



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANA CAROLINA LOPES AMARAL COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE TOCOS E RAÍZES DE
CLONES DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS**

**Botucatu
2019**

ANA CAROLINA LOPES AMARAL COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE TOCOS E RAÍZES DE
CLONES DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador (a): Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

Botucatu

2019

C837c

Costa, Ana Carolina Lopes Amaral

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA
DE TOCOS E RAÍZES DE CLONES DE EUCALIPTO PARA
FINS ENERGÉTICOS / Ana Carolina Lopes Amaral Costa. --
Botucatu, 2019

79 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

1. Eucalyptus sp.; propriedades físicas e químicas; combustão
direta; potencial energético.. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor (a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE TOCOS E RAÍZES DE CLONES DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS”**

AUTORA: ANA CAROLINA LOPES AMARAL COSTA

ORIENTADOR: SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu


Prof^ª. Dr^ª. IVANA CESARINO

Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP - Botucatu


Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA

Física e Biofísica / IBB - Centro de Isótopos Estáveis - UNESP - Câmpus de Botucatu

Botucatu, 24 de setembro de 2019.

DEDICATÓRIA

A Deus;

Aos meus pais Alcides e Vânia e irmãos Ariella, Gabriel,

Alícia e Jô por todo amor e carinho.

E a meus avós e minha segunda mãe, Tia Solange.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me capacitado para realização desse trabalho, pelas bênçãos concedidas, por estar sempre ao meu lado, por muitas vezes me carregar no colo, por ser meu amigo, meu mestre, meu tudo! A Ele agradeço por tudo que tenho e tudo que sou.

Aos meu pais Alcides e Vânia que de maneira inigualável sempre me apoiaram, de todas as formas possíveis, para que eu chegasse onde estou. Pela educação, e pela família maravilhosa que construímos.

Aos meus irmãos Ariella, Gabriel, Alícia e Jô pelo companheirismo, por sempre me incentivarem e me darem força para não desistir.

A minha segunda mãe Solange, que eu amo sem explicação em que sempre estive ao meu lado me apoiando em todas as minhas escolhas.

Aos meus avós por estarem comigo dentro do meu coração.

Ao meu cunhado Bruno (Zeca Urubu) pela parceria de sempre.

Aos meus tios Romeu e Valéria, que eu tenho um amor enorme e que me incentivaram sempre.

Ao meu orientador, Professor Saulo Philipe Sebastião Guerra por toda orientação, apoio, cuidado de pai que sempre teve comigo, amizade e conhecimentos transmitidos para a realização deste trabalho ao longo desses anos.

As amigades que com a FCA/UNESP tive a oportunidade de construir (Júlia (Pererão), Bruna (Passada), Júlia (São Marcos), Bia, Murilo (Mongol), Renan (Manja), que levarei para o resto da vida.

Ao Humberto (Jamico), que com toda paciência e amizade sempre que eu precisei, me ajudou e auxiliou dès do meu primeiro projeto no LABB.

Ao Manu, sempre disposto a ajudar e desenvolver coisas para facilitar nossa vida no laboratório.

Aos amigos do LABB (Carla (painel), André (Magal), Raoni, Rafael (Lobinho), Bruninho, Fabiana (Bambu), Mari (Tapiá), André (Mini Pink), Samara (Xave), João, Ronaldo, Augusto (Liberato), entre tantos outros que por ali passaram).

Aos Professores e funcionários do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia, por todo apoio prestado; em especial aos Funcionários Marcos e Mário e Mariano por todo carinho e ajuda.

Ao Eduardo Biral por todo incentivo, força e amizade.

À pós-graduação da FCA/UNESP, em especial a Débora por todo auxílio e companheirismo.

Ao Prof. Paulo Roberto de Lima Meirelles, do Departamento de Melhoramento e Nutrição Animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia - FMVZ - UNESP –Botucatu, Fazenda Lageado. Por disponibilizar o Laboratório de Bromatologia para realização das análises de poder calorífico.

Ao Prof. José Raimundo de Souza Passos, do Departamento de Bioestatística, pelo suporte estatístico.

A José Cavalcante, funcionário do Departamento de Química e Bioquímica e técnico do laboratório de Química Analítica e Eletroforese, por toda ajuda na realização das análises.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Os meus sinceros agradecimentos a todos que acreditaram em mim e neste trabalho e que me ajudaram de alguma forma, direta ou indiretamente.

Meu muito obrigada!!

“A melhor maneira que o homem dispõe para se aperfeiçoar, é aproximar-se de Deus. ”

(Pitágoras)

RESUMO

A utilização da biomassa vegetal está se apresentando como uma alternativa viável para a sustentabilidade energética das futuras gerações. Apesar dessa crescente necessidade de fontes renováveis, são poucos os trabalhos que caracterizam a viabilidade dos tocos para fornecimento de energia. O tema tocos é inovador e, por isso, existem poucos relatos, na literatura nacional, sobre este assunto. O objetivo principal da pesquisa foi realizar a caracterização físico-química de tocos de florestas plantadas de eucalipto, avaliando os efeitos de clone e tempo de estocagem, contribuindo, assim, no conhecimento que envolve a conversão da biomassa florestal em energia. Para isso, foram utilizadas as espécies de tocos de eucalipto, *Eucalyptus grandis* × *camaldulensis*, *Eucalyptus urophylla* × *grandis*, e *Eucalyptus grandis*. A biomassa foi coletada com tempo de estocagem de 0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 dias. As análises realizadas foram: análise imediata, análise elementar, poder calorífico, densidade básica, cloro e umidade. O trabalho foi desenvolvido em um experimento inteiramente casualizado e considerou-se um esquema fatorial (3 x 7) com dois fatores, 3 clones e 7 tempos. Foram realizados modelos lineares generalizados e quando apresentada diferença significativa, foi realizado o teste TUKEY-KRAMER para a comparação entre as médias. O fator tempo não apresentou diferença significativa em nenhuma das variáveis analisadas. A densidade básica da madeira e o poder calorífico superior não apresentaram diferença quando comparados os fatores tempo e clone. O teor de cinzas, teor de voláteis, carbono fixo e umidade apresentaram diferença entre todos os clones. As demais variáveis (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cloro) também apresentaram diferença significativa a 5 % de significância para a produção de biomassa e para produção de energia. Nas condições analisadas, os clones de eucalipto estudados foram considerados biocombustíveis renováveis e apresentaram grande potencial energético.

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

ABSTRACT

The use of plant biomass is a viable alternative for the sustainability of future generations. Firstly, there are renewable energy sources, these are the jobs that characterize the viability of the stumps for energy supply. The theme is very innovative, however, we must consider the existence of some reports in the national literature on this subject. The main objective of the research is to perform a physical-chemical analysis of stumps of eucalyptus planted plants, evaluating the effects of the clone and the time of storage. Thus contributing, no knowledge that involves the emission of the forest biomass in energy. The species *Eucalyptus*, *Eucalyptus grandis* × *camaldulensis*, *Eucalyptus urophylla* × *grandis*, and *Eucalyptus grandis* were studied. The biomass was collected with storage time of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days. They were analyzed (immediate analysis, elemental analysis, calorific value, basic measurement, chlorine and humidity). The work was developed in a completely randomized experiment and considered a factorial scheme (3 x 7) with two factors, 3 clones and 7 times, generalized linear models were performed and when it made the difference, the TUKEY-KRAMER test was performed for a comparison between averages. At present, the ability to analyze is not determined. The basic magazine of wood and calorific power superior non-frequent when compared to the behaviors time and clone. The ash content, the volatile content, the fixed carbon and the difference between all the clones. Hyphloria, hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur and chlorine are also significantly different for a 5 % probability of biomass production and for energy production. The analyzed conditions, the studied eucalyptus clones can be considered with a renewable biofuel and have a great energetic potential.

Keywords: *Eucalyptus* sp., Physical and chemical properties, direct combustion, energy potential.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desenvolvimento anual da geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em GWh.....	26
Tabela 2 - Composição elementar para diversas fontes energéticas de biomassa..	35
Tabela 3 - Composição imediata para diversas fontes energéticas de biomassa	36
Tabela 4 - Densidade básica da madeira de algumas espécies de eucaliptos	38
Tabela 5 - Poder calorífico superior (PCS) para diversas fontes energéticas de biomassa	39
Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da biomassa florestal para análise estatística.....	50
Tabela 7 - Valores médios da análise elementar da biomassa de toco de eucalipto	54
Tabela 8 - Valores médios do teor de cloro da biomassa de toco de eucalipto.....	56
Tabela 9 - Valores médios da análise imediata da biomassa de toco de eucalipto..	60
Tabela 10 - Valores médios da umidade base úmida da biomassa de toco de eucalipto	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais processos de conversão da biomassa com fins energéticos .	26
Figura 2 - Classificação de combustíveis de origem madeireira	27
Figura 3 - Tocos e raízes florestais	32
Figura 4 - Separação da amostra para análise laboratorial	41
Figura 5 – I - Moagem e classificação das amostras no moinho tipo Willey; II - Agitador de peneiras; III - Granulometria das amostras.....	41
Figura 6 - Cromatógrafo de íons. I – Amostrador automático; II – Cromatógrafo de íons utilizado para determinação do Cloro; III – Módulo do equipamento	43
Figura 7 - Análise imediata. I - Resíduos após queima de material volátil; II - Cinzas residuais	44
Figura 8 - Forno mufla utilizado para análise imediata.....	45
Figura 9 - Calorímetro utilizado para determinação do PCS.....	47
Figura 10 - Painel de controle do calorímetro	47
Figura 11 - Preparação da análise do PCS. I - Detalhe da amostra preparada no suporte do frasco de decomposição; II- Frasco de decomposição sendo posicionado para o ensaio.....	48
Figura 12 - Densidade básica dos cavacos. I - Material após saturação pronto para ensaio; II e III - Esquema da balança hidrostática	49
Figura 13 - Resultado médio do teor de carbono em função do tempo	51
Figura 14 - Resultado médio do teor de hidrogênio em função do tempo	52
Figura 15 - Resultado médio do teor de oxigênio em função do tempo	52
Figura 16 - Resultado médio do teor de nitrogênio em função do tempo	53
Figura 17 - Resultado médio do teor de enxofre em função do tempo	53
Figura 18 - Resultado médio do teor de cloro em função do tempo	55
Figura 19 - Resultado médio do teor de cinzas em função do tempo	57
Figura 20 - Resultado médio do teor de voláteis em função do tempo	58
Figura 21 - Resultado médio do teor de carbono fixo em função do tempo.....	59
Figura 22 - Resultado médio do poder calorífico em função do tempo	61
Figura 23 - Resultado médio da densidade básica em função do tempo	62
Figura 24 - Resultado médio da umidade base úmida em função do tempo	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Biomassa	26
2.2	Biomassa para fins energéticos	25
2.3	Biomassa florestal	27
2.3.1	O gênero <i>Eucalyptus</i> no Brasil	27
2.3.2	Aproveitamento de tocos e raízes	32
2.3.3	Composição química elementar	34
2.3.4	Teor de Cloro	35
2.3.5	Composição imediata	36
2.3.6	Densidade básica da madeira	37
2.3.7	Poder calorífico.....	38
3	OBJETIVO	40
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4.1	Material	40
4.2	Preparo das amostras	40
4.3	Análise elementar.....	41
4.3.1	Análise de Cloro	42
4.3.2	Análise imediata	44
4.3.3	Poder calorífico superior.....	46
4.3.4	Densidade básica.....	48
4.3.5	Análises estatísticas	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Caracterização física e química	51
5.1.1	Composição química elementar	51
5.1.2	Teor de cloro	55
5.1.2	Composição química imediata	56
5.1.3	Poder Calorífico.....	60
5.1.4	Densidade Básica.....	61

5.1.5 Unidade Básica.....	62
6 CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é baseada no consumo de combustíveis fósseis e, estes, por sua vez, vêm apresentando problemas de ordem social, ambiental e econômica. Com a diminuição da oferta de combustíveis fósseis e aumento do preço da energia, é necessário que as fontes alternativas tenham a capacidade de suprir o déficit energético (BRITO, 2007).

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, relatando o potencial da biomassa, inclusive da madeira, para geração de energia limpa (MOREIRA, 2011).

Pode-se considerar fundamental o usufruto energético da biomassa para a evolução humana, sendo que seu próprio meio de obtenção e utilização se desenvolveram conjuntamente, desde a lenha usada para cocção e aquecimento, até as modernas práticas de produção silvo-agropecuárias e industriais, de uso de biocombustíveis para geração de força motriz, calor e eletricidade (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016).

O Brasil encontra-se em uma posição relativamente privilegiada em comparação aos demais países, devido à predominância de fontes renováveis na matriz de produção de energia elétrica (SERATTO, 2010).

O país dispõe atualmente de uma matriz de produção elétrica de origem predominantemente renovável, onde a fonte hídrica se destaca com participação de 64,8 % da oferta interna, as fontes de biomassa com 8,8 %, eólica com 7,5 %, solar com 0,6 % e as fontes não renováveis com 18,3 %, conforme dados de fevereiro de 2018 (ANEEL, 2018).

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 da madeira, esse processo é largamente usado em muitas partes do mundo (DERMIBAS et al., 2009).

No panorama mundial, o Brasil se destaca pela grande disponibilidade de recursos naturais, como a extensão territorial, abundância hídrica e de radiação solar, que permitem uma alta taxa de crescimento e elevada produtividade nas florestas plantadas. Em 2017, a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou

7,84 milhões de hectares, com crescimento de 0,5 % em relação ao ano de 2016, devido, exclusivamente, ao aumento das áreas com eucalipto. As áreas com *Pinus* e outros gêneros permaneceram inalteradas no período. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24 %), São Paulo (17 %) e no Mato Grosso do Sul (15 %) (IBÁ, 2017).

Brito e Cintra (2004) afirmaram que o uso da biomassa florestal para fins energéticos no Brasil tende a ser predominante ao longo dos próximos anos. Os projetos de biomassa florestal para energia podem gerar créditos de carbono, benefícios econômicos e sociais para comunidades rurais, aproveitamento de resíduos florestais, atuando positivamente no uso sustentável da floresta (AEBIOM, 2012). Eles também atuam como uma ferramenta de estratégia pública, uma vez que a floresta pode ser manejada e estocada ao longo dos anos para uso futuro.

Para que o Brasil possa aumentar o uso da lenha e produtos da madeira na sua matriz energética, são necessárias melhorias tanto na silvicultura como na conversão da madeira em energia, aumentando, desta forma, o potencial energético dos plantios florestais (MOREIRA, 2011).

A partir do entendimento de que é necessário reduzir ou eliminar os impactos ambientais negativos dos processos e produtos de diversos setores, aliando isso à melhoria social e econômica, a biomassa passou a ser considerada uma fonte potencial de matéria-prima industrial para fins energéticos, químicos, alimentares, farmacêuticos, de materiais, entre outros (VAZ JÚNIOR, 2015).

Dentre as fontes de biomassa, destaca-se aquela proveniente de plantações florestais. Estas ocupam uma área de 7,8 milhões de hectares, sendo 72,7 % desse total ocupadas por espécies de eucalipto (IBÁ, 2017). A produtividade média da floresta de eucalipto é próxima de $25 \text{ Mg}^{-1} \text{ ha ano}^{-1}$ (BINKLEY et al., 2017).

O conhecimento da quantidade e qualidade da biomassa florestal possibilita a realização de avaliações e recomendações para o manejo sustentável nos diferentes ecossistemas. As estimativas de biomassa florestal constituem em informações imprescindíveis para diversos fins, entre os quais, destacam-se a análise de produção e produtividade dos povoamentos, conversão da madeira em energia ou outros produtos, ciclagem e balanço de nutrientes no solo e estudos de absorção e fixação de carbono. Além do fuste da árvore, em muitas situações, também, passou-se a

utilizar a biomassa dos resíduos da colheita florestal, principalmente para fins energéticos (SALVADOR et al., 2016; SMYTH et al., 2017).

São considerados como resíduos florestais da colheita todos aqueles materiais resultantes da exploração da floresta e que não tem utilização definida, tais como casca, galhos, folhas, ponteiro, árvores muito finas, doentes ou mortas, assim como tocos e raízes (SOUZA, 2010; EUFRADE-JUNIOR et al., 2016, SCHEPASCHENKO et al., 2017, CASSELLI et al., 2018).

A biomassa dos resíduos florestais pode ser utilizada em diferentes vias de aproveitamento para geração de energia. Poucos autores têm reportado o uso de tocos e raízes como fontes alternativas de energia renovável frente aos combustíveis fósseis (HYVÖNEN et al., 2016; ORTIZ et al., 2016).

O aproveitamento de tocos e raízes é inovador e, por isso, existem poucos relatos, na literatura nacional, sobre este assunto.

Os tocos e raízes de plantio florestais, sejam do gênero *Pinus* ou *Eucalyptus*, trazem ao setor florestal uma excelente oportunidade de geração de energia e possível aumento da viabilidade econômica de empreendimentos, principalmente se esta matéria prima for considerada resíduo de um plantio florestal. Pode-se agregar ainda mais quando observado que o aproveitamento dos tocos e raízes proporciona a limpeza de área para renovação dos plantios, facilitando as operações da silvicultura e trazendo benefícios econômicos (BRITO, 2019).

Para tanto, é imprescindível a caracterização dos tocos e raízes, que tem sido realizada pela determinação das propriedades físico-químicas (MOERS et al., 2011).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi realizar a caracterização físico-química de tocos e raízes de clones de eucaliptos, avaliando os efeitos de tempo de estocagem em até 90 dias, para fins energéticos, contribuindo, assim, no conhecimento que envolve a conversão da biomassa florestal em energia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

Quando se trata de biomassa, podemos pensar em diferentes conceitos – porém conectados entre si - que variam de acordo com o ponto de vista utilizado (geração de energia ou ecologia). Sob o ponto de vista da ecologia, biomassa é “a quantidade de matéria viva em forma de uma ou mais espécies de organismos, presente em determinado habitat” (MICHAELIS, 2010).

De acordo com a Diretiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu, biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e urbanos”.

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, hemicelulose e lignina. Posteriormente, este termo abrange uma gama de materiais orgânicos que incluem também os animais que se alimentam dos vegetais. Desta forma, são considerados biomassa: os resíduos de culturas agrícolas, os resíduos florestais e de processamento da madeira, as plantas cultivadas para fins energéticos e florestas de curta rotação, os resíduos animais, incluindo esgotos humanos, os resíduos sólidos e resíduos de processamento de alimentos (IEA, 2007).

Do ponto de vista energético, o conceito é amplo e abrange qualquer recurso renovável proveniente de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Como consequência, as fontes de biomassa que podem ser utilizadas para geração de energia elétrica são variadas, como por exemplo: lenha; resíduos agrícolas, industriais ou de parques e jardins; e culturas energéticas dedicadas, que são plantações de florestas ou gramíneas destinadas especificamente para esse fim (MAZZARELLA, 2007). A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB, 2012) complementa o conceito de fontes de energia renováveis dizendo que “fontes de energia não fósseis renováveis (energia eólica, solar, geotérmica, das ondas, das marés, hidráulica, de

biomassa, de gases dos aterros, de gases das instalações de tratamento de lixo e do biogás)”.

Portanto, as vantagens da utilização da biomassa são expressivas e devem ser consideradas. Dentre elas estão o baixo custo de produção (quando se trata de resíduos), o fato de ser uma fonte renovável, e a obtenção de balanço nulo de emissões de dióxido de carbono (FONTOURA, 2011).

2.2 Biomassa para fins energéticos

A biomassa voltada para fins energéticos destaca-se como uma das fontes renováveis com maior possibilidade em todos os aspectos (lenha, resíduos agrícolas, industriais ou de parques e jardins que são plantações de florestas ou gramíneas) e é destinada, em especial, à utilização para geração de energia elétrica (MME, 2007).

O crescimento da participação da biomassa na matriz energética brasileira tem sido constante nos últimos anos, o que pode ser observado no Balanço Energético Nacional de 2017 publicado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, no qual consta um crescimento na oferta interna de energia elétrica proveniente de biomassa de 28,4 terawatt-hora (TWh) para 29,6 TWh, perfazendo um aumento de 6 %. É importante ressaltar que esse crescimento ocorre, principalmente, na forma de sistemas de cogeração (nos quais é possível obter energia térmica e elétrica), ou seja, em sistemas de produção de energia que são instalados em unidades que inicialmente não possuíam como finalidade a comercialização de energia elétrica (EPE, 2017).

O Brasil é um dos países com maior diversidade de fontes de energia limpa, tendo as energias renováveis uma representatividade de 81,7 % da matriz elétrica brasileira em 2016. Esse fato pode ser comparado à média de geração de energia elétrica renovável de outros países que apresentaram um valor de 21,2 % de representatividade, na matriz, em 2014. Embora originalmente baseada em energia de grandes hidroelétricas, a participação de energia processada de biomassa de cana-de-açúcar, pequenas usinas hidroelétricas e energia eólica vem ganhando destaque nos últimos anos devido à diminuição dos riscos e custos associados aos investimentos e às melhorias nacionais em instalações que conectam essas fontes no grid elétrico (THE WORLD BANK, 2014).

Segundo o estudo do GVces (Centro de estudos em sustentabilidade) (2016), entre os anos de 1990 e 2014 houve uma considerável diversificação na matriz

energética brasileira, com queda da participação da energia hidráulica e lenha e maior representatividade do gás natural, petróleo e outras fontes de energia alternativas. No entanto, mesmo que essa alteração tenha representado uma queda de 18,2 % do uso de energias renováveis na participação global, essas fontes ainda representam 81,7 % da energia elétrica total gerada em 2016 no país, principalmente devido a um crescimento de 563 % no uso de energia eólica e de 42 % de energia de biomassa nos últimos cinco anos (Tabela 1).

Tabela 1 - Desenvolvimento anual da geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em GWh

Fontes de energia	2012	2013	2014	2015	2016	$\Delta\%$ (2015/2016)	Part. % 2016
Total	552.498	570.835	590.479	581.228	578.898	-0,4	100
Gás Natural	46.760	69.003	81.075	79.490	56.485	-28,9	9,8
Hidrelétrica	415.342	390.992	373.439	359.743	380.911	5,9	65,8
Derivados do Petróleo ¹	16.214	22.090	31.668	25.657	12.103	-52,8	2,1
Carvão	8.422	14.801	18.385	18.856	17.001	-9,8	2,9
Nuclear	16.038	15.450	15.378	14.734	15.864	7,7	2,7
Biomassa ²	34.662	39.679	44.733	47.394	49.236	3,9	8,5
Eólica	5.050	6.578	12.210	21.626	33.489	54,9	5,8
Outras ³	10.010	12.241	13.590	13.728	13.808	0,4	2,4

Fonte: EPE (2017) Adaptado pelo Autor

Notas:

¹Inclui óleo diesel e óleo combustível.

² Inclui lenha, bagaço de cana e lixívia.

³ Inclui outras fontes primárias, solar, gás de coqueria e outras secundárias.

Os dados mais recentes do Balanço Energético Nacional (2017), ano-base 2016, publicados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), apontam para uma crescente alta na participação de energias renováveis, com um aumento de 54,9 % na participação de energia eólica. Em termos de oferta, houve queda de 6 % de óleo diesel e um aumento de 9,5 % na oferta de petróleo em relação ao ano anterior, enquanto nota-se um avanço do uso de energias renováveis na eletricidade para 81,7 % de participação no grid elétrico. O consumo, por sua vez, teve um recuo global de 0,4 %.

Tratando-se de políticas públicas atuais a respeito do tema de energias renováveis sendo implementadas, as mais relevantes e que promovem incentivos positivos são as vinculadas às discussões climáticas, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima, publicada em 2008 e atualizada em 2013, a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris,

publicada em 2015, e o documento-base sob consulta da Estratégia Nacional para Implementação da NDC brasileira (BRASIL, 2008; BRASIL, 2013; BRASIL, 2015), além da Renovabio que é uma política de estado que objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis da matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para a mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (BRASIL, 2019).

Assim, considerar a biomassa como alternativa de fonte de energia é algo promissor, uma vez que se trata de uma energia renovável, a qual tem sido cada vez mais almejada pelo Brasil, além de utilizar como “matéria-prima” aquilo que, provavelmente, seria descartado.

2.3 Biomassa florestal

No contexto nacional, apresenta-se o conceito de biomassa energética florestal e industrial como “biocombustíveis provenientes dos recursos florestais e industriais, seus produtos e subprodutos, que incluem basicamente biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas e de florestas nativas, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose, indústria moveleira e serrarias” (ABIB, 2015).

O uso da madeira com fins energéticos é, provavelmente, uma das práticas mais antigas da humanidade, sendo que ainda hoje, dentre todas as possíveis utilizações da biomassa, a geração de energia ainda é uma das mais expressivas. Essa utilização é marcada por três grandes momentos: o primeiro remota ao descobrimento do fogo, que teve um papel decisivo para o desenvolvimento da humanidade; o segundo marcado pela revolução industrial, por meio da qual alterou os padrões de consumo e a dinâmica econômica global da época; e o terceiro, mais recente, marcado pela competição com outras fontes energéticas, principalmente combustíveis fósseis, extremamente competitivos para acompanhar o surto de desenvolvimento das últimas décadas e a intensa demanda por produtos industrializados (BRITO; BARRICHELO, 1979; MIRANDA, 2015).

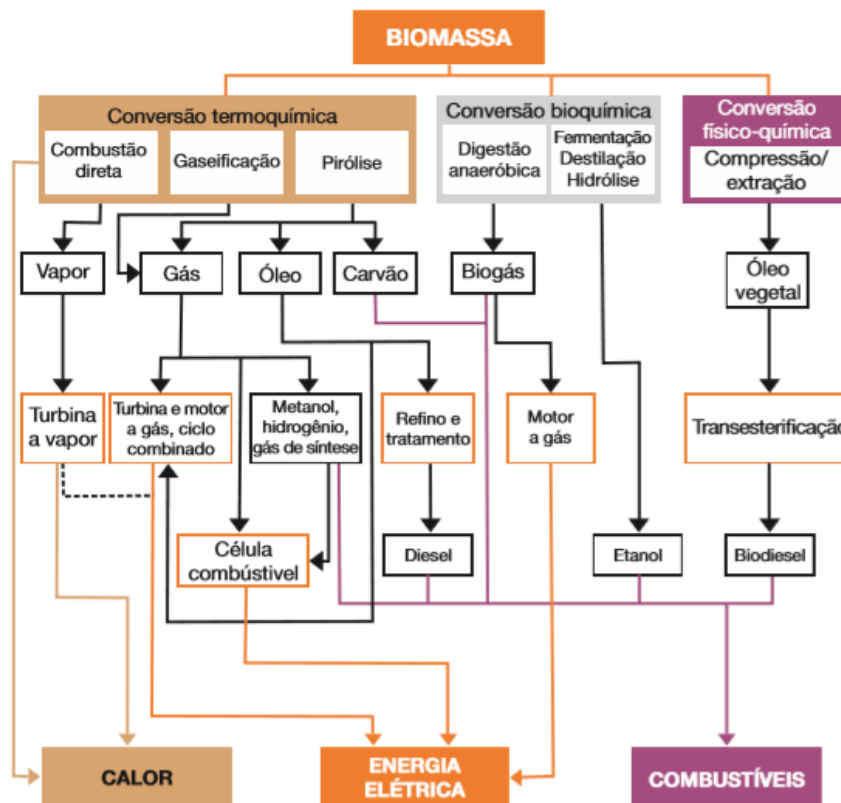
Mesmo diante da competição com fontes energéticas não renováveis, a energia de biomassa florestal é extremamente relevante em alguns países e setores específicos da economia. Isso se dá devido à presença de características que permitem usos mais rústicos, como queima direta da madeira na forma de lenha ou carvão, utilizações atreladas a outros processos industriais, via utilização de resíduos, e ainda processos tecnológicos mais rebuscados, como aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e ácido pirolenhoso (MIRANDA, 2015; SOARES et al., 2006).

Nota-se por meio da literatura que o tema relacionado à produção de energia através da biomassa florestal vem sendo discutido há anos. Segundo Brito e Barrichelo (1979), o Brasil apresenta diversas vantagens competitivas para a utilização de biomassa florestal na produção de energia, entre elas: vocação florestal, derivada das condições edafoclimáticas ideais e extensas áreas de implantação florestal para fins industriais; domínio de tecnologias que permitem o desenvolvimento de florestas de alta produtividade, muito acima inclusive de outros países de tradição florestal; experiência em técnicas especiais para manejo de florestas energéticas; e demanda a diferentes produtos e sub-produtos florestais, fazendo desse um investimento versátil. A Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ ressalta que as florestas energéticas no Brasil têm potencial para suprir usinas termoelétricas de forma competitiva, colaborando com a descentralização do sistema de produção energética, além de trazer a discussão do papel dessas florestas na diminuição da pressão por desmatamento de vegetação nativa (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2016).

A biomassa florestal pode ser obtida e utilizada em três estados: (I) biomassa sólida, derivada de produtos e resíduos sólidos de indústrias agroflorestais ou conexas, como por exemplo lenha, carvão, briquetes e pallets; (II) biomassa líquida, por meio de biocombustíveis, licores e óleos; e (III) biomassa gasosa, por meio de biogás gerado como efluente industrial ou processos de gaseificação. Cada forma é concebida de acordo com processos físico-químicos específicos, como, por exemplo, a torrefação no caso do carvão e a briquetagem no caso do briquete, ou ainda a liquefação para sintetização do líquido pirolenhoso e a gaseificação para conversão de combustíveis sólidos e líquidos em gás energético (ABIB, 2015).

A Figura 1, demonstra os diferentes processos existentes de transformação da biomassa e seus produtos.

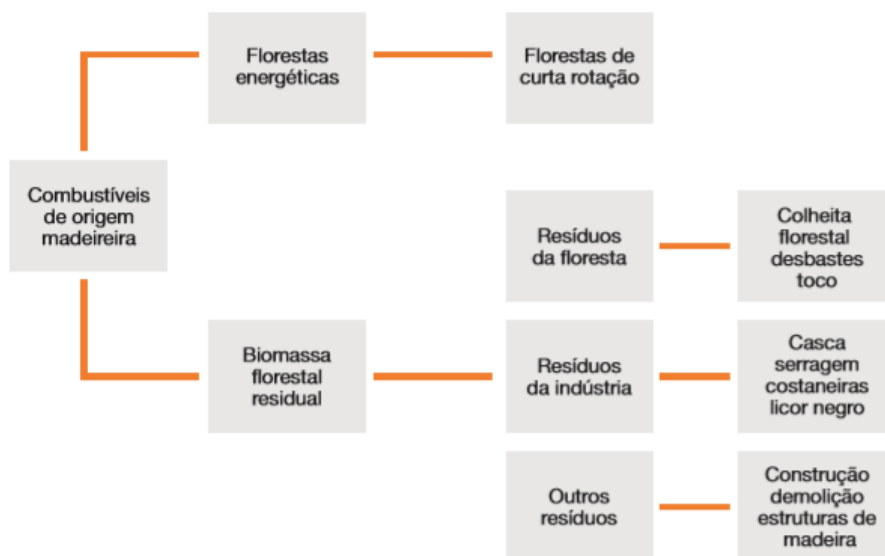
Figura 1 - Principais processos de conversão da biomassa com fins energéticos



Fonte: (FREITAS; HORTA , 2019, p. 46).

Já a Figura 2, mostra, que os combustíveis de origem madeireira podem ser divididos em dois grandes grupos: florestas energéticas e biomassa florestal residual. No primeiro grupo há um manejo específico para obtenção de material para fins energéticos, ao contrário do segundo grupo, onde o aproveitamento energético da biomassa não seria uma prioridade inicial (BERNDES, 2001).

Figura 2 - Classificação de combustíveis de origem madeireira



Fonte: (COSTA et al., 2019, p. 40).

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 para geração de energia são: o eucalipto (*Eucalyptus*), o “willow” (*Salix* sp.) e o “poplar” (*Populus* spp).

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). Por isso, foi a espécie escolhida para ser usada neste trabalho.

2.3.1 O gênero *Eucalyptus* no Brasil

O gênero *Eucalyptus* foi introduzido no Brasil em 1904 por Edmundo Navarro de Andrade, com o intuito de ser utilizado no setor madeireiro, como carvão e

dormentes devido, principalmente, ao seu rápido crescimento (MARTINI, 2004). O gênero contém aproximadamente 900 espécies, as quais são originárias da Austrália, Indonésia e Papua Nova Guiné (BROOKER; KLEINING, 2006).

Pertencente à família das Myrtaceae, que é responsável pela maior parte das espécies plantadas no mundo, por meio do subgênero *Symphyomyrtus*, o qual se divide em nove seções, possuindo entre elas as espécies mais cultivadas, como *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla* e *E. pellita*; Seção Exsertaria: *E. camaldulensis*, *E. exserta* e *E. tereticornis* e Seção Maidenaria: *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. smithii* e *E. nitens* (MORAES, 2013).

O nome científico *Eucalyptus* foi criado por Louis L'Heritier de Brutelle que escolheu o nome de duas palavras gregas “eu” que significa “bem” e “kalypto” que significa “coberto” em alusão aos frutos que protegem as sementes de uma forma bem coberta (SANTOS, 1997).

Os *Eucalyptus* spp. cobrem a maior área dos reflorestamentos no mundo. O grande número de espécies deste gênero, a grande plasticidade ecológica e a sua excelente produção tornaram-no matéria prima de inúmeras indústrias florestais, o que permitiu um rápido avanço no conhecimento silvicultural e tecnológico de muitas espécies (FINGER et al., 1993).

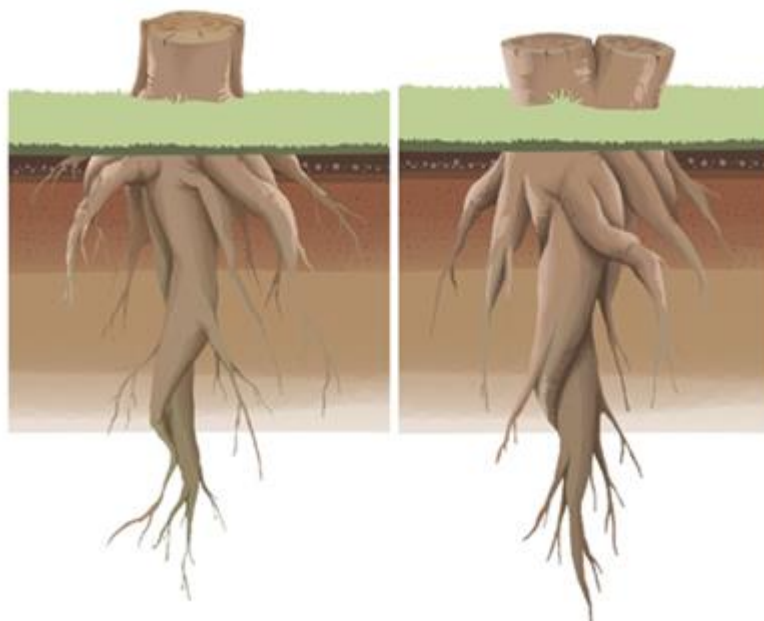
O Brasil apresenta condições extremamente favoráveis de clima e de solo ao plantio do eucalipto, o que lhe confere rápido crescimento, atingindo os mais altos índices de produtividade do mundo. O nível de qualidade alcançado pela tecnologia florestal brasileira se faz materializado pela grande variedade de material genético selecionado que já foi produzido e pelas altas taxas de produtividades observadas em várias regiões do País (QUEIROZ, 2009)

A madeira de eucalipto 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). A utilização da madeira em diferentes segmentos (construção civil, celulose e papel, serraria, chapas e compensados, energia, entre outros) pode ser explicada pela variedade das características tecnológicas das madeiras de diversas espécies de Eucalipto encontradas no Brasil. Portanto, pode-se dizer que o eucalipto é a espécie florestal plantada mais importante do Brasil.

2.3.2 Aproveitamento de tocos e raízes

Uma cepa ou toco nada mais é que um residual do tronco que fica ligeiramente acima do solo e tem continuidade para dentro do solo, com as raízes da planta. Quando uma floresta de eucalipto é bem manejada e colhida de acordo com especificações de altura de toco, sobram cepas que possuem elevações entre 5 a 15 cm acima do solo (FOELKEL, 2014).

Figura 3 - Tocos e raízes florestais



Fonte: (FREITAS et al., 2019, p. 34).

Existem vários benefícios da colheita de tocos e raízes: substituição dos combustíveis fósseis; subsolagem mais efetiva, devido ao fato de não existirem mais tocos e raízes no solo; o aumento da mineralização, o que leva a um melhor crescimento e redução da mortalidade de novas plantas; redução da podridão radicular na próxima rotação, uma vez que a madeira infectada será removida; e, por último, renda extra para o proprietário da floresta (VASAITIS et al., 2008).

Porém, também existem algumas desvantagens: perturbação do solo que pode causar uma redução no estoque de carbono da floresta; aumento da decomposição, além de um possível aumento na erosão; extração e exportação de nutrientes do local; e perda de habitat adequado para o desenvolvimento de fungos, musgos, briófitas e insetos (WALMSLEY; GODBOLD, 2010).

A biomassa, residual ou não, de origem agrícola ou florestal, quando convertida em energia, de forma direta ou processada na forma sólida, líquida ou gasosa passa a ser denominada bioenergia.

A biomassa de origem agrícola ou florestal era, tradicionalmente, utilizada no velho continente, na Suécia e Finlândia, desde o início dos anos de 1600, sendo os tocos e raízes de árvores um dos produtos exportados durante os anos de 1800 (SFA, 2009). Recentemente, a partir dos anos 2000, houve uma retomada do uso desta biomassa florestal em processos de produção de papel na Finlândia (KALLIOLA, 2014).

Berch et al., (2012) descreveram o uso de raízes para geração de energia no Canadá, sendo esses um subproduto da reforma das áreas florestais. Nos Estados Unidos, Zabowski et al., (2008) destacaram a necessidade de realizar o arranquio dos tocos e raízes para controle de pragas - podridão radicular. Outros autores têm reportado o uso de tocos e raízes de árvores como fontes alternativas de energia renovável frente aos combustíveis fósseis e sugerem que sua colheita em larga escala se tornará, em longo prazo, estratégica e rotineira para a bioenergia (HYVÖNEN et al., 2016; ORTIZ et al., 2016).

Na Finlândia, o governo dá subsídios para a colheita dos tocos (WALMSLEY; GODBOLD, 2010), que pode ser o principal motivo para a expansão desse campo. No início dos anos 2000, a Finlândia iniciou a colheita de tocos em larga escala (5000 m³ de cavacos florestais consumidos por plantas de aquecimento e energia); em 2010, foram consumidos 1 milhão de m³ de cavacos em centrais de aquecimento e energia (METLA, 2013).

Na Suécia, a colheita dos tocos ainda não evoluiu do nível piloto. Em 2009, o Swedish Forest Agency concluiu que provavelmente não excederia 10.000 - 20.000 ha (5 - 10%) da área de regeneração anual (SFA, 2009). Vários aspectos afetaram o desenvolvimento um tanto fraco da colheita de tocos na Suécia. O Conselho Sueco de Manejo Florestal (FSC) tem uma grande influência nesse cenário, já que quase toda a colheita da biomassa residual seria realizada por empresas certificadas pelo FSC. De 2011 a 2013, a área colhida na Suécia diminuiu de aproximadamente 1.700 ha para 800 ha, embora até 2.500 ha ano tenham sido permitidas no país. Existem várias razões para esse declínio, o FSC sueco é cauteloso na aprovação das empresas para a colheita dos tocos e isso reduz o interesse das mesmas em realizar tais atividades, uma vez que simplesmente não sabem se isso será permitido. Além

disso, durante os invernos quentes (como em 2013/2014), a demanda por combustíveis florestais diminui, e os tocos são mais caros para a colheita do que outros combustíveis florestais, como os troncos e galhos das árvores (KÅRÉN; MELIN, 2014).

No Brasil, é crescente o interesse pela recuperação da biomassa residual nos últimos anos e isso aumentaria ainda mais a produtividade das florestas plantadas de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. Comercialmente, já é possível encontrar no mercado carvão vegetal produzido com tocos e raízes de eucalipto. Hoje em dia, o arranquio dos tocos e raízes está condicionado a necessidade da realização de uma reforma florestal, seja para realinhamento das linhas e condução de uma nova floresta, ou para substituição por uma cultura agrícola. Considerando as diferenças do setor florestal brasileiro frente aos países escandinavos, a atividade pode vir a se tornar rotineira nas empresas florestais, embora muitos estudos acerca de seu aproveitamento ainda sejam necessários. O baixo valor agregado e o alto custo de colheita são desafios existentes para o aproveitamento dos tocos e raízes e ainda fazem com que as biomassas sejam menos competitivas no mercado.

A utilização da biomassa florestal, sendo residual ou não, deve estar associada com o conhecimento e entendimento de seu potencial produtivo, e o conhecimento sobre a composição e as propriedades da biomassa são importantes na busca pela melhor utilização desse material do ponto de vista energético e ambiental (EUFRADE-JUNIOR, 2015).

Por isso, na utilização da madeira como combustível, várias análises e propriedades são importantes e devem ser consideradas, destacando-se: análise elementar, análise imediata, densidade, poder calorífico e outros, pois elas influenciam diretamente no custo da energia produzida (EUFRADE-JUNIOR, 2015).

2.3.3 Composição química elementar

A análise química elementar corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa, sendo apresentados valores para os conteúdos de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), cinzas (CZ) e, em algumas vezes, também o cloro (Cl) (NOGUEIRA, 2007).

No geral, existe uma uniformidade entre diferentes espécies com relação à composição química elementar da madeira, podendo ser generalizada a composição

de 50,2 % de C (carbono), 6,1 % de H (hidrogênio), 43,4 % de O (oxigênio) e 0,2 % de N (nitrogênio) (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Quando se tem por objetivo a utilização energética da biomassa, é importante salientar a íntima relação do valor calorífico com os teores elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio, principalmente, mas também nitrogênio e enxofre. Diversos autores indicam ainda que as razões entre os teores desses elementos químicos podem ser interessantes na avaliação energética da biomassa, afirmando que proporções elevadas de oxigênio, em comparação com o carbono, geralmente reduzem o potencial calorífico da biomassa, bem como altos teores de umidade, cinzas e nitrogênio (DEMIRBAS, 2006; BRAND, 2010; YIN, 2011; CHOI; SUDIARTO; RENGAMAN, 2014; VELÁZQUEZMARTÍ et al., 2014).

Na Tabela 2 são apresentados os componentes elementares de diferentes fontes de biomassa para energia.

Tabela 2 - Composição elementar para diversas fontes energéticas de biomassa

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

* C - carbono, H - hidrogênio, O - Oxigênio, N - nitrogênio, S - enxofre

Fonte: Cuiping et al. (2004)

2.3.4 Teor de Cloro

O teor de cloro é o principal elemento quando se trata de energia na combustão. No caso da madeira e produção de biomassa, o Brasil apresenta condições edafoclimáticas favoráveis e precipitação de água proveniente dos oceanos com alta evaporação, com concentrações molares de íons inorgânicos dissolvidos na chuva de até 85 %, contendo o elemento cloro em suas altas taxas de (NaCl), além de outros compostos inorgânicos que se depositam no solo, sendo absorvidas nas biomassas

em seu processo de crescimento, conseqüentemente também na madeira do *Eucalyptus* spp.

Em conseqüência, durante a combustão da biomassa em sua forma natural, formam-se gases poluentes tóxicos que causam problemas ambientais, de saúde e também perdas econômicas por corrosão de equipamentos. (STUMM ; MORGAM, 1970); (RILEY ; CHESTER, 1971); (KEENE et al., 1986); (MELLO, 2010).

No Brasil a taxa de cloro presente na madeira de eucalipto é, em média, cinco vezes maior que o permitido pelas normas. Portanto, quanto menor o teor de cloro na biomassa melhor é o processo de queima (ESCOBAR, 2016).

2.3.5 Composição imediata

A análise imediata de um combustível quantifica as percentagens de material volátil, carbono fixo e cinza. Em síntese, 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 3 reporta os teores de carbono fixo, material volátil e cinzas de fontes de biomassa.

Tabela 3 - Composição imediata para diversas fontes energéticas de biomassa

Biomassa	MV (%)	CF (%)	CZ (%)	U (%)
Eucalipto (folhas)	67,75 ± 5,01	20,19 ± 2,77	5,55 ± 2,24	6,50 ± 1,20
Willow (árvore)	69,20 ± 5,08	15,55 ± 1,99	6,17 ± 3,70	9,08 ± 1,45
Poplar (árvore)	74,04 ± 0,36	15,42 ± 1,44	2,63 ± 0,87	7,91 ± 1,65
Pinus (árvore)	76,50 ± 2,45	14,45 ± 0,41	0,89 ± 0,13	8,61 ± 1,91
Palha de arroz	61,10 ± 2,51	15,54 ± 1,36	15,25 ± 2,64	8,11 ± 1,51
Palha de trigo	63,96 ± 7,29	14,96 ± 1,49	12,25 ± 9,02	8,63 ± 2,03
Palha de milho	62,74 ± 6,15	14,83 ± 2,13	13,12 ± 8,79	9,21 ± 2,05
Soja	68,95 ± 1,74	15,62 ± 0,17	6,08 ± 1,10	9,34 ± 1,88
Casca de amendoim	61,64 ± 1,90	16,85 ± 0,71	12,15 ± 3,02	9,36 ± 0,41

MV (%) = material volátil; CF (%) = carbono fixo; CZ (%) = cinzas; U (%) = umidade;

Fonte: Cuiping et al. (2004)

O conhecimento dos teores de carbono fixo, material volátil e residual estão diretamente ligados ao comportamento da biomassa durante a combustão.

A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influenciam as características de queima do combustível pelo fato dos componentes voláteis, quando aquecidos, saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa, ao contrário dos combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo que queimam mais lentamente (BRITO; BARRICHELO, 1978).

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).

As cinzas (matéria mineral) da madeira são constituídas, principalmente, de sais de cálcio, potássio e magnésio, porém, também estão presentes, em quantidades menores, sais de outros elementos (RAGLAND et al., 1991). Nas árvores, o teor de sílica da casca é mais elevado do que a de madeira, devido à contaminação pelo solo carregado pelo vento, sendo que, 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).

A umidade reduz o calor disponível a partir do combustível, pois diminui o poder calorífico da madeira e 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 desse 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).

2.3.6 Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da sua qualidade, por ser de fácil determinação e estar relacionada às suas demais características (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991). Pode ser definida como a massa seca por unidade de volume saturado, sendo expressa em kg.m^{-3} (BOWYER et al., 2003). Estudos com florestas energéticas reportaram uma densidade básica média da madeira até 473 kg.m^{-3} para um plantio clonal de eucalipto com 18 meses (GARCIA et al., 2011).

Na Tabela 4 são apresentados valores de densidade básica da madeira de espécies comerciais de eucaliptos.

Tabela 4 - Densidade básica da madeira de algumas espécies de eucaliptos

Espécie	D_b (kg.m ⁻³)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	683
<i>Eucalyptus urophylla</i>	581
<i>Eucalyptus grandis</i>	525

Fonte: Sturion et al. (1987)

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).

2.3.7 Poder calorífico

O poder calorífico é uma das mais importantes propriedades do combustível. É avaliado pela quantidade de energia na forma de calor liberado durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível, expresso em caloria por grama ou quilocaloria por quilograma.

No caso da madeira são encontrados valores que vão de 3.000 kcal kg⁻¹ até 5.400 kcal kg⁻¹ (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Segundo Corder (1973), existem duas formas de expressar o poder calorífico de um combustível, sendo o poder calorífico superior e o inferior. No poder calorífico superior (PCS), a água formada durante a combustão, na reação entre o hidrogênio e o oxigênio elementar da madeira e o oxigênio, é condensada e seu calor latente é recuperado e, então, somado à energia mensurada, mostrando o máximo potencial de fornecimento energético da madeira, por isso, está mais presente em diversos trabalhos de pesquisas, de forma a permitir a comparação entre diferentes fontes de energia.

Já no poder calorífico inferior, o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor. Em termos de pesquisa e comparação de combustíveis, o mesmo autor diz que o PCS de resíduos vegetais varia de 4.500 a 5.000 kcal kg⁻¹. Como o PCI depende da umidade, pode-se

considerar, para umidade em torno de 30 %, valores em torno de 3.000 kcal kg⁻¹ para resíduos vegetais (PINHEIRO et al., 2005). Em seu trabalho, Costa (2006), estudou clones híbridos de *Eucalyptus grandis e urophylla* e obteve poder calorífico superior do lenho ou da casca, com valor médio de 4673 kcal.kg⁻¹.

A Tabela 5 apresenta o poder calorífico superior de algumas fontes de energéticas de biomassa.

Tabela 5 - Poder calorífico superior (PCS) para diversas fontes energéticas de biomassa

Biomassa	*PCS (MJ.kg⁻¹)
Eucalipto (folhas)	19,33 ± 1,60
Willow (árvore)	18,79 ± 0,40
Poplar (árvore)	18,57 ± 0,17
Pinus (árvore)	19,38 ± 0,35
Palha de arroz	14,66 ± 0,71
Palha de trigo	16,56 ± 1,05
Palha de milho	16,64 ± 0,38
Soja	16,96 ± 0,62
Casca de amendoim	18,62 ± 0,21

*PCS (MJ.kg⁻¹) – Poder calorífico superior
 Fonte: Cuping et al. (2004)

3 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi realizar a caracterização físico-química de tocos e raízes de clones de eucaliptos, avaliando os efeitos de tempo de estocagem em até 90 dias, para fins energéticos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

A matéria-prima utilizada foi proveniente de plantios clonais de *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis* (A), *Eucalyptus urophylla* x *grandis* (B), *Eucalyptus grandis* (C) do município de Três Lagoas, no estado de Mato Grosso do Sul, com espaçamento de 3,6 m x 2,2 m, nos tempos de 0, 15, 30, 45, 60, 75, e 90 dias de estocagem, no período entre dezembro de 2016 a março de 2017. O local está situado na longitude 51°40'42" W e latitude 20°45'04" S e possui aproximadamente 319 m de altitude. O clima predominante no município, segundo os critérios adotados por Koppen, é cfa – clima tropical – com temperaturas médias superiores a 24°C, temperatura do mês mais quente igual ou superior a 26°C e índice pluviométrico anual em torno de 1241 mm. Os tocos e raízes de cada tratamento foram arrancados com uma pá carregadora (Komatsu WA200) e depois foram transportados para o pátio de estocagem, onde foram empilhados separadamente, por tratamento, ao ar livre e sem cobertura, por um período de 90 dias. De cada tratamento foram selecionados e separados aleatoriamente amostras de tocos, devidamente identificados, que foram cavaqueadas e destinadas as análises.

4.2 Preparo das amostras

A amostragem e preparo das amostras foram realizados de acordo com a NBR 14660 – Madeira: amostragem e preparação para análise (ABNT, 2004). Para as análises, foram coletadas amostras do toco (Figura 4), as quais foram separadas por clones (A - *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis*, B – *Eucalyptus urophylla* x *grandis* e C – *Eucalyptus grandis*). Dessas amostras foi feita uma amostra composta, que foi dividida em duas partes: a primeira parte foi destinada para a determinação das análises químicas e físicas e a segunda parte para a determinação da densidade básica.

Figura 4 - Separação da amostra para análise laboratorial



Após separados, todos os componentes foram moídos em moinho tipo Willey (Figura 4) e posteriormente classificados em três tamanhos nos agitadores de peneiras: 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.

Figura 5 – I - Moagem e classificação das amostras no moinho tipo Willey; II - Agitador de peneiras; III - Granulometria das amostras



4.3 Análise elementar

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do departamento de Solos e Recursos Ambientais, FCA/UNESP, campus de Botucatu –SP.

A análise elementar baseia-se em determinar as partículas químicas (carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S)) do solo. Para o estudo foi utilizado um examinador Elemental (CHNS) da marca Perkin Elmer e modelo 2400. Este equipamento determina as partículas com critérios adotados na metodologia descrita por Pregl-Dumas.

Resumidamente, uma quantidade de amostra é queimada a alta temperatura na presença de oxigênio, ocorrendo a combustão completa e liberação dos gases CO₂, H₂O, N₂ e SO₂. 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 estabelecido segundo a Equação 1, como adotado pela norma ASTM E870 – 82 (2006).

$$O = 100 - (C + H + N + S + CZ) \quad (1)$$

Onde:

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 (%);

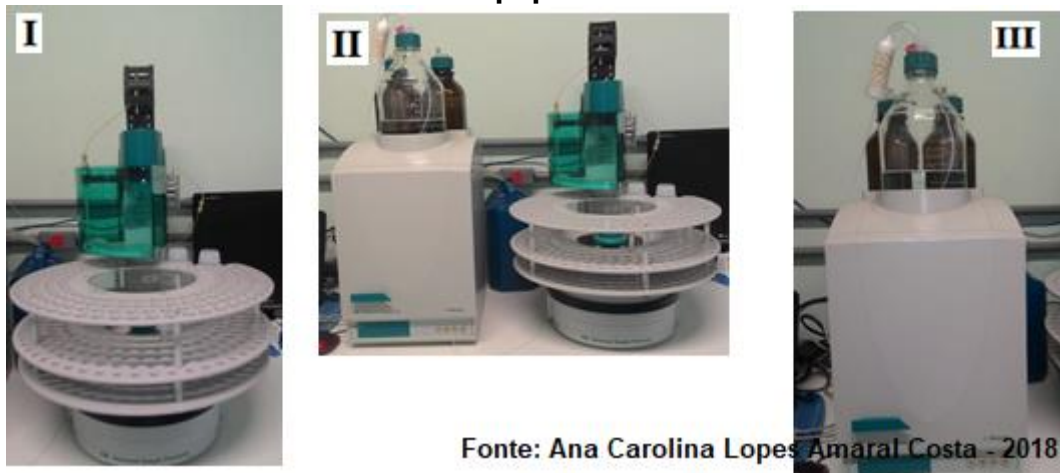
CZ = teor de cinzas na biomassa obtido na análise imediata (%).

4.3.1 Análise de Cloro

Os ensaios foram realizados no Departamento de Química e Bioquímica – Laboratório de Bioanalítica e Metaloproteômica – IBB/UNESP – Botucatu/SP.

Para a determinação do cloro, a análise foi realizada por meio da cromatografia de íons utilizando o equipamento modelo 861 Advanced Compact IC da marca Metrohm (Figura 6).

Figura 6 - Cromatógrafo de íons. I – Amostrador automático; II – Cromatógrafo de íons utilizado para determinação do Cloro; III – Módulo do equipamento



Fonte: Ana Carolina Lopes Amaral Costa - 2018

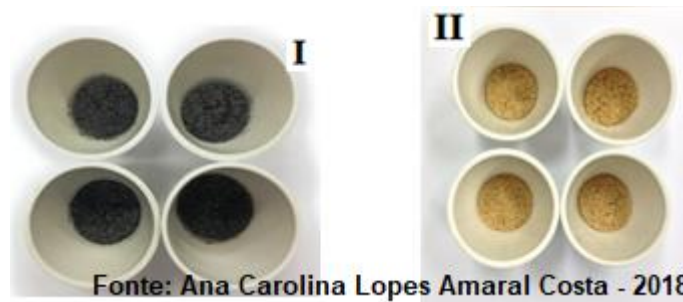
Foram pesados, em balança de precisão analítica, aproximadamente 100mg de amostras vegetal e adicionados 10 ml de solução de extração para cloreto em cada uma ($3,3 \text{ mmol l}^{-1}$ em carbonato de sódio e 1 mmol l^{-1} em bicarbonato de sódio). Após uma hora de repouso, as amostras foram sonicadas em três ciclos de 15 segundos com potência de 40 W. Após a sonicação, as amostras foram filtradas para retenção do sólido vegetal moído (esse sólido entope o aparelho) e colocadas para leitura em Cromatógrafo Compacto de Íons Advanced 861 da marca Metrohm com amostrador automático, sem interferência humana. As análises foram feitas em triplicatas e os espectros gerados foram comparados entre si para verificar a repetibilidade das leituras. O cromatógrafo foi operado no modo aniônico em temperatura de 18°C constante. Antes das análises, o cromatógrafo foi preparado com limpeza da coluna com solução iônica de carbonato de sódio e bicarbonato de sódio, solução de 5 % ácido sulfúrico e, por último, três lavagens com água deionizada para condicionar a coluna antes das análises. Entre a análise de uma amostra e outra o cromatógrafo fazia três lavagens da coluna com água deionizada para evitar interferência na análise da próxima amostra. Caso o cromatógrafo não conseguisse zerar a interferência da amostra anterior com as lavagens, o processo de lavagem era repetido até zerar o interferente. Quando isso não acontecia, as análises eram interrompidas automaticamente.

4.3.2 Análise imediata

Os ensaios foram realizados no Laboratório Agroflorestral de Biomassa e Bioenergia – IPBEN – FCA/UNESP – Botucatu/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 7 estão apresentadas amostras típicas dos resíduos em duas etapas de análise.

Figura 7 - Análise imediata. I - Resíduos após queima de material volátil; II - Cinzas residuais



O teor de umidade (U%) se deu pela norma ASTM E871-82/2006, sendo determinado com base úmida para o material fresco (Equação 2).

$$U = \frac{mu - ms}{mu} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

mu = massa úmida da fração coletada (g);

ms = massa seca da fração após secagem na estufa a 105 °C ± 2 °C (g);

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

TS = teor de secos na fração considerada (%).

Para a determinação do carbono fixo (CF), material volátil (MV) e cinzas (CZ) foi utilizado um forno mufla marca Fornitec, modelo F2 – DM, com capacidade até 1200°C (Figura 6). As amostras foram secas em estufa a 105 °C ± 2 °C para obtenção do material seco. Para os ensaios de MV foi utilizado uma grama e CZ duas gramas do material na fração 40-60 mesh, e o CF foi obtido por diferença.

O teor de cinzas (CZ) foi obtido após a amostra ser colocada em cadinho de porcelana com a tara conhecida e o mesmo foi utilizado com tampa para o ensaio de material volátil. Os cadinhos foram levados a mufla e inflamados a uma temperatura de 600°C por um período de 6 horas. Após esse período, os cadinhos foram retirados da mufla com ajuda de uma pinça e armazenadas no dessecador com sílica gel para resfriamento sem ganho de umidade. Os pesos resultantes de cinzas e teor de umidade foram utilizados para calcular a porcentagem de cinzas presente a 600°C, com base numa amostra livre de umidade. A pesagem foi realizada com balança de precisão (0,001 g) e (0,002 g).

Figura 8 - Forno mufla utilizado para análise imediata



O teor de materiais voláteis (MV) foi obtido após a amostra ser colocada em cadinho de porcelana com a tara conhecida e, nesse caso, o mesmo foi utilizado sem tampa. Os cadinhos foram levados a mufla a 950°C, e, no primeiro momento, com a ajuda de uma pinça, colocados na tampa por 3 minutos, e, no segundo momento, também com ajuda de uma pinça, colocados dentro da mufla fechada por mais 7 minutos. Após esse período os cadinhos foram retirados da mufla com ajuda de uma pinça e armazenadas no dessecador com sílica gel para resfriamento sem ganho de umidade. Os pesos resultantes de materiais voláteis foram utilizados para expressar a fração em massa do combustível que volatilizou durante o aquecimento a 950°C, com base numa amostra livre de umidade. A pesagem foi realizada com balança de precisão (0,001 g) e (0,002 g).

Para a determinação dos componentes MV e CZ, foi utilizada (Equação 3)

$$Y = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Y = teor do componente avaliando (%);

M_i = massa inicial da amostra (g);

M_f = massa final após acomodação específica (temperatura e tempo) na mufla.

O CF foi encontrado indiretamente, com o uso da (Equação 4).

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (4)$$

Onde:

CF = teor de carbono fixo (%);

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

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

4.3.3 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 utilizada a NBR 8633 (ABNT, 1984), que prescreve o método de determinação do poder calorífico superior ao volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática. 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 9). As amostras utilizadas (fração de 60 mesh) foram levadas à estufa a 105 °C ± 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 11). 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 9 - Calorímetro utilizado para determinação do PCS



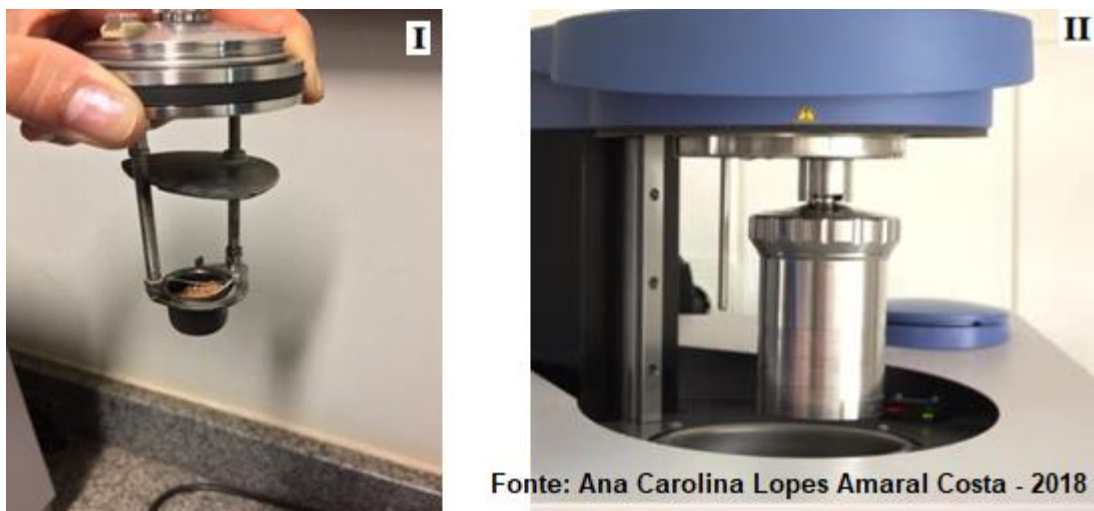
Após a ignição, ocorre a combustão e o calor liberado é transferido para água.

O aumento de temperatura na água é aferido por meio de sensores e o software -C5040 CalWin - do equipamento associa a leitura em energia produzida pela unidade de massa da amostra (Figura 10). Nos cálculos, o equipamento desconta a influência dos outros componentes do frasco durante a combustão (ex. o fio de algodão).

Figura 10 - Painel de controle do calorímetro



Figura 11 - Preparação da análise do PCS. I - Detalhe da amostra preparada no suporte do frasco de decomposição; II- Frasco de decomposição sendo posicionado para o ensaio

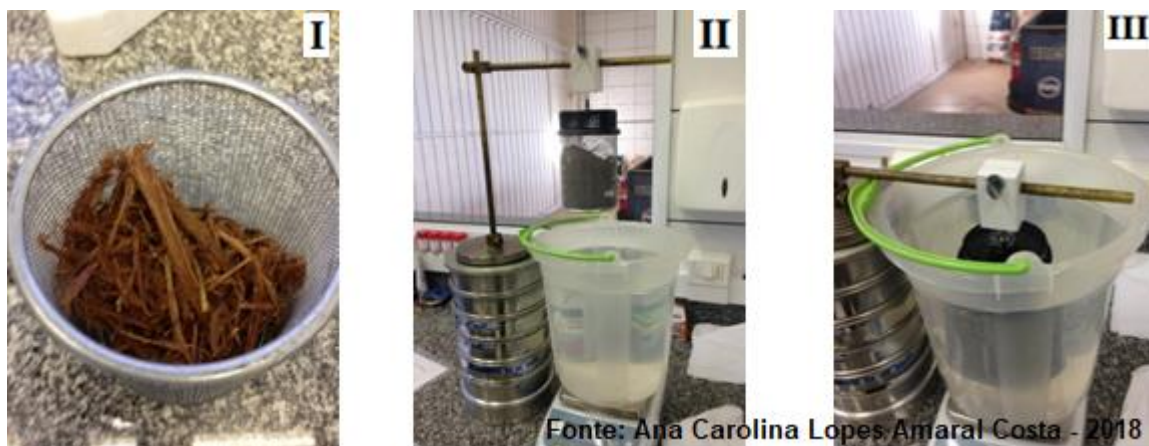


4.3.4 Densidade básica

O ensaio para determinação da densidade básica da biomassa foi realizado com base na NBR 11941 (ABNT, 2003) que especifica o método para determinação da densidade básica através de massa seca em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por unidade de volume máximo da madeira, na forma de cavacos originados do toco. Os ensaios de densidade básica foram realizados no Laboratório Agroflorestral de Biomassa e Bioenergia – IPBEN – FCA/UNESP – Botucatu/SP.

Os cavacos foram saturados imediatamente após a coleta e, posteriormente, secos em estufa ($105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) para obter a massa seca até atingirem peso constante. O volume saturado foi obtido pelo método da balança hidrostática (Figura 12).

Figura 12 - Densidade básica dos cavacos. I - Material após saturação pronto para ensaio; II e III - Esquema da balança hidrostática



Assim, a densidade básica da madeira dos cavacos foi calculada pela relação entre a massa seca e o volume saturado (Equação 5).

$$Db = \frac{PS}{VS} \times 1000 \quad (5)$$

Onde:

PS: Peso seco (g)

VS: Volume saturado (g/cm³)

4.3.5 Análises estatísticas

O trabalho foi desenvolvido em um experimento inteiramente casualizado e considerou-se um esquema fatorial (3 x 7) com dois fatores, clone (três clones - *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis*, *Eucalyptus urophylla* x *grandis*, *Eucalyptus grandis*) e tempo (sete tempos - 0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 dias). Os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e quando apresentou diferença significativa foi realizado o teste TUKEY-KRAMER para a comparação entre as médias.

Na análise estatística das variáveis umidade base úmida, densidade, PCS, carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, tendo como fatores clone e tempo de estoque, foram ajustados modelos lineares generalizados com a distribuição Inversa Gaussiana e função de ligação logarítmica (NELDER; WEDDERBURN, 1972).

Na análise estatística das variáveis cinzas, voláteis, carbono fixo, enxofre, cloro, tendo como fatores clone e tempo de estoque, foram ajustados modelos lineares generalizados com a distribuição gamma e função de ligação logarítmica (NELDER; WEDDERBURN, 1972).

Foi utilizado o procedimento genmod (do Programa estatístico SAS – *Free Statistical Software*, SAS University Edition) e para comparações entre tratamentos foi utilizado o teste de Tukey-Kramer (Westfall et al., 1999). A qualidade dos ajustes de todos os modelos lineares generalizados ajustados foi realizada por meio da análise de desvios (deviance) e gráficos dos resíduos de Pearson padronizados.

Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da biomassa florestal para análise estatística

Variáveis Mensuradas	Repetições por tratamento
*C H O N S	3
*UBU CZ CF MV	3
*PCS	3
*Cl	3
*DB	3

* C - carbono, H - hidrogênio, O - oxigênio, N - nitrogênio, S – enxofre, UBU – umidade base úmida, CZ – cinzas, CF – carbono fixo, MV – materiais voláteis, PCS – poder calorífico superior, Cl – cloro, DB – densidade básica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física e química

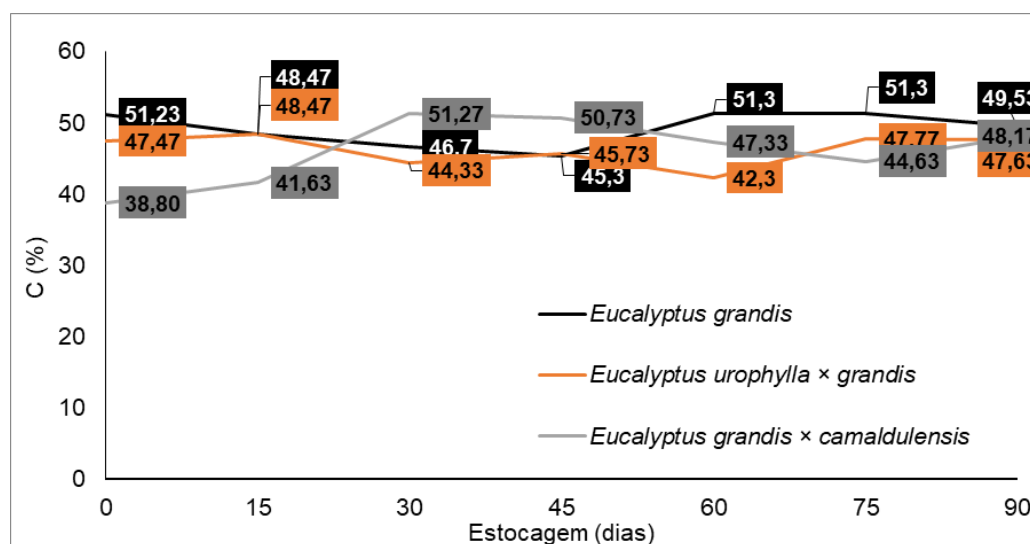
Para todas as variáveis estudadas dos fatores principais (clone e tempo) e suas interações consideradas, somente o clone teve efeito significativo ($P < 0,05$).

5.1.1 Composição química elementar

A composição química elementar determinou os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre nos tratamentos.

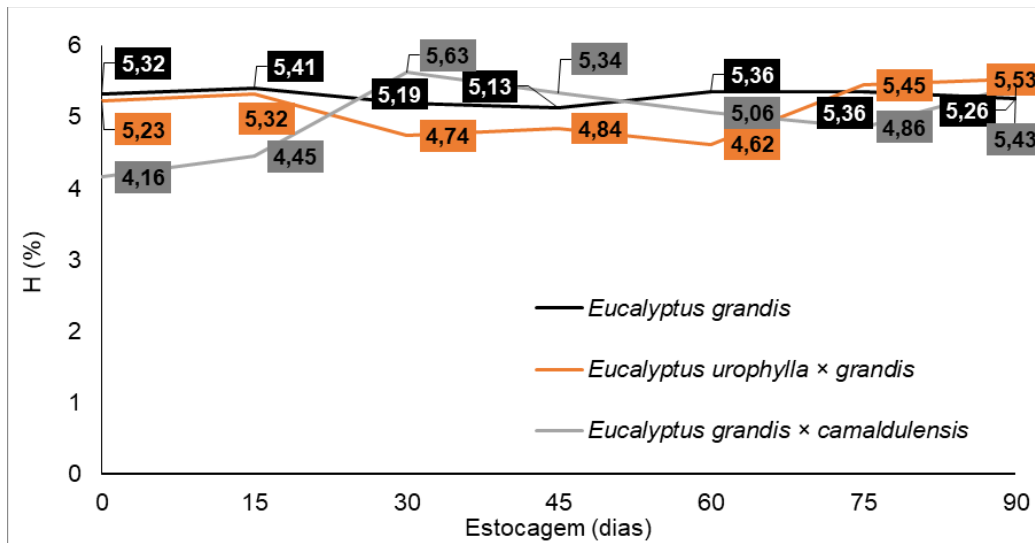
As médias do carbono em função do tempo são apresentadas na Figura 13.

Figura 13 - Resultado médio do teor de carbono em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação de carbono no clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis*, seguido do clone *Eucalyptus urophylla x grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* conforme ilustrado na Figura 13. As médias do teor de hidrogênio em função do tempo são apresentadas na Figura 14.

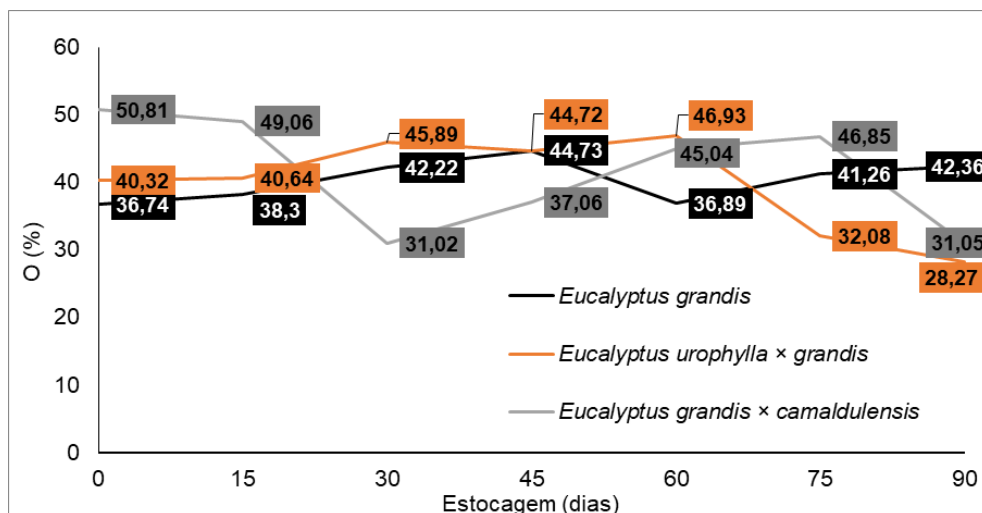
Figura 14 - Resultado médio do teor de hidrogênio em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação de hidrogênio no clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis*, seguido do clone *Eucalyptus urophylla x grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* (Figura 14).

As médias do teor de oxigênio em função do tempo são apresentadas na Figura 15.

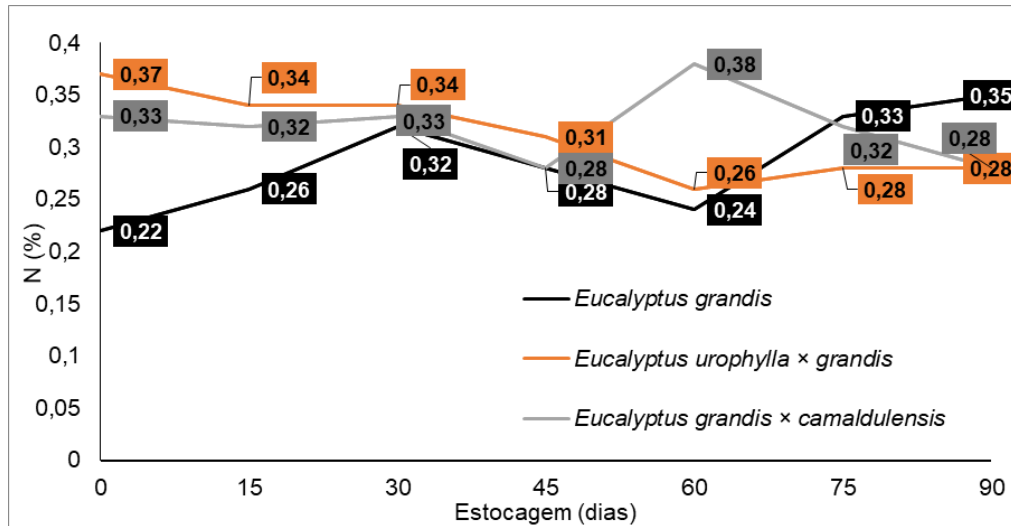
Figura 15 - Resultado médio do teor de oxigênio em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação de oxigênio no *Eucalyptus grandis x camaldulensis*, seguido do clone *Eucalyptus urophylla x grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* (Figura 15).

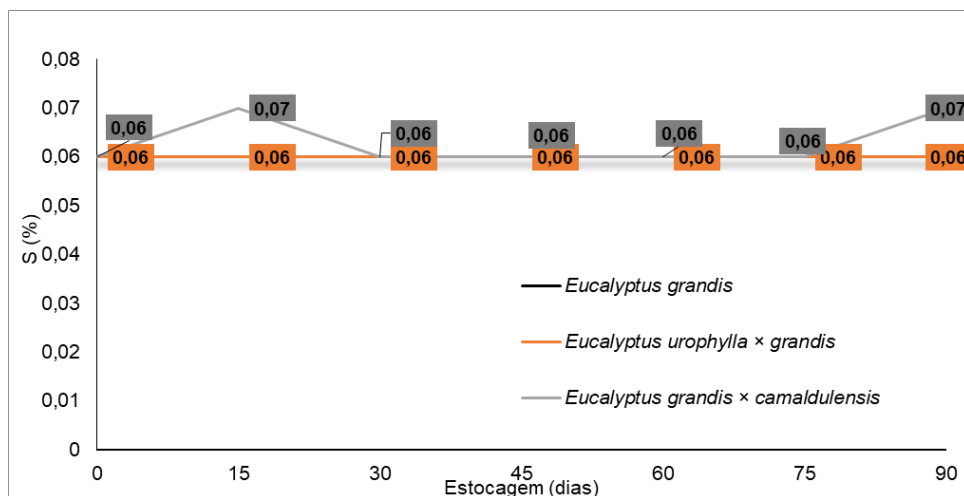
As médias do teor de nitrogênio em função do tempo são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Resultado médio do teor de nitrogênio em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação de nitrogênio no clone *Eucalyptus grandis* seguido do clone *Eucalyptus grandis* × *camaldulensis*, e por último no clone *Eucalyptus urophylla* × *grandis* (Figura 16). As médias do teor de enxofre em função do tempo são apresentadas na Figura 17.

Figura 17 - Resultado médio do teor de enxofre em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação do teor de enxofre no clone *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis* seguido do clone *Eucalyptus urophylla* x *grandis* (Figura 17).

Na Tabela 7, são apresentados os valores de p-valor da análise estatística para composição química elementar.

Tabela 7 - Valores médios da análise elementar da biomassa de toco de eucalipto

Clone	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Oxigênio(%)	Nitrogênio (%)	Enxofre(%)
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>camaldulensis</i>	46,08 c (0,96)	4,99 c (0,11)	41,55 a (1,74)	0,32 a (0,03)	0,0630 a (0,0006)
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i>	46,24 b (0,47)	5,10 b (0,08)	39,83 c (1,48)	0,29 c (0,05)	0,0614 b (0,0004)
<i>Eucalyptus grandis</i>	49,12 a (0,50)	5,29 a (0,02)	40,35 b (0,64)	0,31 b (0,04)	0,0603 c (0,0005)

Médias seguidas de mesmas letras maiúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey-Kramer ao nível de 95 % de confiança. Erro padrão da média entre parêntesis.

De acordo com a análise estatística apresentada na Tabela 7, observou-se um efeito significativo entre os clones para todas as propriedades analisadas (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre).

Existem poucos trabalhos relacionados às características energéticas de tocos e raízes de eucalipto. Porém, Leonello et al., (2019) estudaram os tocos de *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* e reportaram valor médio para o teor de carbono de 48,4 %, teor de hidrogênio de 5,5 %, teor de oxigênio de 44,9 %, teor de nitrogênio de 0,23 % e teor de enxofre de 0,060 %.

Os valores médios da análise elementar descobertos para o toco estão em conformidade tanto com os atingidos por Leonello et al., (2019), quanto por Santana (2009) para clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e Reis et al., (2012) para *Eucalyptus urophylla*, ambos voltados para uso energético.

A grande quantia de C e H também tem uma ligação favorável com o poder calorífico da biomassa, diferente do teor de oxigênio, que não traz nenhuma colaboração para o crescimento do mesmo, independentemente de ser um elemento

fundamental para realizar a queima (SHENG; AZEVEDO, 2005; PROTÁSIO et al., 2011b).

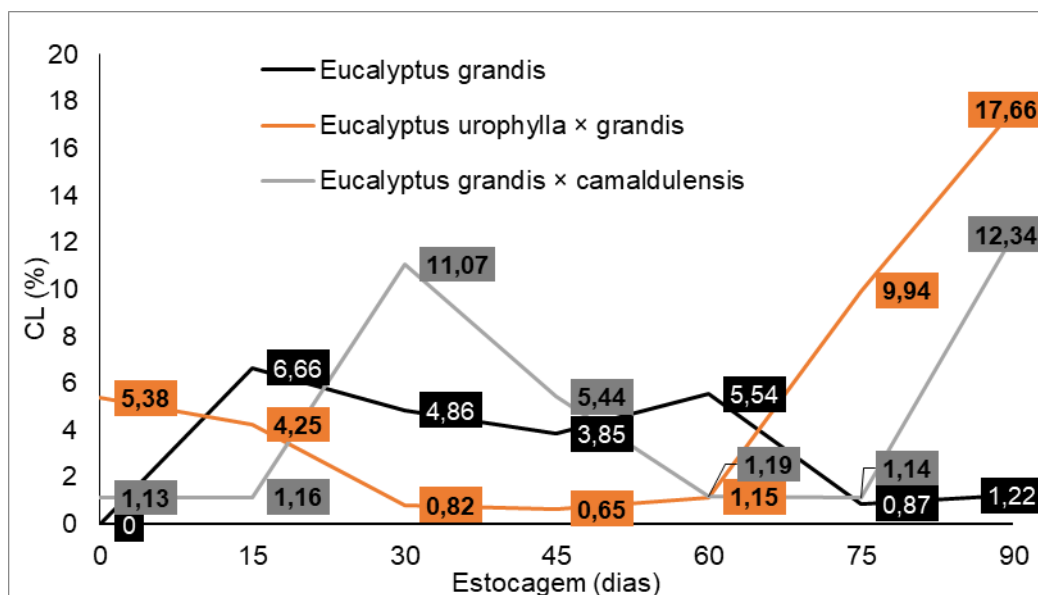
Outro ponto importante na composição química elementar a ser considerado, em relação à biomassa estudada, é a relação C/N, que tem algumas incompatibilidades na aplicação da biomassa. A relação C/N é muito significativa, pois está fortemente conjunta a velocidade que esse material se decompõe e pode afetar o rendimento energético.

5.1.2 Teor de cloro

O teor de cloro corresponde a um elemento mineral acumulado na madeira, que depende de alguns fatores: espécie vegetal, clone, idade, genética, ritmo de crescimento, eficiência nutricional, disponibilidade dos nutrientes no solo, disponibilidade e absorção de água pelos vegetais.

As médias do teor de cloro em função do tempo são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Resultado médio do teor de cloro em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação do teor de cloro no clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis*, seguido do clone *Eucalyptus urophylla x grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* (Figura 18). Na Tabela 8, são apresentados os valores de p-valor da análise estatística para o teor de cloro.

Tabela 8 - Valores médios do teor de cloro da biomassa de toco de eucalipto

Clone	Cloro
<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>camaldulensis</i>	4,78 b (1,03)
<i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	5,69 a (1,29)
<i>Eucalyptus grandis</i>	4,10 c (0,47)

Médias seguidas de mesmas letras maiúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey-Kramer ao nível de 95 % de confiança. Erro padrão da média entre parêntesis.

De acordo com a análise estatística apresentada na Tabela 8, observou-se um efeito significativo entre os clones para a propriedade analisada (teor de cloro).

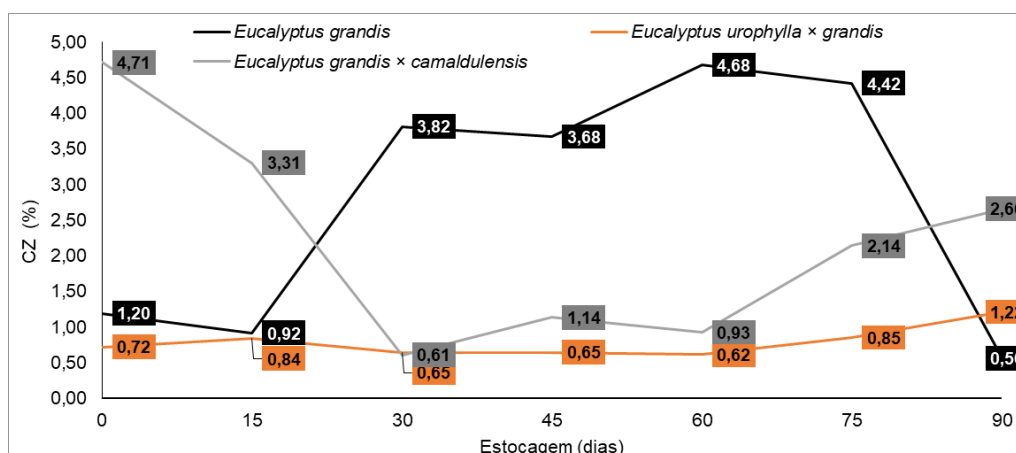
Gominho et al., (2012) estudando tocos de *Eucalyptus globulus*, aos 24 anos de idade, em diversos locais de Portugal, encontraram os valores médios para o teor de cloro de 0,04 %. Já para Leonello et al., (2019) os valores médios encontrados foram de 0,13 %. Para as florestas plantadas de eucalipto no Brasil, as informações acerca da qualidade e potencial energético de tocos e raízes ainda são limitadas. Porém, os resultados obtidos nesse trabalho (Figura 18) mostram que o teor de cloro dos clones estudados foi maior que o obtido em outros trabalhos com tocos de eucalipto.

5.1.2 Composição química imediata

A composição química imediata determinou os teores de carbono fixo (CF), material volátil (MV) e cinzas (CZ) nos tratamentos.

As médias do teor de cinzas, em função do tempo, são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 - Resultado médio do teor de cinzas em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação de cinzas no clone *Eucalyptus grandis* seguido do clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis* e por último no clone *Eucalyptus urophylla x grandis* (Figura 19).

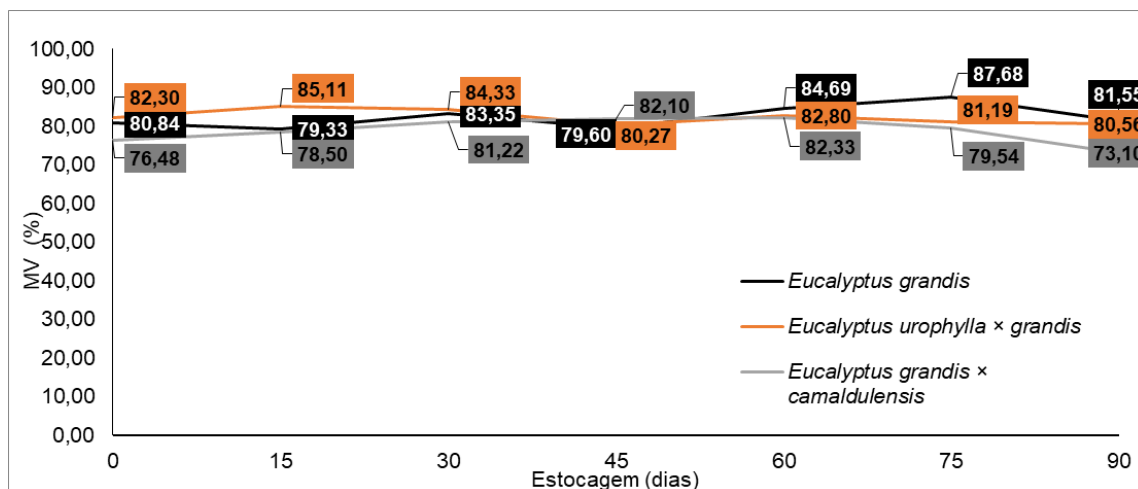
O teor de cinzas é a fração do material formado pelos materiais minerais (como alumínio, sílica e cálcio) que não contribuem com a combustão (THY, 2009) e o baixo teor de cinzas é uma das características da madeira de eucalipto que o torna viável para o uso em energia (GOMINHO et al., 2012).

Para os tocos de *Eucalyptus globulus*, aos 24 anos de idade, em diversos locais de Portugal, Gominho et al., (2012) reportaram os valores médios do teor de cinzas 10,6 %. Já para Leonello et al., (2019) os valores médios, para cinzas, encontrados foram de 0,52 %. Para as florestas plantadas de eucalipto no Brasil, as informações acerca da qualidade e potencial energético de tocos e raízes ainda são limitadas.

Entretanto, os resultados obtidos nesse trabalho (Figura 19) mostram que o teor de cinzas dos clones estudados foi superior que ao de outros trabalhos com eucaliptos, como Protásio et al., (2014) e Brito; Barrichelo (1978). Possivelmente, eles foram influenciados pela contaminação do solo, terra ou areia (RAGLAND et al., 1991).

Em relação ao teor de voláteis, as médias, em conformidade com o tempo, são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Resultado médio do teor de voláteis em função do tempo



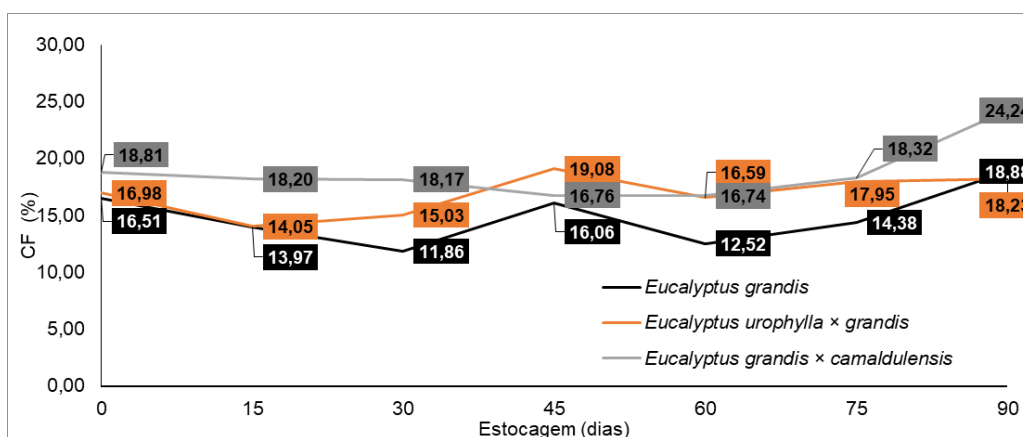
De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se uma maior variação de teor de voláteis no clone *Eucalyptus grandis* seguido do clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis* e por último no clone *Eucalyptus urophylla x grandis* (Figura 20).

O teor de voláteis aponta a parcela do material que tem por encargo início à combustão. É a fração liberada no começo da combustão e influencia diretamente na capacidade térmica do material. Quando presente em teores representativos na biomassa pode iniciar a combustão em temperaturas mais baixas (NOGUEIRA; LORA 2010).

Os valores de teor de voláteis para os resíduos de madeira podem ser variáveis, de acordo com a origem do material. Paula (2010) apresentou valores de 78 a 83 % para resíduos de madeira enquanto Souza et al. (2012) encontrou valores de 82 a 86 % para esses resíduos. Os resultados obtidos neste trabalho (Figura 20) mostram que o teor de voláteis dos clones estudados está dentro dos teores descritos na literatura, destacando o potencial energético dos materiais analisados.

Para o carbono fixo em função do tempo, as médias dessa variável são apontadas na Figura 21.

Figura 21 - Resultado médio do teor de carbono fixo em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação de carbono fixo no clone *Eucalyptus grandis* seguido do clone *Eucalyptus urophylla x grandis* e por último no clone *grandis x camaldulensis* (Figura 21).

O teor de carbono fixo é a porção do material que deve permanecer em queima mesmo após a saída de todos os componentes voláteis, orgânicos e inorgânicos. Ele é responsável pela queima vagarosa na fase sólida e, desta forma, mantém o material em queima por um período maior que o teor de voláteis (BRITO; BARRICHELO, 1978). É esperado que para resíduos florestais, o valor do teor de carbono fixo esteja entre 10 e 30 % (NOGUÉS, 2010) e, quanto maior for esse teor, maior o tempo de combustão do material, resultando em maior permanência nos aparelhos de queima (BRITO; BARRICHELO, 1982).

Para os tocos de *Eucalyptus globulus*, aos 24 anos de idade, em diversos locais de Portugal, Gominho et al., (2012) reportaram os valores médios de carbono fixo de 18,3 %. Com isso, os resultados obtidos neste trabalho (Figura 21) mostram que os teores de carbono fixo dos clones estudados estão dentro dos descritos na literatura.

Na Tabela 9 são apresentados os valores de p-valor da análise estatística para composição química imediata.

Tabela 9 - Valores médios da análise imediata da biomassa de toco de eucalipto

Clone	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>camaldulensis</i>	2,21 b (0,31)	79,04 c (0,70)	18,75 a (0,54)
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i>	2,75 a (0,37)	82,44 a (0,62)	14,88 c (0,51)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,79 c (0,04)	82,36 b (0,02)	16,84 b (0,37)

Médias seguidas de mesmas letras maiúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey-Kramer ao nível de 95 % de confiança. Erro padrão da média entre parêntesis.

De acordo com a análise estatística apresentada na Tabela 9, observou-se um efeito significativo entre os clones para todas as propriedades analisadas (cinzas, voláteis e carbono fixo).

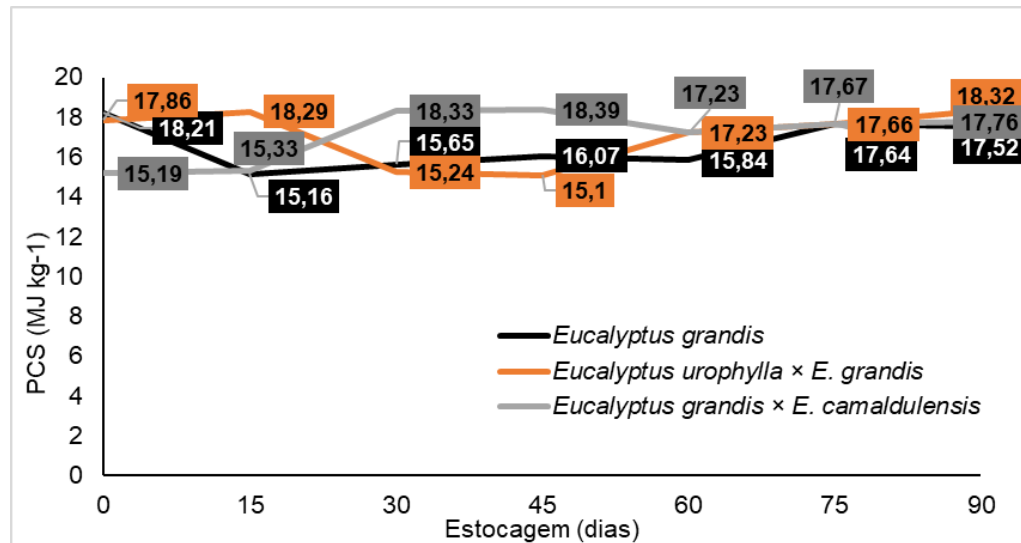
5.1.3 Poder Calorífico

Para a variável poder calorífico, dos fatores principais (clone e tempo) e suas interações consideradas, nem o clone, nem o tempo apresentou efeito significativo ($P < 0,05$).

O poder calorífico superior de qualquer material é determinado pela porção de energia liberada em formato de calor durante a queima absoluta de uma unidade de massa do combustível (CORTEZ et al., 2008). Carneiro et al., (2014) obtiveram valores médios de 19 MJ.kg⁻¹ para clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e Brito; Barrichelo (1982) depararam-se com valores entre 12,54 a 22,57 MJ.kg⁻¹. Com isso, os resultados obtidos neste trabalho (Figura 22) mostram que o PCS dos clones estudados estão dentro dos descritos na literatura.

As médias do poder calorífico, em função do tempo, são apresentadas na Figura 20.

Figura 22 - Resultado médio do poder calorífico em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação de poder calorífico no clone *Eucalyptus urophylla* × *grandis*, seguido do clone *Eucalyptus grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* × *camaldulensis* (Figura 22).

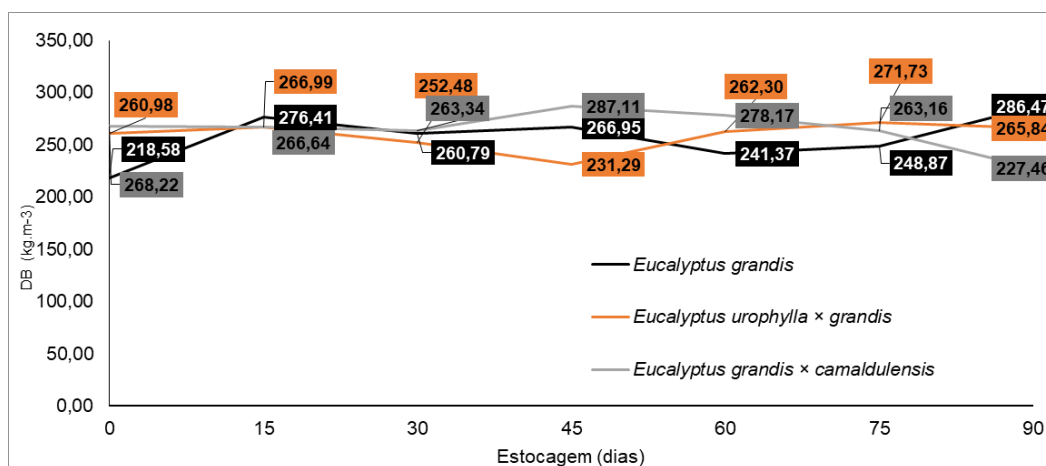
5.1.4 Densidade Básica

Para a variável poder densidade básica, dos fatores principais (clone e tempo) e suas interações consideradas, nem o clone, nem o tempo apresentou efeito significativo ($P < 0,05$).

A densidade da madeira é um dos fatores mais significativos e mais empregados, pois intervém em diversas propriedades da madeira. Ela é estabelecida como massa seca por unidade de volume saturado (BOWYER et al., 2003). Ao contrário do que é encontrado em madeiras com maiores densidades, ao utilizar as com menor densidade para a geração direta de energia na forma de calor é gerada uma queima rápida e também uma redução na produção de energia por unidade de volume. Porém, maiores densidades geram dificuldades de iniciar a queima do material (VALE et al., 2002). Segundo Foelkel (2009a), a densidade básica das árvores de *E. grandis* variam entre 0,400 a 0,480 g/cm³. Santana et al., (2012) observaram, para clones de *Eucalyptus grandis* e *urophylla* na idade de sete anos, média de 0,452 g/cm³ e Alzate et al., (2005) encontraram, para *Eucalyptus grandis* de

oito anos, densidade de 0,460 g/cm³. Ferreira (2004) ressalta ainda, que as árvores de *Eucalyptus saligna* apresentam densidade básica mais densa quando comparada com as de *Eucalyptus grandis*. Gominho et al., (2012) pesquisando as características de tocos e raízes de *Eucalyptus globulus*, em seis diferentes florestas de Portugal, para uso como combustível, encontrou valores de densidade básica que variaram de 550 kg/m³ a 710 kg/m³, com média de 630 kg/m³. Já Spadim et al., (2019) também estudando tocos dos clones *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* encontraram um resultado médio de 469 kg/m³. Com isso, os resultados encontrados neste trabalho (Figura 23), mostram que a densidade básica dos clones estudados está próxima do descrito na literatura, porém, um pouco abaixo das médias encontradas pelos autores citados. As médias da densidade básica em função do tempo são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Resultado médio da densidade básica em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação de densidade básica no clone *Eucalyptus grandis* seguido do clone *Eucalyptus urophylla* x *grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis* (Figura 23).

5.1.5 Umidade Básica

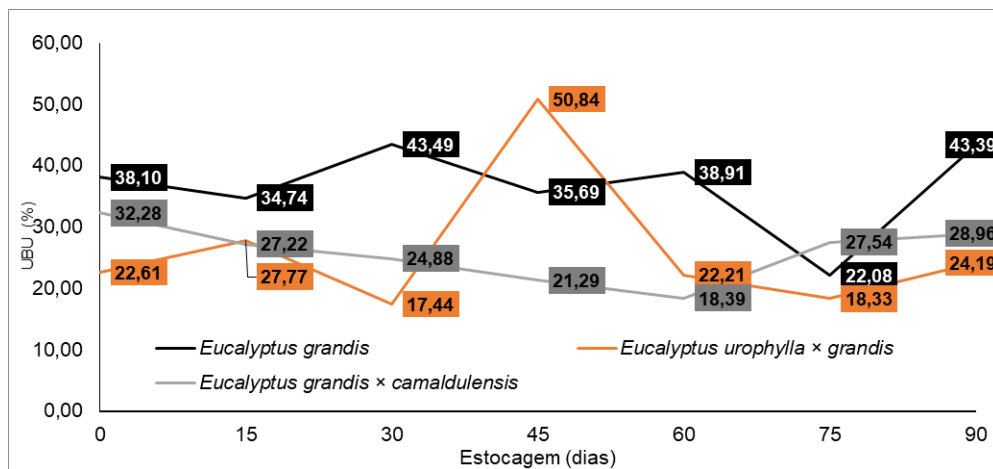
O teor de umidade diz respeito à relação entre a massa de água presente na madeira e a massa da madeira seca. Essa unidade pode ser expressa em umidade base seca (é determinada pela razão entre o peso da água e o peso da matéria seca),

que é mais comum na literatura, e umidade base úmida (é determinada pela razão entre o peso da água).

A base úmida retorna o valor de água que tem na amostra, e quando se pensa na questão energética isso é o mais importante.

As médias da umidade base úmida, em função do tempo, são expostas na Figura 24.

Figura 24 - Resultado médio da umidade base úmida em função do tempo



De acordo com as médias dos tratamentos analisados, observou-se maior variação de umidade base úmida no clone *Eucalyptus urophylla x grandis* seguido do clone *Eucalyptus grandis* e por último no clone *Eucalyptus grandis x camaldulensis* (Figura 24).

Na Tabela 10 são apresentados os valores de p-valor da análise estatística para umidade base úmida.

Tabela 10 - Valores médios da umidade base úmida da biomassa de toco de eucalipto

Clone	Umidade BU* (%)
<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>camaldulensis</i>	25,80 c (1,00)
<i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	36,63 a (1,51)
<i>Eucalyptus grandis</i>	26,20 b (2,38)

*BU – Base úmida

Médias seguidas de mesmas letras maiúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey-Kramer ao nível de 95 % de confiança. Erro padrão da média entre parêntesis.

Conforme análise estatística apresentada na Tabela 10, observou-se um efeito significativo entre os clones para a propriedade analisada (umidade base úmida).

Em geral, as raízes têm grande facilidade na secagem por conta da alta área de exposição e o teor de umidade de cepas se diferencia entre 35 a 45 %. A presença intensa de terra, areia e pedras, além de serapilheira é inoportuna e segundo Foelkel (2016) tudo isso precisa ser removido para que a biomassa possa ser de boa qualidade para queima.

O ideal é que se possa estocar os tocos e raízes no campo por um período adequado para que a umidade seja reduzida a menos de 35 %, que é o teor máximo para que não se perca muita energia para eliminar água durante a combustão na caldeira (SPADIM, et al., 2019).

O limite térmico dos combustíveis de biomassa, para que o material mantenha a queima, se aproxima de 65 % de umidade na base úmida. Caso ultrapasse esse valor, a energia que é liberada através da queima é incapaz de fazer com que a água evapore e a biomassa seja aquecida. Diante disso, ao atingir 50 a 55 % de umidade, é necessário acrescentar combustível para que a biomassa se queime (JENKINS et al., 1998). Com isso, os resultados obtidos através deste trabalho (Figura 24) demonstram que a umidade base úmida dos clones estudados está de acordo com os descritos na literatura.

6 CONCLUSÕES

Mediante aos ensaios realizados na biomassa de tocos e raízes de eucalipto, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Para todas as propriedades físico-químicas avaliadas, não sofreram alteração em função do tempo, entretanto os clones apresentaram diferenças em todas as propriedades.

- Dentre os clones estudados, do ponto de vista energético, o clone *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis* foi o que apresentou maior PCS em relação aos outros e também maior densidade básica;

- O clone *Eucalyptus grandis* apresentou maior teor de cinzas em relação aos demais clones estudados;

- O clone *Eucalyptus urophylla* x *grandis* apresentou maior teor de cloro em relação aos demais clones estudados;

- Os clones *Eucalyptus urophylla* x *grandis*, *Eucalyptus grandis* x *camaldulensis* e *Eucalyptus grandis* podem ser apontados como biocombustíveis renováveis e possuem um grande potencial energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. H. O.; SANTOS, L. A.; MENDES, M. R.; MENEZES, R. K. O.; BARBOZA, A. C. R.; SOUZA, J. E. A.; MENEGHETTI, M. R.; MENEGHETTI, S. M. P. **Avaliação do potencial energético do capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum.*)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 52, 2012, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Química, 2p.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil / **Agência Nacional de Energia Elétrica**. – ANEEL Brasília, p 153, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **ANEEL**. Banco de informações sobre geração. 2005. Disponível em: Acesso em: 29 out. 2017.

ALZATE, S. B. A. **Longitudinal variation of the wood basic density of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**, *E. saligna* Sm. and *E. grandis* x *urophylla* clones. *Scientia Forestalis*. n. 68, p.87-95, 2005.

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 E775-87**: standard test methods for total sulfur in the analysis sample of refuse-derived fuel. West Conshohocken, PA, 2008. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E777-08**: standard test method for carbon and hydrogen in the analysis sample of refuse derived fuel. West Conshohocken, PA, 2008. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E778-08**: standard test method for nitrogen in the analysis sample of refuse derived fuel. West Conshohocken, PA, 2008. 5p.

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, M. C. N.; MINHONI, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C.; CAMPOS, C. S. **Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de espécies e clones de eucalipto visando o cultivo de shitake em toras**. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.35, n.2, p.183-192, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 8633**: carvão vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 12p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 14660**: madeira – amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro, 2004. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – **ABIB**. Biomassa e bioenergia: woodchips, pellets and briquetes. São Paulo: ABIB, 2012. 450p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – **ABIB**. 2015. Disponível em: <
<https://www.brasilbiomassabioenergia.com.br/>>. Acesso em Jul. 2018.

BALLARIN, A.W. **Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora (E. citriodora)**. 1999, 204 f. Tese (Livre-docência em Propriedades Mecânicas e Estruturas de Madeira), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

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.

BAUER, S.R.T. **Resíduos da exploração florestal de Eucalyptus grandis Hill Ex Maiden para geração de energia elétrica**. Botucatu, SP: UNESP, 2001. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. B. **Estudos para produção de celulose sulfato de seis espécies de eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 12, p. 77-95, 1976.

BERCH, S. M., CURRAN, M., DYMOND, C., HANNAM, K., MURRAY, M., TEDDER, S., TITUS, B. & TODD, M. (2012). **Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia**. Scandinavian Journal of Forest Research 27(8), 709-723.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de Eucalyptus saligna Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

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. Editora Interciência, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2012: resultados preliminares - ano base 2011**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: Grupojam Comunicação e Marketing Ltda., 2012. 51p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2004**. Brasília: **MME**, 2007. 169p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Renovabio**. Brasília: **MME**, 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal> >. Acesso em abril. 2019.

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.63-78, 1978.

BRITO, J.O. de; BARRICHELO, L.E.G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 24, p. 9-20, 1977.

BRITO, J.O. de; BARRICHELO, L.E.G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: II. Densidade da madeira x densidade do carvão**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. n. 20, p. 121-126, 1980.

BRITO, J. O. DE; BARRICHELO, L. E.G. **Carvão vegetal de madeira de desbaste de pinus**. Circular Técnica IPEF, v.146, p.1-12.1982.

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.; CINTRA, T. C. **Madeira para energia no Brasil: realidade, visão estratégica e demandas de ações**. Biomassa & Energia, Viçosa – MG, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

BRITO, J. O. **Secagem, umidade e densidade de tocos e raízes de eucalipto**. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. . Botucatu: Fepaf, 2019. P18.

BROOKER, M. I. H.; KLEINIG, D. A., 2006. **Field Guide to Eucalyptus. South-eastern Australia**, 3 ed. vol. 1. Melbourne: Bloomings, 2006, 356 p.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009.

CASSELLA, A. R. et al. **Caracterização de Biomassa por Análise Térmica**. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO e III CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ANÁLISE TÉRMICA E CALORIMETRIA. 2012, Campos do Jordão. Anais...São Paulo: Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria, 6p.

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.

CHOI, H. L.; SUDIARTO, S. I. A.; RENGAMAN, A. **Prediction of livestock manure and mixture higher heating value based on fundamental analysis**. Fuel, v. 116, p. 772-780, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113008077>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

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.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 84 f. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CORTEZ, C. L.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T.; MOREIRA, J. R.; AMENDOLA, F. C. B.; GAVIOLI, F. **Análise do processo produtivo do eucalipto no sistema “short rotation” para uso como combustível em uma usina termoeletrica**. In, CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 4,2009, Curitiba. Anais... São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa, 7p.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COSTA, A. C. L. A. et al. Secagem, umidade e densidade de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 40.

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, A. **Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics**. Energy conversion and Management, v. 47, n. 15-16, p. 2271-2282, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890405003237>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (BRASIL). Balanço energético nacional (BEN) 2016: ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 294p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (BRASIL). Balanço energético nacional (BEN) 2017: relatório síntese ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 61p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (BRASIL). Balanço energético nacional (BEN) 2013: relatório síntese ano base 2012. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 61p.

EUFRADE JUNIOR, H. J. **Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia**. 2015. 119 f. Dissertação (mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION – AEBIOM. **Biomass delivers climate change benefits**. Renewable Energy House, Brussels - Bélgica, 2012, 2p.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: O caso dos pellets de Madeira**. 2016. 122 f. Tese (doutorado em Ciências – Energia), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.

FERREIRA, A. D. **O comportamento florestal nos sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. 2004. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tabuleiros-costeiros/busca-de-noticias//noticia/2117946/artigo-o-componente-florestal-nos-sistemas-de-integracao-lavourapecuaria-floresta>> Acesso em: 24 mar 2018.

FERREIRA, M. **Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n.4, p.65-89, 1972.

FOELKEL, C. **Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos**: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. Eucalyptus online Book & Newsletter, 133p. 2005. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_minerais.pdf> Acesso em: 19 ago. 2018.

FOELKEL, C. **Propriedades papeleiras das árvores, madeiras e fibras celulósicas dos Eucaliptos**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 111p. 2009a. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>>. Acesso em: 01 mai 2018.

FOELKEL, C.E.B. **O Problema dos Tocos Residuais das Florestas Plantadas de Eucaliptos**. In: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2014b. 17p. Disponível em: < http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news45_Cepas_Tocos.pdf > Acesso em: 20 jun. 2018.

FOELKEL, C. **Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 48 p. 2007a. Disponível em: < <http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html> > Acesso em: 12 mar 2018.

FONSECA, E. M. B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: Aspectos Técnicos, Econômicos Sociais e Ambientais**. Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.

FREITAS, J. M. et al. Secagem, umidade e densidade de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 34.

FREITAS, J. M.; HORTA. J. Secagem, umidade e densidade de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 46.

GOMINHO, J.; LOURENÇO A.; MIRANDA, I.; PEREIRA H. **Chemical and fuel properties of stumps biomass from Eucalyptus globulus plantations. Industrial Crops and Products**. p. 12-16. 2012.

.GVces (CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE). Panorama de energias renováveis: setor industrial e América Latina. Centro de estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas, Fundação Getúlio Vargas. São Paulo: 2016. 43p.

FONTOURA, C. F. V. T. **Avaliação de Projeto de Investimento em Usina Termelétrica à Capim-Elefante: Uma Abordagem Pela Teoria de Opções Reais**. 2015. 86 f. Dissertação (mestrado em Administração de empresas), Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

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.

GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; REZENDE, M. A.; MAZIERO, F. L. **A Energia da madeira em floresta de eucalipto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40,2011a, Cuiabá-MT. Anais...Cuiabá : CONBEA, 4p.

GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. B.; GUERRA, S. P. S.; MACHADO, F. C.; MAZIERO, F. L. **Densidade básica média e biomassa de madeira em floresta energética no**

sistema de curta rotação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 6, 2011b, Curitiba-PR. Anais...10p.

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.

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, É. 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.

HAAG, H. P.; SARRUGE, J. R.; OLIVEIRA, G. D.; POGGIANI, F.; FERREIRA, C. A. **Análise foliar em cinco espécies de eucaliptos.** Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n.13, p. 99-116, 1976.

HYVÖNEN, R. et al. **Effects of stump harvesting on soil C and N stocks and vegetation** 8-13 years after clearcutting. Forest Ecology and Management, v. 371, p. 23-32, 2016.

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

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES.

Anuário estatístico da IBA 2017: ano base 2016. São Paulo, 2017. 77p.

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.

KALLIOLA, T. M., M. **Stumps - An unutilised reserve.** In: Newsletter on results 4/2004. Helsinki: Tekes.

KEENE, W. C., A. A. P. PSZENNY, K. M. GALLOWAY, AND M. E. HAWLEY. Sea-as corrections and interpretations of constituent ratios in marine precipitation, J. **Geophys. Res.**, 91 (D6), 6647-6658, 1986.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo corrente para secagem de grãos.** 2008. 193f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

KRIGSTIN, S. G.; WONG, B. M.; ROY, D. N. **The contribution of the chemical components in juvenile hybrid *Salix* spp. to its total energy output.** Wood Science Technology, Toronto, vol. 27, n. 4, p. 309-320, 1993.

LAITILA, J.; RANTA, T.; ASIKAINEN, A. **Productivity of stump harvesting for fuel.** International journal of forest engineering, v.19, n. 2, 2008. p. 37-47.

LEONELLO, E. C.; ARRUDA, N. L. F. V.; PASSOS, J. R. S.; PROSDOCINI, A. B. P. Caracterização química da madeira de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas.** Botucatu: Fepaf, 2019. p. 107-122.

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

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

LUCIA, R. M. D.; VITAL, B. R. **Características físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** Revista árvore, Viçosa-MG, v.4, n.1, p. 70 - 74. 1980.

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.

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.

MARTINI, A. J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade.** 2004. 332f. Dissertação (Mestrado em História Social) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MAZZARELLA, V. **Capim Elefante como fonte de energia no Brasil: realidade atual e expectativas.** Jornada Madeira Energética, 2007, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos.

MELLO, w.z.; **Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. Environmental Pollution.** V.114, p.235-242. 2001.

METLA (2013). **Statistical Yearbook of Forestry 2013.** Joensuu. Finnish Forest Research Institute.

MICHAELIS. Biomassa - Dicionário de Português Michaelis-UOL.

MIRANDA, M. A. S. **Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial.** 2015. 48p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

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.

MORAES, C. B. **Variabilidade genética em progênies de polinização aberta de *Eucalyptus urophylla* para tolerância ao frio.** 2013. 90 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

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.

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.

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 & Energia, Viçosa – MG, v. 1, n. 1, p.107-112, 2004.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. **Generalized linear models.** Journal of the Royal Statistical Society Series A, 1972, 135 (3): 370–384. doi:10.2307/2344614.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa energética: caracterização de biomassa. grupo de energia, biomassa e Meio Ambiente. Universidade Federal do Pará. Palestra proferida na I Escola de combustão.** Florianópolis – SC, 2007. Disponível em: <http://redenacionaldecombustao.org/escoladecombustao/arquivos/EDC2007/biomassa/Manoel_F_M_Nogueira-Characterizacao_Biomassa.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2013.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** In: **BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord.). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações.** 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 199 p.

NOGUÉS, F.; GARCÍA D.; REZEAU, A. **Energia de la biomassa.** Textos docentes, v.1, p. 125-143. 2010.

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 Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 2012.

ORTIZ, C. A.; HAMMAR, T.; AHLGREN, S.; HANSSON, P. A.; STENDAHL, J. **Time-dependent global warming impact of tree stump bioenergy in Sweden**. Forest Ecology and Management, v. 371, p. 5-14, 2016.

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

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 72 p. Dissertação (mestrado em Ciência e tecnologia da madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PAULINO, E.J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto**. 2012. 54p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, Documento 38, 2000. 113p.

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.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade Energética de Resíduos Vegetais. **Biomassa & Energia**, Viçosa – MG, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.

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. D.; 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.

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.

REZENDE, G. C.; SUITER FILHO, W.; MENDES, C. J.; MORAIS, T. S. A. **Novas técnicas de espaçamentos para *Eucalyptus* spp.** *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Circular Técnica*, n. 130, p. 1 – 8. fev. 1981.

RILEY, J.P.; AND CHESTER R. *Introduction to marine chemistry.* Academic Press, London and New York. Xiv + 465 p. 1971.

RODRIGUES, L. D.; SILVA, I. T.; ROCHA, B. R. P., SILVA, I. M. O. **Uso de briquetes compostos para produção de energia no Estado do Pará.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 9, 2002, Campinas-SP. Anais...Campinas: Unicamp, 6p.

RÖSER, D.; ASIKAINEN A.; STUPAK, I. PASANEN, K. **Forest energy resources and potentials.** 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. 9 – 28.

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.

SANTANA, W.M.S. et al. **Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*.** *Cerne, Lavras*. v.18, n.1, p.1-8, 2012.

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.

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

SFA. SWEDISH FOREST AGENCY. **Stubbskörd: kunskapssammanställning och Skogsstyrelsens rekommendationer,** Meddeland, 2009. Disponível em:

<<https://shopcdn.textalk.se/shop/9098/art86/4645986-7abbef-1569.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2019.

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. **Variações da Densidade Básica e Características Anatômicas e Químicas da Madeira em *Eucalyptus spp.*** 1990. 93f. Dissertação (mestrado em Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

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.

SOARES, T. S.; CARNEIRO, A. de C.O.; GONÇALVES, E. de O.; LELLES, J.G. **Uso da biomassa florestal na geração de energia**. Revista Científica eletrônica de Engenharia Florestal , Garça, v. 4, n. 8, p. 1- 9, ago. 2006.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de pinus taeda**. FLORESTA, v.42, n.2, p.325-334. 2012.

SPADIM, E. R.; BRITO, C. M.; PASSOS, J. R. S.; GUERRA, S. P. S. Secagem, umidade e densidade de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 86-95.

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.

STUMM, W.; MORGAM, J.J. **Aquatic Chemistry – Na Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natura Waters**, John Wiley e Sons p. 583, New York, 1970.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. **Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 14, p.28-38, jun. 1987.

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.

THE WORLD BANK. **Transmitting renewable energy to the grid**. 2014. 4p. Disponível em: Acesso em: 21 mai. 2014.

THY, P.; JENKINS, B. M.; GRUDYIG, S.; SHIRAKI, R.; LESHER, C. E. **High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes**. Fuel, v. 85, n.6 p.783-795.2009.

TOMAZELLO FILHO, M. **Variação Radial da Densidade Básica em Estrutura Anatômica da Madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides***. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Piracicaba, n.36, p.35-42, ago.1987.

TOMAZELLO FILHO, M. **Variação Radial da Densidade Básica e da Estrutura Anatômica da Madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis***. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr. 1985a.

TOMAZELLO FILHO, M. **Variação Radial da Densidade Básica e da Estrutura Anatômica da Madeira do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis***. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Piracicaba, n.30, p.45-54, ago.1985b.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. 2012. 553 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal, Área de Concentração de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

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

VASAITIS, R.; STENLID, J.; THOMSEN, I. M.; BARKLUND, P.; DAHLBERG, A. **Stump removal to control root rot in Forest Stands**. A literature study. Silva Fennica, v. 42, p. 457-483, 2008.

VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. et al. **Wood characterization for energy application proceeding from pruning *Morus alba* L., *Platanus hispanica* Münchh. and *Sophora japonica* L. in urban areas**. Renewable Energy, v. 62, p. 478-483, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113004114>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

VITAL, B. R. et al. **Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal**. Revista árvore, Viçosa - MG, v. 10, n. 2, p. 151-60, 1986.

WALMSLEY, J. D.; GODBOLD, D. L. **Stump Harvesting for Bioenergy - A Review of the Environmental Impacts**. Forestry, v. 83, n. 1, 2010. doi:10.1093/forestry/cpp02

WESTFALL, P. H., TOBIAS, R. D., Rom, D., WOLFINGER, R. D.,HOCHBERG, Y. **Multiple Comparisons and Multiple Tests Using the SAS System**, Cary, NC: SAS Institute Inc, 1999.

YIN, C.-Y.. **Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses**. Fuel, v. 90, n. 3, p. 1128-1132, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110006460>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

ZABOWSKI, D., CHAMBREAU, D., ROTRAMEL, N. & THIES, W. G. (2008). **Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content**. Forest Ecology and Management, v. 255, n. 3-4, p. 720-727, 2008.