavacos de *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.3, p.523-532, 2008.

BERNARDO, A L.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 104, p 1–13, 1998.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science**: an introduction. New York: Blackwell Publishing., 2003. 554 p.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita e da estocagem na composição química da biomassa florestal. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 66-78, 2012.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis, Piracicaba**, v. 38, n. 88, p. 619-628, dez. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2014**: resultados preliminares - ano base 2013. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Rio de Janeiro, 2014. 288p.

BRIDGWATER, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, p. 87–102, 2003.

BRIDGEWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the science of food and agriculture**, v. 86, p. 1755 - 1768, 2006.

BRITO, J. O. **Queima ou combustão da madeira para fins energéticos**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Silvicultura, 1979. 36 p.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**. São Paulo, v. 21, n.59, p. 185-193, abr. 2007.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n.16, p.63-70, 1978.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais** - Circular Técnica, Piracicaba, n. 52, p.1-14. jun. 1979.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n.20, p.101-113, jun. 1980.

BRITO, J.O. et al. Avaliação das características dos resíduos de exploração florestal do eucalipto para fins energéticos. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais** - Circular Técnica, Piracicaba, n. 62, p.1-7. ago. 1979.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.375-381, 2014.

CHIANG, K.-Y.; CHIEN, K.-L.; CHENG H.-L. Characterization and comparison of biomass produced from various sources: suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. **Applied Energy**, v. 100, p. 164–171, 2012.

CHRISTOPHERSON, N. S.; MATTSON, J. A. Mechanization of the operational aspects of short- rotation forestry. **Biomass**, Barking - England, v. 22, n. 1 – 4. p. 123-133, 1990.

COLLINGS, G. F.; YOKOYAMA, M. T.; BERGEN, W. G. Lignin as determined by oxidation with sodium chlorite and a comparison with permanganate lignin. **Journal of Dairy Science**. v. 61, n.8, p.1156-1160, 1978.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D.; NOGUEIRA DIAS, A.; TSUKAMOTO FILHO, A.A.; FONSECA, E.M.B; CORRÊA, M.R. **Espécies cultivadas para produção de biomassa para energia**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: CEMIG, 2003. 35p.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; TSUKAMOTO, A. A.; BARCELLOS, D. C.; FONSECA; Ê. M. B.; CORRÊA, M. R. Programa de pesquisa para avaliação de densidades de plantio e Rotação de plantações de rápido crescimento para produção de Biomassa. **Biomassa e Energia**, Viçosa – MG, v. 1, n. 1, p.107-112, 2004.

CUIPING, L.; CHUANGZHI, W.; YANYONGJIE; HUANG, H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, p. 119 – 130, 2004.

DEMIRBAS, A. Chapter 2: fuels from biomass. in: demirbas, a. (ed) Biorefineries: for Biomass Upgrading Facilities. **Springer London**. 2010, p. 33-73.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 219–230, 2004.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 42, p. 183-188, 2001.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**. Oxford, v. 50, p. 1746–1760, 2009.

DEMIRBAS, T.; DEMIRBAS, C. Fuel Properties of Wood Species, **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v.31, n.16, p.1464-1472, 2009.

DOAT, J. Le puouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, França, n.172, p.33-48, 1977.

ELOY, E. **Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação**. 2013. 88 f. Dissertação (mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2013.

ELOY, E. et al. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 551-559, 2014.

ETITGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**, v. 37, p. 173-178, 1991.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO **Global Forest Resources Assessment 2010**. Main report. FAO Forestry Department. Forest Resources Assessment Programme (FRA). Paper, n. 163, Rome, 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. **Global Forest Resources Assessment Update 2005**. Terms and definitions (Final version). FAO Forestry Department. Forest Resources Assessment Programme (FRA). Working Paper 83/E, Rome, 2004.

FOREST ENERGY PORTAL. **Illustrations for your presentations and publications**. COST- European Cooperation in Science and Technology, IEA Bioenergy e projeto Metsäenergia. Disponível em: <<http://www.forestenergy.org/pages/images/>>. Acesso em: 29 mar. 2015.

FREITAS JUNIOR, G. **O eucalipto no vale do paraíba paulista**: Aspectos geográficos e históricos. 2011. 142 f. Dissertação (mestrado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. **Teoria simplificada da combustão**. Belo Horizonte, 1988. 30p.

GALLETI, S. R. **Introdução a microscopia eletrônica**. Biológico. São Paulo, v. 65, n.1/2, p. 33-35, 2003.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. **Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices**. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535. Prepared by First Renewables Ltd, for DTI, London. 116p. 2002.

GARCIA, E. A. **Qualidade energética da madeira de eucalipto em função do espaçamento, da adubação e da idade conduzida no sistema florestal de curta rotação**. 2013. 71 f. Tese (doutor em Ciência Florestal), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

GONÇALEZ, J. C.; BREDÁ, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341. 2006.

GUO, L. B.; SIMS, R. E. H.; HORNE, D. J. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand I: biomass and nutrient accumulation. **Bioresource Technology**, v. 85, p. 273–283, 2002.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, vol.13, n. 02, p. 167-175, 2003.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; GARCIA, E. A.; SPINELLI, R. Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.) **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação**. São Paulo, Editora Unesp, 2012. p. 125-161.

GUERRA, S. P. S.; GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. P.; REZENDE, M. A.; SPINELLI, R. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v. 137, p. 360–363, 2014.

HOWARD, E. T. Heat of Combustion of Various Southern Pine Materials. **Wood Science**, v.5, n. 3, p. 194 – 197, 1973.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Good Practice Guidelines: Bioenergy Project Development e Biomass Supply**. Paris : IEA. 2007. 61 p.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR., T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17–46, 1998.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, p. 181-190, 1995.

KARCHESY, J.; KOCH, P. **Energy production from hardwoods growing on southern pine sites**. General technical report SO-24. New Orleans, LA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 59 p.,1979.

KATAKI, R.; KONWER, D. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, p. 17- 23, 2001.

KLASNJA, B.; KOPITOVIC, S.; ORLOVIC, S. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, p. 427–432, 2002.

KOLLMANN, F. e CÔTÉ JR., W.A. **Principles of wood science and technology**. Springer Verlag, New York, 592p. 1968.

KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. 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.

LEWANDOWSKI, I; KICHERER, A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. **European Journal of Agronomy**, v. 6, p. 163- 177, 1997.

LAUREYSENS, I.; BOGAERT, J.; BLUST, R.; CEULEMANS, R. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. **Forest Ecology and Management**, v. 187, p. 295–309, 2004.

LEMENIH, M.; BEKELE, T. Effect of age on calorific value and some mechanical properties of three *Eucalyptus* species grown in Ethiopia. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, p. 223 – 232, 2004.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. S. **Wood structure and composition**. New York: M. Decker, 1991. 488p.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. **Embrapa**. Comunicado técnico, n. 220, Colombo-PR, 2008.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 31, n. 65, p.09-17, 2011.

LOPES, M. C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada na avaliação de painéis de madeira colados lateralmente**. 2008. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), UFPR, Curitiba-PR.

LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 777–788, 2009.

MAGALHÃES, J. G. R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: USO DA MADEIRA PARA FINS ENERGÉTICOS, 1982, Belo Horizonte – MG, **Anais...** Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, p. 56-66, 1982.

MACHADO, F. C. **Crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* em diferentes arranjos de plantio no sistema de curta rotação.** 2014. 45 f. Dissertação (mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

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

MICROLAB. Departamento de Geologia. **Laboratório de microscopia.** Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>. Acesso em: 29 mar. 2015.

MINITAB. **Statistical Software.** versão 16. 2010.

MITCHELL, C. P.; STEVENS, E. A.; WATTERS, M. P. Short-rotation forestry - operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. **Forest Ecology and Management**, v. 121, p. 123-136, 1999.

MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira.** Colombo - PR, v. 31, n. 68, p. 363-372, 2011.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba.** 2005, 108 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2005.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; KUMAR, R. Wood ash: a new source of pozzolanic material. **ACI Maharastra Chapter**, Mumbai, India, 2001.

NAVARRO, A. et al. Biomass production of fast growing woody species in a short rotation coppice in Apulia (Italy). In: 20th European Biomass Conference and Exhibition, Milan, Italy, **Annals...** p. 422 – 426, 2012.

OGURI, G. **Correlação entre biomassa e nutrientes de galhos e folhas em um plantio adensado de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.** 2012. 35f. Dissertação (Mestre em Agronomia -Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2012.

OLANDERS, B.; STEENARI, B. M. Characterization of ashes from wood and straw. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 105-115, 1995.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4 ed. New York: Editor New York, 1980. 722 p.

PEREIRA, H. The importance of biomass structure and chemical composition for biorefineries. In: IUFRO CONFERENCE DIVISION 5 FOREST PRODUCTS, 2012, Estoril, Lisboa – Portugal, **Final program, proceedings and abstracts book...** IUFRO, International Union of Forestry Research Organizations, 2012. p. 57-62.

PÉREZ, S.; RENEDO, C. J.; ORTIZ, A.; MAÑANA, M.; DELGADO, F.; TEJEDOR, C. Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain). **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 4657-4664, 2011.

PROTÁSIO, T. P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.

PRYOR, L. D. Aspecto da cultura do eucalipto no Brasil. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 2-3, p.53-59, 1971.

QUEIROZ, D. L. Pragas exóticas e potenciais à eucaliptocultura no Brasil. **Manejo Fitossanitário de Cultivos Agroenergéticos**. Colombo - PR: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, p. 239-249, 2009.

QUÉNO, L. M. R.; SOUZA, A. N.; ÂNGELO, H.; VALE, A. T.; MARTINS, I. S. Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 417-426, 2011.

RAGLAND, K. W.; AERTS, D. J.; BAKER, A. J. Properties of wood for combustion analysis. **Bioresource Technology**, v. 37, p. 161-168, 1991.

REIS, A. A. DOS, PROTÁSIO, T. P. MELO, I. C. N. A., TRUGILHO, P. F. CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

REN21. **Renewables 2014 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21 Secretariat, França, Paris. 2014. 214p.

REZENDE, G. C.; SUITER FILHO, W.; MENDES, C. J.; CASTRO, P. F. Exploração e rendimento de florestas de ciclo curto objetivando a produção de carvão e energia. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Circular Técnica, n. 96, p. 1 – 12. mar. 1980.

ROCKFORD, D. L.; CARTER, D. R.; AND STRICKER, J. A. Commercial tree crops for phosphate mined lands. Florida Institute of Phosphate Research, **FIPR**, University of Florida, n. 03-141-225, 110 p. 2008.

ROCKWOOD, D. L.; RUDIE, A. W.; RALPH, S. A.; ZHU, J. Y.; WINANDY J. E. Energy product options for Eucalyptus species grown as short rotation woody crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, p. 1361-1378, 2008.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Chapter 3: Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York, 2005, p.35-74.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 2009. 91 f. Dissertação (mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2009.

SANTOS, M. D. D. **Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. 2011. 140 f. Dissertação (mestrado em Ciência Florestal), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

SARTÓRIO, I. P. Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades. 2014. 136 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2014.

SCHÖNAU, A.P.G.; COETZEE, J. Initial spacing, stand density and thinning in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Florida, v. 29, p. 245–266, 1989.

SENELWA, K., SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, p. 127-140, 1999.

SEREGHETTI, G. C. **Biomassa inicial do híbrido *Eucalyptus urophylla* vs. *Eucalyptus grandis* em diferentes espaçamentos**. Dissertação (mestrado em Ciência Florestal), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

SETTE JR, C. R.; DEUS JR, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; PÁDUA, F. A.; CALIL, F. N.; LACLAU, J. P. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 251-258, 2014.

SHENG, C. AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 499–507, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. Série Técnica, **IPEF**, v. 6, n. 20, p 1 – 22, 1989.

SILVA, C. R. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas gerais. **Revista Árvore**, v.26, n.5, p.533-539, 2002.

SOCHACKI, S. J.; HARPER, R. J.; SMETTEM, K. R. J.; DELL, B.; WU, H. Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, p. 315–326, 2013.

SOCHACKI, S. J.; HARPER, R. J.; SMETTEM, K. J. R.. Estimation of woody biomass production from a short-rotation bio-energy system in semi-arid Australia. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, p. 608–616, 2007.

STUPAK, I.; ASIKAINEN, A.; RÖSER, D.; PASANEN, K. Review of recommendations for sustainable forest fuel harvesting and wood ash recycling. In: RÖSER, D.; ASIKAINEN A.; RAULUND-RASMUSSEN K.; STUPAK, I. **Sustainable Use of Forest Biomass for Energy**: a synthesis with focus on the baltic and nordic region. Managing Forest Ecosystems. New York: Springer, vol. 12, 2008. p. 155-196.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **T204 cm-07**. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 2007. 4p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T222 om-11**. Acid - insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, 2011. 5p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **T264 cm-07**. Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta, 2007. 4p.

THOMPSON, M. (editor). **CHNS Elemental Analysers Report**. AMC Technical Briefs, n.29, 2008. Disponível em: <http://www.rsc.org/images/CHNS-elemental-analysers-technical-brief-29_tcm18-214833.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2015.

THY, P.; JENKINS, B. M.; GRUNDTVIG, S.; SHIRAKI, R.; LESHER, C. E. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. **Fuel**, v. 85, p. 783–795, 2006.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94 -111, 1996.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, Santa Maria, 2002.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, p. 913–933, 2010.

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistemas de informação geográfica**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu-SP.

VIERA, M.; BONACINA, D. M.; SCHUMACHER, M; V.; CALIL, F. N.; CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste-RS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, suplemento 1, p. 2481-2490, 2012.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.10, n.2, p. 151 - 160, 1986.

VITAL, B. R. Método de determinação da densidade da madeira. Boletim Técnico, **SIF**, Viçosa, n. 1, p. 1-21, 1984.

WHITE, R. H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 19, n. 4, p. 446–452, 1987.

YAMAJI, F. M. et al. The use of forest residues for pellets and briquettes production in Brazil. In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE, 2010, Veneza, Itália, **Anais...** Editora: Eurowaste, 2010.

YAMAJI, F.M., VENDRASCO, L. CHRISOSTOMO, W. FLORES, W.P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.28, n.1, p.11-15, 2013.

ZOBEL, B. Silvicultural effects on wood properties. **IPEF International**, v.2, p.31-38, 1992.

7. APÊNDICE

A seguir estão apresentadas as tabelas de análise de variância (ANOVA) das propriedades estudadas. A abreviação “S.Q.” refere-se a soma dos quadrados, “Q.M.” a soma dos quadrados médios e “G.L.” aos graus de liberdade.

Análise química elementar

A-1. Análise de variância para o teor de carbono (C).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	1,269	1,269	6,30	0,019*
Dose (D)	1	0,934	0,934	4,64	0,042*
Biomassa (B)	2	171,045	85,523	424,33	0,001*
E x D	1	0,645	0,645	3,20	0,086
E x B	2	1,04	0,520	2,58	0,097
D x B	2	0,474	0,237	1,18	0,326
E x D x B	2	0,22	0,110	0,54	0,587
Resíduos	24	4,837	0,202		
Total	35	180,465			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-2. Análise de variância para o teor de hidrogênio (H).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,0017	0,0017	0,01	0,916
Dose (D)	1	0,2010	0,2010	1,32	0,261
Biomassa (B)	2	4,7767	2,3883	15,73	0,0001*
E x D	1	0,0870	0,0870	0,57	0,456
E x B	2	0,7628	0,3814	2,51	0,102
D x B	2	0,1874	0,0937	0,62	0,548
E x D x B	2	0,1946	0,0973	0,64	0,536
Resíduos	24	3,6433	0,1518		
Total	35	9,8544			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-3. Análise de variância para o teor de oxigênio (O).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,084	0,084	0,17	0,687
Dose (D)	1	0,881	0,881	1,75	0,199
Biomassa (B)	2	623,059	311,529	617,53	0,0001*
E x D	1	0,011	0,011	0,02	0,883
E x B	2	7,666	3,833	7,60	0,003*
D x B	2	0,636	0,318	0,63	0,541
E x D x B	2	3,711	1,855	3,68	0,040*
Resíduos	24	12,107	0,504		
Total	35	648,154			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-4. Análise de variância para o teor de nitrogênio (N).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	1,0134	1,0134	292,09	0,0001*
Dose (D)	1	0,0940	0,0940	27,11	0,0001*
Biomassa (B)	2	19,6707	9,8354	2834,85	0,0001*
E x D	1	0,0348	0,0348	10,04	0,004*
E x B	2	0,1802	0,0901	25,97	0,0001*
D x B	2	0,0054	0,0027	0,77	0,472
E x D x B	2	0,0921	0,0460	13,27	0,0001*
Resíduos	24	0,0833	0,0035		
Total	35	21,1739			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-5. Análise de variância para o teor de enxofre (S).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,00006	0,00006	1,48000	0,235
Dose (D)	1	0,00001	0,00001	0,24000	0,625
Biomassa (B)	2	0,01277	0,00639	154,56000	0,0001*
E x D	1	0,00000	0,00000	0,01000	0,914
E x B	2	0,00003	0,00001	0,33000	0,725
D x B	2	0,00010	0,00005	1,25000	0,305
E x D x B	2	0,00007	0,00003	0,82000	0,452
Resíduos	24	0,00099	0,00004		
Total	35	0,01403			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Análise química imediata

A-6. Análise de variância para a umidade (U) da biomassa verde na coleta.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	14,390	14,390	1,000	0,325
Dose (D)	1	0,960	0,960	0,070	0,797
Biomassa (B)	2	1792,300	896,150	62,130	0,001*
E x D	1	17,510	17,510	1,210	0,278
E x B	2	186,390	93,190	6,460	0,004*
D x B	2	19,750	9,875	0,680	0,511
E x D x B	2	53,210	26,600	1,840	0,173
Resíduos	36	519,220	14,423		
Total	47	2603,730			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-7. Análise de variância para cinzas (CZ).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,048	0,048	1,64	0,212
Dose (D)	1	0,030	0,030	1,03	0,321
Biomassa (B)	2	26,902	13,451	462,25	0,001*
E x D	1	0,347	0,347	11,91	0,002*
E x B	2	0,510	0,255	8,77	0,001*
D x B	2	0,037	0,018	0,63	0,540
E x D x B	2	3,461	1,731	59,47	0,001*
Resíduos	24	0,698	0,029		
Total	35	32,032			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-8. Análise de variância para o material volátil (MV).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	10,521	10,521	15,61	0,001*
Dose (D)	1	0,251	0,251	0,37	0,547
Biomassa (B)	2	218,126	109,063	161,78	0,001*
E x D	1	0,906	0,906	1,34	0,258
E x B	2	3,091	1,546	2,29	0,123
D x B	2	2,025	1,013	1,50	0,243
E x D x B	2	4,28	2,140	3,17	0,060
Resíduos	24	16,179	0,674		
Total	35	255,38			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-9. Análise de variância para o carbono fixo (CF).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	9,150	9,150	12,90	0,001*
Dose (D)	1	0,108	0,108	0,15	0,700
Biomassa (B)	2	103,288	51,644	72,83	0,001*
E x D	1	2,374	2,374	3,35	0,080
E x B	2	1,316	0,658	0,93	0,409
D x B	2	1,626	0,813	1,15	0,335
E x D x B	2	0,060	0,030	0,04	0,958
Resíduos	24	17,018	0,709		
Total	35	134,940			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Análise química estrutural

A-10. Análise de variância para a Lignina Klason (LK_{ins}).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	15,19	15,194	9,95	0,004*
Dose (D)	1	0,67	0,667	0,44	0,515
Biomassa (B)	2	11,92	5,958	3,90	0,034*
E x D	1	1,15	1,155	0,76	0,393
E x B	2	35,01	17,504	11,47	0,0001*
D x B	2	5,57	2,785	1,83	0,183
E x D x B	2	1,85	0,923	0,61	0,554
Resíduos	24	36,63	1,526		
Total	35	107,99			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-11. Análise de variância para os extrativos totais (ET).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,050	0,050	0,040	0,847
Dose (D)	1	0,630	0,630	0,510	0,481
Biomassa (B)	2	8216,630	4108,310	3347,400	0,001*
E x D	1	0,050	0,050	0,040	0,849
E x B	2	5,850	2,920	2,380	0,114
D x B	2	0,590	0,290	0,240	0,788
E x D x B	2	3,340	1,670	1,360	0,275
Resíduos	24	29,460	1,228		
Total	35	8256,580			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-12. Análise de variância para a holocelulose (H_{olo}).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	5,700	5,700	2,620	0,119
Dose (D)	1	2,000	2,000	0,920	0,346
Biomassa (B)	2	13885,000	6942,500	3215,830	0,001*
E x D	1	6,300	6,300	2,900	0,101
E x B	2	42,600	21,300	9,870	0,001*
D x B	2	0,600	0,300	0,130	0,876
E x D x B	2	2,200	1,100	0,520	0,602
Resíduos	24	51,800	2,158		
Total	35	13996,100			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Poder calorífico Superior

A-13. Análise de variância para o poder calorífico superior (PCS).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,039	0,039	0,910	0,351
Dose (D)	1	0,081	0,081	1,880	0,183
Biomassa (B)	2	70,670	35,335	817,510	0,001*
E x D	1	0,121	0,121	2,800	0,107
E x B	2	0,278	0,139	3,210	0,058
D x B	2	0,027	0,013	0,310	0,735
E x D x B	2	0,542	0,271	6,270	0,006*
Resíduos	24	1,037	0,043		
Total	35	72,795			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Densidade básica e energética

A-14. Análise de variância para densidade básica da madeira com casca.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	635,2	635,2	2,85	0,117
Dose (D)	1	831,9	831,9	3,74	0,077
E x D	1	11,6	11,6	0,05	0,823
Resíduos	12	2670,5	222,5		
Total	15	4149,3			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-15. Análise de variância para densidade energética da madeira com casca.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,4935	0,4935	6,122	0,029*
Dose (D)	1	0,4456	0,4456	5,528	0,037*
E x D	1	0,0431	0,0431	0,534	0,479
Resíduos	12	0,9673	0,0806		
Total	15	1,9495			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Massa seca

A-16. Análise de variância para massa seca por biomassa em kg.árvore⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	35,103	35,103	106,24	0,0001*
Dose (D)	1	37,771	37,771	114,31	0,0001*
Biomassa (B)	2	514,499	257,249	778,55	0,0001*
E x D	1	2,458	2,458	7,44	0,010*
E x B	2	10,291	5,145	15,57	0,0001*
D x B	2	43,829	21,914	66,32	0,0001*
E x D x B	2	3,609	1,805	5,46	0,008*
Resíduos	36	11,895	0,330		
Total	47	659,453			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-17. Análise de variância para massa seca de por biomassa em t.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	284,94	284,94	130,34	0,0001*
Dose (D)	1	36,7	36,70	16,79	0,0001*
Biomassa (B)	2	5225,52	2612,76	1195,20	0,0001*
E x D	1	17,38	17,38	7,95	0,007*
E x B	2	432,5	216,25	98,92	0,0001*
D x B	2	76,09	38,04	17,40	0,0001*
E x D x B	2	24,77	12,38	5,67	0,006*
Resíduos	48	104,93	2,19		
Total	59	6202,82			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-18. Análise de variância para massa seca total em kg.árvore⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	105,308	105	59,54	0,0001*
Dose (D)	1	113,312	113	64,06	0,0001*
E x D	1	7,373	7	4,17	0,064
Resíduos	12	21,225	2		
Total	15	247,217			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-19. Análise de variância para massa seca total em t.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	854,81	854,8	73,77	0,0001*
Dose (D)	1	110,11	110,1	9,50	0,007*
E x D	1	52,13	52,1	4,50	0,050
Resíduos	16	185,4	11,6		
Total	19	1202,44			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Potencial energético

A-20. Análise de variância para o potencial energético por biomassa em MJ.árvore⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	15424	15424	123,35	0,0001*
Dose (D)	1	13431	13431	107,41	0,0001*
Biomassa (B)	2	174824	87412	699,07	0,0001*
E x D	1	643	643	5,14	0,030*
E x B	2	3373	1686	13,49	0,0001*
D x B	2	16623	8312	66,47	0,0001*
E x D x B	2	1314	657	5,26	0,010*
Resíduos	36	4501	125		
Total	47	230132			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-21. Análise de variância para o potencial energético por biomassa em GJ.hectare⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	p-valor
Espaçamento (E)	1	95317	95317	120,66	0,0001*
Dose (D)	1	15420	15420	19,52	0,0001*
Biomassa (B)	2	1789932	894966	1132,95	0,0001*
E x D	1	5418	5418	6,86	0,012*
E x B	2	145392	72696	92,03	0,0001*
D x B	2	30224	15112	19,13	0,0001*
E x D x B	2	7349	3674	4,65	0,014*
Resíduos	48	37917	790		
Total	59	2126969			

*p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-22. Análise de variância para o potencial energético total em MJ.árvore⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	p-valor
Espaçamento (E)	1	46271	46271	63,47	0,0001*
Dose (D)	1	40292	40292	55,27	0,0001*
E x D	1	1928	1928	2,64	0,130
Resíduos	12	8748	729		
Total	15	97239			

*p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-23. Análise de variância para o potencial energético total em GJ.hectare⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	p-valor
Espaçamento (E)	1	285952	285952	65,97	0,0001*
Dose (D)	1	46259	46259	10,67	0,005*
E x D	1	16255	16255	3,75	0,071
Resíduos	16	69352	4335		
Total	19	417818			

*p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Macro e micronutrientes

A-24. Análise de variância para o nitrogênio (N).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	p-valor
Espaçamento (E)	1	6,650	6,650	28,810	0,0001*
Dose (D)	1	0,730	0,730	3,140	0,089
Biomassa (B)	2	2119,750	1059,870	4594,000	0,0001*
E x D	1	9,700	9,700	42,060	0,0001*
E x B	2	11,400	5,700	24,710	0,0001*
D x B	2	0,270	0,135	0,590	0,563
E x D x B	2	12,540	6,270	27,190	0,0001*
Resíduos	24	5,540	0,231		
Total	35	2166,580			

*p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-25. Análise de variância para o fósforo (P).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,026	0,026	6,26	0,020*
Dose (D)	1	0,007	0,007	1,65	0,211
Biomassa (B)	2	4,048	2,024	492,77	0,0001*
E x D	1	0,001	0,001	0,29	0,594
E x B	2	0,007	0,004	0,88	0,428
D x B	2	0,005	0,003	0,66	0,526
E x D x B	2	0,029	0,015	3,58	0,044*
Resíduos	24	0,099	0,004		
Total	35	4,223			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-26. Análise de variância para o potássio (K).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	13,0803	13,0803	80,22	0,0001*
Dose (D)	1	2,1025	2,1025	12,89	0,001*
Biomassa (B)	2	53,4422	26,7211	163,88	0,0001*
E x D	1	0,0225	0,0225	0,14	0,714
E x B	2	0,2756	0,1378	0,84	0,442
D x B	2	0,4067	0,2033	1,25	0,305
E x D x B	2	0,1067	0,0533	0,33	0,724
Resíduos	24	3,9133	0,1631		
Total	59	2126969			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-27. Análise de variância para o cálcio (Ca).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	6,5025	6,5025	6,81	0,015*
Dose (D)	1	0,2025	0,2025	0,21	0,649
Biomassa (B)	2	35,5939	17,7969	18,65	0,0001*
E x D	1	1,6469	1,6469	1,73	0,201
E x B	2	8,1117	4,0558	4,25	0,026*
D x B	2	2,7517	1,3758	1,44	0,256
E x D x B	2	0,8339	0,4169	0,44	0,651
Resíduos	24	22,9000	0,9542		
Total	35	78,5431			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-28. Análise de variância para o magnésio (Mg).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	0,4669	0,4669	21,55	0,0001*
Dose (D)	1	0,2669	0,2669	12,32	0,002*
Biomassa (B)	2	24,5756	12,2878	567,13	0,0001*
E x D	1	0,3803	0,3803	17,55	0,0001*
E x B	2	0,1089	0,0544	2,51	0,102
D x B	2	0,2689	0,1344	6,21	0,007*
E x D x B	2	0,3622	0,1811	8,36	0,002*
Resíduos	24	0,5200	0,0217		
Total	35	26,9497			

$p\text{-valor} < 0,05$ = significativo a 5% pelo Teste F.

A-29. Análise de variância para o enxofre (S).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	0,0061	0,0061	1,48	0,235
Dose (D)	1	0,0010	0,0010	0,24	0,625
Biomassa (B)	2	1,2771	0,6386	154,56	0,0001*
E x D	1	0,0001	0,0001	0,01	0,914
E x B	2	0,0027	0,0013	0,33	0,725
D x B	2	0,0103	0,0052	1,25	0,305
E x D x B	2	0,0068	0,0034	0,82	0,452
Resíduos	24	0,0992	0,0041		
Total	35	1,4032			

$p\text{-valor} < 0,05$ = significativo a 5% pelo Teste F.

A-30. Análise de variância para o boro (B).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	55,90	55,90	16,62	0,0001*
Dose (D)	1	16,91	16,91	5,03	0,034*
Biomassa (B)	2	8645,39	4322,70	1285,10	0,0001*
E x D	1	3,98	3,98	1,18	0,288
E x B	2	41,34	20,67	6,14	0,007*
D x B	2	48,22	24,11	7,17	0,004*
E x D x B	2	43,83	21,91	6,51	0,005*
Resíduos	24	80,73	3,36		
Total	35	8936,29			

$p\text{-valor} < 0,05$ = significativo a 5% pelo Teste F.

A-31. Análise de variância para o cobre (Cu).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	7,11	7,11	6,92	0,015*
Dose (D)	1	0,00	0,00	0,00	1,000
Biomassa (B)	2	2,17	1,08	1,05	0,364
E x D	1	9,00	9,00	8,76	0,007*
E x B	2	4,39	2,19	2,14	0,140
D x B	2	1,50	0,75	0,73	0,492
E x D x B	2	8,17	4,08	3,97	0,032*
Resíduos	24	24,67	1,03		
Total	35	57,00			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-32. Análise de variância para o ferro (Fe).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	3823	3823	11,05	0,003*
Dose (D)	1	251	251	0,72	0,403*
Biomassa (B)	2	152484	76242	220,37	0,0001*
E x D	1	182	182	0,53	0,475
E x B	2	6149	3075	8,89	0,001*
D x B	2	1309	655	1,89	0,173
E x D x B	2	1056	528	1,53	0,238
Resíduos	24	8303	346		
Total	35	173558			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-33. Análise de variância para o manganês (Mn).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	1863,4	1863,4	2,50	0,127
Dose (D)	1	2686,7	2686,7	3,61	0,069
Biomassa (B)	2	40203,7	20101,9	27,01	0,0001*
E x D	1	14360,0	14360,0	19,30	0,0001*
E x B	2	4700,4	2350,2	3,16	0,061
D x B	2	1852,4	926,2	1,24	0,306
E x D x B	2	1533,7	766,9	1,03	0,372
Resíduos	24	17858,7	744,1		
Total	35	85059,0			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-34. Análise de variância para o zinco (Zn).

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	14,694	14,694	8,67	0,007*
Dose (D)	1	30,250	30,250	17,85	0,0001*
Biomassa (B)	2	84,667	42,333	24,98	0,0001*
E x D	1	0,250	0,250	0,15	0,704
E x B	2	2,889	1,444	0,85	0,439
D x B	2	0,667	0,333	0,20	0,823
E x D x B	2	10,667	5,333	3,15	0,061
Resíduos	24	40,667	1,694		
Total	35	184,750			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

Exportação de nutrientes

A-35. Análise de variância para a exportação de nitrogênio (N) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	873,3	873,3	33,70	0,0001*
Dose (D)	1	721,8	721,8	27,85	0,0001*
Biomassa (B)	2	34976,1	17488,1	674,92	0,0001*
E x D	1	70,6	70,6	2,73	0,105
E x B	2	1035,8	517,9	19,99	0,0001*
D x B	2	465,1	232,6	8,97	0,0001*
E x D x B	2	62,5	31,3	1,21	0,308
Resíduos	48	1243,7	25,9		
Total	59	39448,9			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-36. Análise de variância para a exportação de fósforo (P) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	13,160	13,160	113,45	0,0001*
Dose (D)	1	3,800	3,800	32,76	0,0001*
Biomassa (B)	2	76,464	38,232	329,59	0,0001*
E x D	1	0,038	0,038	0,32	0,572
E x B	2	15,994	7,997	68,94	0,0001*
D x B	2	1,100	0,550	4,74	0,013*
E x D x B	2	0,217	0,109	0,94	0,399
Resíduos	48	5,568	0,116		
Total	59	116,342			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-37. Análise de variância para a exportação de potássio (K) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	9460,2	9460,2	400,48	0,0001*
Dose (D)	1	1258,6	1258,6	53,28	0,0001*
Biomassa (B)	2	39882,2	19941,1	844,18	0,0001*
E x D	1	0,0	0,0	0,00	0,979
E x B	2	9897,4	4948,7	209,50	0,0001*
D x B	2	1309,5	654,8	27,72	0,0001*
E x D x B	2	97,3	48,6	2,06	0,139
Resíduos	48	1133,9	23,6		
Total	59	63039,0			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-38. Análise de variância para a exportação de cálcio (Ca) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	6880	6880	117,75	0,0001*
Dose (D)	1	1632	1632	27,93	0,0001*
Biomassa (B)	2	105199	52599	900,25	0,0001*
E x D	1	16	16	0,28	0,602
E x B	2	16731	8366	143,18	0,0001*
D x B	2	4419	2210	37,82	0,0001*
E x D x B	2	450	225	3,85	0,028*
Resíduos	48	2805	58		
Total	59	138132			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-39. Análise de variância para a exportação de magnésio (Mg) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	9,84	9,84	7,99	0,007*
Dose (D)	1	0,50	0,50	0,41	0,525
Biomassa (B)	2	938,74	469,37	381,09	0,0001*
E x D	1	34,81	34,81	28,26	0,0001*
E x B	2	149,43	74,72	60,66	0,0001*
D x B	2	13,46	6,73	5,46	0,007*
E x D x B	2	7,46	3,73	3,03	0,058
Resíduos	48	59,12	1,23		
Total	59	1213,36			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-40. Análise de variância para a exportação de enxofre (S) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	269,66	269,66	134,16	0,0001 [*]
Dose (D)	1	34,05	34,05	16,94	0,0001 [*]
Biomassa (B)	2	4207,12	2103,56	1046,55	0,0001 [*]
E x D	1	10,25	10,25	5,10	0,029 [*]
E x B	2	406,13	203,06	101,03	0,0001 [*]
D x B	2	55,48	27,74	13,80	0,0001 [*]
E x D x B	2	15,67	7,83	3,90	0,027 [*]
Resíduos	48	96,48	2,01		
Total	59	5094,84			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-41. Análise de variância para a exportação de boro (B) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,0482	0,0482	34,00	0,0001 [*]
Dose (D)	1	0,0135	0,0135	9,53	0,003 [*]
Biomassa (B)	2	0,2583	0,1292	91,18	0,0001 [*]
E x D	1	0,0002	0,0002	0,12	0,733
E x B	2	0,0343	0,0172	12,12	0,0001 [*]
D x B	2	0,0250	0,0125	8,82	0,001 [*]
E x D x B	2	0,0023	0,0012	0,82	0,445
Resíduos	48	0,0680	0,0014		
Total	59	0,4498			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-42. Análise de variância para a exportação de cobre (Cu) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,0002	0,0002	1,00	0,322
Dose (D)	1	0,0002	0,0002	1,00	0,322
Biomassa (B)	2	0,1470	0,0735	441,00	0,0001 [*]
E x D	1	0,0002	0,0002	1,00	0,322
E x B	2	0,0003	0,0002	1,00	0,375
D x B	2	0,0003	0,0002	1,00	0,375
E x D x B	2	0,0003	0,0002	1,00	0,375
Resíduos	48	0,0080	0,0002		
Total	59	0,1565			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-43. Análise de variância para a exportação de ferro (Fe) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	1,768	1,768	135,15	0,0001*
Dose (D)	1	0,434	0,434	33,13	0,0001*
Biomassa (B)	2	13,946	6,973	532,98	0,0001*
E x D	1	0,060	0,060	4,60	0,037*
E x B	2	0,996	0,498	38,08	0,0001*
D x B	2	0,481	0,241	18,38	0,0001*
E x D x B	2	0,296	0,148	11,32	0,0001*
Resíduos	48	0,628	0,013		
Total	59	18,610			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-44. Análise de variância para a exportação de manganês (Mn) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	2,282	2,282	143,34	0,0001*
Dose (D)	1	2,948	2,948	185,23	0,0001*
Biomassa (B)	2	19,140	9,570	601,27	0,0001*
E x D	1	1,908	1,908	119,88	0,0001*
E x B	2	6,247	3,124	196,24	0,0001*
D x B	2	4,090	2,045	128,49	0,0001*
E x D x B	2	1,122	0,561	35,26	0,0001*
Resíduos	48	0,764	0,016		
Total	59	38,502			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-45. Análise de variância para a exportação de zinco (Zn) por biomassa em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,0042	0,0042	4,55	0,038*
Dose (D)	1	0,0082	0,0082	8,91	0,004*
Biomassa (B)	2	0,3523	0,1762	192,18	0,0001*
E x D	1	0,0002	0,0002	0,18	0,672
E x B	2	0,0163	0,0082	8,91	0,001*
D x B	2	0,0043	0,0022	2,36	0,105
E x D x B	2	0,0123	0,0062	6,73	0,003*
Resíduos	48	0,0440	0,0009		
Total	59	0,4418			

p-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-46. Análise de variância para a exportação de nitrogênio (N) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	2625,1	2625,1	16,86	0,001*
Dose (D)	1	2159,5	2159,5	13,87	0,002*
E x D	1	214,6	214,6	1,38	0,257*
Resíduos	16	2490,5	155,7		
Total	19	7489,7			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-47. Análise de variância para a exportação de fósforo (P) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	40,47	40,47	47,18	0,0001*
Dose (D)	1	11,52	11,52	13,43	0,002*
E x D	1	0,10	0,10	0,12	0,739
Resíduos	16	13,72	0,86		
Total	19	65,81			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-48. Análise de variância para a exportação de potássio (K) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	28352	28352	193	0,0001*
Dose (D)	1	3768	3768	26	0,0001*
E x D	1	0	0	0	0,986
Resíduos	16	2355	147		
Total	19	34475			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-49. Análise de variância para a exportação de cálcio (Ca) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	20652,2	20652,2	57,32	0,0001*
Dose (D)	1	4894,5	4894,5	13,58	0,002*
E x D	1	48,6	48,6	0,13	0,718
Resíduos	16	5765,1	360,3		
Total	19	31360,4			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-50. Análise de variância para a exportação de magnésio (Mg) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	29,819	29,819	3,26	0,090
Dose (D)	1	1,427	1,427	0,16	0,698
E x D	1	103,568	103,568	11,34	0,004*
Resíduos	16	146,144	9,134		
Total	19	281,0			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-51. Análise de variância para a exportação de enxofre (S) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	809,870	809,870	70,23	0,0001*
Dose (D)	1	102,110	102,110	8,86	0,009*
E x D	1	29,710	29,710	2,58	0,128
Resíduos	16	184,500	11,531		
Total	19	1126,190			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-52. Análise de variância para a exportação de boro (B) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,070	0,070	38,400	0,0001*
Dose (D)	1	0,017	0,017	9,270	0,008*
E x D	1	0,001	0,001	0,510	0,484
Resíduos	16	0,029	0,002		
Total	19	0,118			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-53. Análise de variância para a exportação de cobre (Cu) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	0,002	0,002	7,25	0,016*
Dose (D)	1	0,007	0,007	20,47	0,0001*
E x D	1	0,004	0,004	12,48	0,003*
Resíduos	16	0,005	0,000		
Total	19	0,018			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-54. Análise de variância para a exportação de ferro (Fe) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	5,079	5,079	54,03	0,0001*
Dose (D)	1	1,166	1,166	12,40	0,003*
E x D	1	0,188	0,188	2,00	0,177
Resíduos	16	1,504	0,094		
Total	19	7,937			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.A-55. Análise de variância para a exportação de manganês (Mn) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	6,804	6,804	64,10	0,0001*
Dose (D)	1	8,361	8,361	78,78	0,0001*
E x D	1	5,513	5,513	51,94	0,0001*
Resíduos	16	1,698	0,106		
Total	19	22,376			

**p*-valor < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.

A-56. Análise de variância para a exportação de zinco (Zn) total em kg.ha⁻¹.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p-valor</i>
Espaçamento (E)	1	0,0148	0,0148	16,94	0,001*
Dose (D)	1	0,0006	0,0006	0,69	0,420
E x D	1	0,0004	0,0004	0,41	0,531
Resíduos	16	0,0140	0,0009		
Total	19	0,0298			

**p-valor* < 0,05 = significativo a 5% pelo Teste F.