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

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

**HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR**

# PREDIÇÃO E CONTROLE DA UMIDADE DA MADEIRA PARA OTIMIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DE ENERGIA DE EUCALIPTO

**Botucatu**

**2019**

**HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR**

# PREDIÇÃO E CONTROLE DA UMIDADE DA MADEIRA PARA OTIMIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DE ENERGIA DE EUCALIPTO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Adriano W. Ballarin

Coorientador: Prof. Dr. Saulo P. S. Guerra

**Botucatu**

**2019**

E86p

Eufrade Junior, Humberto de Jesus

Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto / Humberto de Jesus Eufrade Junior. -- Botucatu, 2019

107 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Adriano Wagner Ballarin

Coorientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

1. Energia Fontes Alternativas. 2. Energia. 3. Propriedades físicas e químicas. 4. Cadeia de logística integrada. 5. Usinas termelétricas. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PREDIÇÃO E CONTROLE DA UMIDADE DA MADEIRA PARA OTIMIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DE ENERGIA DE EUCALIPTO

**AUTOR: HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR**
**ORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN**
**COORIENTADOR: SAULO PHILIPE SEBASTIÃO GUERRA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN
Engenharia Rural / FCA/Unesp

Prof. Dr. JOSÉ OTÁVIO BRITO
. / Instituto de Pesquisas e Estudo Florestais - IPEF (videoconferência)

Prof. Dr. EDER APARECIDO GARCIA
Agronegócio / FATEC Ourinhos

Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA
Departamento de Física e Biofísica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. HERNANDO ALFONSO LARA PALMA
Ciência Florestal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 28 de março de 2019

Aos meus amados pais,

Glaucia e Humberto,

Dedico

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e força para enfrentar os desafios diários.

A minha esposa Letícia, pelo apoio imensurável, carinho e afeto durante o tempo que dediquei a realização deste trabalho.

A minha família, por todo o auxílio, orações e cuidado.

Ao meu orientador, Professor Doutor Adriano Wagner Ballarin, por acreditar no meu potencial e me formar como pesquisador. Agradeço pelas horas dedicadas na minha formação, revisão e orientação desta tese.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Saulo P. S. Guerra, pela confiança no meu trabalho, parceria e atenção no desenvolvimento da tese.

Ao Professor Doutor Hernando Alfonso Lara Palma pelas dicas valiosas durante a condução do experimento.

A todos os integrantes do Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB), alunos de graduação, pós-graduação e estagiários de 2015-2019, que foram fundamentais para implementação das atividades de campo e laboratório.

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) por toda minha formação acadêmica. Em especial aos docentes e funcionários do Departamento de Ciência Florestal e do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia que me acolheram durante o doutorado e colaboraram para um ambiente profissional e harmonioso para desenvolvimento da tese.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de cursar o doutorado.

À Seção Técnica de Pós-Graduação (STPG) da FCA pela paciência nos trâmites do curso de doutorado.

À FEPE - Fazendas de Ensino, Pesquisa e Extensão/FCA pelo apoio na condução das atividades de campo.

Ao auxílio das empresas Marrari Automação Industrial e Sergomel na avaliação e montagem do experimento de campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo aporte financeiro por meio da bolsa de pesquisa - processo número 140145/2017-6.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desta tese e que por um breve momento não contemplei nesta dedicatória.

“Next time someone complains that you have made a mistake, tell him that may be a good thing. Because without imperfection, neither you nor I would exist”.

Stephen Hawking

## RESUMO

O aproveitamento da madeira na forma de cavacos para geração de energia requer uma cadeia produtiva mais eficiente nas diversas etapas que a compõe: colheita, baldeio, cavaqueamento, transporte, estocagem e sistemas de conversão. A umidade da madeira é fundamental no planejamento das operações florestais desta cadeia, pois condiciona o volume a ser cavaqueado, o número de caminhões necessários para transporte da matéria-prima, o tempo de estocagem no campo, entre outros, o que impacta economicamente a cadeia. No Brasil, seus efeitos ainda não foram mensurados por completo e algumas dúvidas ainda persistem, como a escolha na configuração das operações florestais menos onerosas e a umidade final entregue na indústria. Considerando este gargalo na produção florestal brasileira, o trabalho teve como objetivo principal investigar a umidade da madeira e quantificação de seu efeito nos custos da cadeia de produção de cavacos de madeira de *Eucalyptus* para geração de energia. Para alcançar esse objetivo, foi analisado o comportamento da umidade nas pilhas estocadas em diferentes formas (toras e cavacos) e estações do ano (época seca e chuvosa). O efeito da umidade no volume de madeira colhido nas três cadeias de operações florestais propostas e os seus respectivos custos operacionais foram determinados para abastecimento de uma termelétrica de referência. Os resultados encontrados inviabilizam o armazenamento da madeira na forma de cavacos ao ar livre (umidade final de 53,5% base úmida), exceto quando estocada com cobertura (umidade final de 34,3% base úmida). Em contrapartida, considerando o mesmo período de tempo, as toras atingiram uma umidade média de 35,5%. Houve um aumento no teor de cinzas da biomassa estocada no campo e no conteúdo energético para todas as classes de diâmetro avaliadas. Os modelos de predição de umidade em toras indicaram que a umidade relativa do ar e o tempo de estocagem (dias) foram as variáveis que mais explicaram a secagem da madeira. A cadeia de operações com a estocagem e transporte da madeira em toras, e a atividade de cavaqueamento na unidade de conversão foi a menos onerosa. A umidade da madeira nos cenários estudados ocasionou uma diferença de até 33% no custo unitário da energia gerada na termelétrica.



**Palavras-chave**: Pilhas de madeira. Tempo de estocagem. Curva de secagem. Poder calorífico. Custo operacional.

## ABSTRACT

The use of the wood in the form of chips for energy generation requires a more efficient production supply chain in the several steps that compose it: harvesting, forwarding, storage, chipping, transport and conversion systems. The moisture content of the wood is fundamental to plan the forestry operations of the production supply chain. Since the former affects the harvesting season and the volume to be chipped, the number of trucks needed to transport the raw material and the time of storage in the field, the chain is economically affected as well. In Brazil, the moisture wood content effects have not been fully evaluated yet. The lack is because the use of wood for energy requires the transformation into woodchips and therefore some concerns rise up in the choice of the less expensive forest operation and the final wood moisture to be delivered to the industry. The main objective was to investigate the wood moisture content and quantifying its effect on the costs of *Eucalyptus* woodchip supply chains for power generation. The wood moisture content in piles stored in different forms (logs and chips) and seasons of the year (dry and rainy season) were analysed. The effect of moisture content on the volume of wood harvested in the three forestry supply chains proposed and their respective operating costs were determined to supply a biomass power plant. The preliminary results made it impossible to store the wood in the form of chips in outdoor conditions (final moisture content of 53.5%, wet basis), except when stored under cover (final moisture content of 34.3%, wet basis). On the other hand, after 160 days of storage in the autumn and winter, logwood piles reached an average moisture content of 31.1% (wet basis). There was an increase in the ash content of the biomass stored in the field as well in the net caloric value for all the diameter classes evaluated. The predicted moisture content models of wood logs indicated that the relative air humidity and the storage time (days) were the variables that most explained the drying of the wood. The operations with a storage and transport of the wood in logs, and the chipping in the industry was one less onerous. The moisture content of wood in the studied scenarios caused a difference of up to 33% in the unit cost of energy generated in the biomass power plant.



**Keywords**: Woodpiles. Storage time. Drying curve. Heating value. Operational cost.

**SUMÁRIO**


| | | |
|---|---|---|
| | **INTRODUÇÃO GERAL** | **17** |
| | **REVISÃO DE LITERATURA** | **21** |
| | USO E QUALIDADE DA MADEIRA PARA BIOENERGIA | **21** |
| | CADEIA DE OPERAÇÕES DA MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA | **22** |
| | DESAFIOS NA ETAPA DA ESTOCAGEM DAS PILHAS DE MADEIRA | **24** |
| | **CAPÍTULO 1** | **26** |
| | **SECAGEM DE CAVACOS DE ÁRVORE INTEIRA PROVENIENTE DE FLORESTAS ENERGÉTICAS: UM CASO DE ESTUDO NO BRASIL** | **26** |
| 1.1 | INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 29 |
| 1.2.1 | Descrição do local | 29 |
| 1.2.2 | Colheita e cavaqueamento das árvores | 29 |
| 1.2.3 | Pilhas de cavacos e amostragem | 30 |
| 1.2.4 | Análise dos dados | 32 |
| 1.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 1.3.1 | Efeito da granulometria do cavaco | 32 |
| 1.3.2 | Efeito da cobertura | 34 |
| 1.3.3 | Variação de umidade diária das pilhas | 35 |
| 1.4 | CONCLUSÕES | 36 |
| | AGRADECIMENTOS | 37 |
| | REFERÊNCIAS | 37 |
| | **CAPÍTULO 2** | **39** |
| | **MODELOS DE PREDIÇÃO DE UMIDADE DE TORAS LONGAS DE MADEIRA ESTOCADAS EM PILHAS AO AR LIVRE** | **39** |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 40 |
| 2.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 42 |
| 2.2.1 | Caracterização da floresta e das pilhas de toras longas | 42 |
| 2.2.2 | Monitoramento da umidade das pilhas de madeira | 43 |
| 2.2.3 | Modelos de predição da umidade e dados meteorológicos | 46 |
| 2.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 48 |
| 2.4 | CONCLUSÕES | 55 |
| | AGRADECIMENTOS | 56 |
| | REFERÊNCIAS | 56 |
| | **CAPÍTULO 3** | **59** |
| | **QUALIDADE DAS TORAS DE EUCALIPTO PARA COMBUSTÃO DIRETA APÓS ESTOCAGEM AO AR LIVRE** | **59** |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 60 |
| 3.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 61 |
| 3.2.1 | Caracterização da floresta, do sítio e das pilhas de madeira | 61 |
| 3.2.2 | Qualidade da madeira como combustível | 64 |
| 3.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 66 |
| 3.3.1 | Efeito da estocagem nas propriedades físicas da madeira | 66 |
| 3.3.2 | Efeito da estocagem nas propriedades químicas da madeira | 71 |

3.4 CONCLUSÕES 74
AGRADECIMENTOS 74
REFERÊNCIAS 74
**CAPÍTULO 4 78**
**EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUTIVIDADE E NOS CUSTOS DA CADEIA DE OPERAÇÕES FLORESTAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA 78**
4.1 INTRODUÇÃO 79
4.2 MATERIAL E MÉTODOS 80
4.2.1 Cadeia de operações florestais 80
4.2.2 Demanda de madeira para abastecimento da termelétrica 82
4.2.3 Estimativa do custo operacional das operações florestais 82
4.2.4 Umidade da madeira de toras e cavacos durante a estocagem 86
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 87
4.4 CONCLUSÕES 95
AGRADECIMENTOS 95
REFERÊNCIAS 96
**CONSIDERAÇÕES FINAIS 99**
**REFERÊNCIAS 101**

# INTRODUÇÃO GERAL

As fontes renováveis representaram apenas 18,2% da matriz energética mundial no ano de 2016, muito aquém das não renováveis, caracterizadas pelos combustíveis fósseis – 79,5% – e energia nuclear – 2,2%. Das energias renováveis, as biomassas tradicionais – lenha e carvão vegetal – ainda são muito utilizadas para aquecimento domiciliar e cocção de alimentos em países em desenvolvimento (REN21, 2019).

A bioenergia, caracterizada pela utilização da biomassa sólida (lenha, carvão, bagaço, licor negro, pellets, resíduos animais e outros), resíduos sólidos urbanos, biogás e biocombustíveis, respondeu por 13% da energia primária consumida mundialmente e gerou em torno de 780 mil empregos diretos e indiretos no ano de 2018 (REN21, 2019). Estimativas recentes sugerem que seu uso continuará crescendo nas próximas décadas (POPP et al., 2014). Essa tendência ganha corpo com os desafios impostos pelas mudanças climáticas e com a necessidade de redução das emissões de gases causadores do efeito estufa. Como exemplo, tem-se o plano ambicioso da União Europeia para aumento da participação de combustíveis renováveis na sua matriz energética até o ano de 2020 (VIDAL; HORA, 2011).

No Brasil, as fontes renováveis representam 42,9% (2017) da matriz energética, com destaque para os produtos derivados da cana-de-açúcar (17,0%), energia hidráulica (12,0%) e lenha e carvão vegetal (8,0%). Quando analisadas em relação à energia elétrica gerada no país, têm uma participação ainda maior (80,4%), em grande parte devido às usinas hidrelétricas (65,2%), embora a biomassa já se consolide como a segunda fonte renovável mais importante (8,2%) (BRASIL, 2018).

No estado de São Paulo, a bioenergia é particularmente estimulada pelo novo Plano Paulista de Energia, que tem como meta renovar grande parte da matriz energética até o ano de 2020; a biomassa florestal, principalmente a de eucalipto, aparece como uma alternativa (SÃO PAULO, 2012). Outras iniciativas também têm alavancado o avanço da bioenergia, como o Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN), criado em 2008 para estimular e articular as atividades de pesquisa e desenvolvimento em áreas relacionadas à produção da bioenergia (SOUZA et al., 2015) e a criação do Centro Paulista de Pesquisa em Bioenergia – SP BIOEN Research Center (SPBioenRC) – constituído pelas três universidades estaduais paulistas - USP, UNICAMP e UNESP, e a FAPESP. Esses cenários

reforçam ainda mais a biomassa como uma das principais fontes energéticas nas próximas décadas, principalmente no estado paulista.

Para geração de energia elétrica, a madeira é utilizada na forma de cavacos para minimizar os problemas de manuseio, estocagem e transporte, bem como para melhorar a conversão energética, por meio da redução no tamanho das partículas e homogeneização da composição (CANTO, 2009). Nos grandes centros consumidores internacionais, a comercialização da madeira para geração de energia ocorre na forma de cavacos ou pellets. No norte da Europa, esses materiais são tradicionalmente usados em fornos residenciais para aquecimento e para geração de eletricidade (IEA, 2008).

Os cavacos são produzidos principalmente a partir de florestas plantadas para esse fim ou resíduos obtidos de colheita florestal - ramos, copas das árvores, desbastes e cascas - e madeiras de valor inferior - madeira de descarte, como por exemplo, a oriunda de demolições (LAMERS et al., 2012).

A floresta plantada de eucalipto é a principal fonte de lenha e carvão disponível para queima no Brasil (IBÁ, 2017); a produtividade média dessas florestas manejadas com ciclo de corte de 6 anos é de 22 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$(BINKLEY et al., 2017). Os plantios ocupam 5,67 milhões de hectares no país e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul (IBÁ, 2017).

O crescimento do interesse no uso da madeira para geração de energia, nos últimos anos, vem acompanhado da necessidade de estudos ligados ao tratamento da biomassa para a melhoria de sua qualidade energética (BRAND; MUÑIZ, 2012). A otimização dos processos de armazenamento, secagem e o fornecimento de um combustível homogêneo são fundamentais para o desenvolvimento de uma cadeia operacional mais eficiente e com alto rendimento energético.

Neste sentido, considera-se que um dos fatores mais importantes no uso da madeira como insumo energético está relacionado ao custo de colheita e transporte da matéria-prima (MÜLLER, 2005). Ainda são escassas as informações sobre a viabilidade econômica da cadeia de produção dos cavacos que englobam as etapas de colheita, baldeio, cavaqueamento, transporte, estocagem e queima, e são fundamentais para consolidá-los como alternativa. Algumas dúvidas ainda persistem, como o momento ideal da etapa de cavaqueamento e estocagem da madeira.

A estocagem é realizada para secagem da madeira na forma de toras ou cavacos e é considerada uma etapa muito importante, pois afeta o conteúdo

energético, a qualidade do material (variação nas propriedades físicas e químicas) e os custos de transporte (JIRJIS, 1995; HAKKILA, 2003). As diferentes formas de aproveitamento dos cavacos dificultam a escolha de um sistema único de estocagem e secagem (JIRJIS, 1995). Os conceitos teóricos que balizam o equacionamento deste problema envolvem tanto as situações logísticas quanto as que estão relacionadas à qualidade da madeira (umidade, densidade, granulometria e conteúdo energético).

Dentre as propriedades da madeira, a umidade, que geralmente é reportado em base úmida quando utilizado para avaliações energéticas (BRAND, 2010, ACUNA et al., 2012), é fundamental no planejamento logístico das cadeias produtivas, pois afeta a época de colheita e o volume a ser cavaqueado, o número de caminhões necessários para transporte da matéria-prima, o tempo de armazenamento no campo, entre outros (SOSA et al., 2015).

Os efeitos da umidade e do tempo de estocagem no processo como um todo ainda não foram contabilizados por completo. A maioria das informações aplicadas às pilhas de madeira, sobretudo as cavaqueadas, foi obtida a partir de estudos com condicionantes europeus ou da América do Norte, não podendo ser estendida, num primeiro momento, para as condições tropicais. Os trabalhos nacionais desenvolvidos na última década (SILVÉRIO et al., 2008; BRAND et al., 2011; ZANUNCIO et al., 2015) enfocam estritamente a qualidade da madeira empilhada em toras, sem levar em consideração seus efeitos nas cadeias de operações florestais.

O comportamento das pilhas de cavacos utilizadas nas indústrias de painéis de madeira, bem como de celulose e papel são distintos do observado nas pilhas de cavacos para utilização energética: no primeiro caso, o período de estocagem é pequeno – poucos dias – em função da demanda fabril; no segundo caso, a estocagem para secagem é estendida por mais tempo – meses – tendo-se o problema adicional da ação de microrganismos que degradam a matéria seca e, consequentemente, diminuem o rendimento energético nos fornos ou nas caldeiras.

A dificuldade é maior quando se avaliam cenários com os condicionantes maiores, como a distância entre a termelétrica e a fonte de madeira, umidade inicial da madeira, umidade demandada pela indústria, época do ano e demanda da unidade de conversão. Ainda, não foi estudada qual seria a configuração das operações florestais menos onerosa no desempenho das etapas de colheita e baldeio, estocagem, cavaqueamento e transporte da matéria prima.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar a umidade da madeira e quantificação de seu efeito nos custos de diferentes cadeias de produção de cavacos de florestas de *Eucalyptus* para geração de energia. Tem, ainda, como objetivos específicos:

- Estabelecer as curvas e taxas de secagem da madeira estocada na forma de toras e cavacos ao longo do tempo;
- Estudar o efeito da estocagem na composição química imediata e no conteúdo energético da madeira;
- Apropriar os custos das etapas de cavaqueamento, estocagem e transporte da madeira nos diferentes sistemas logísticos;
- Calcular o volume de madeira necessário para suprir a demanda de uma termelétrica, considerando diferentes tempos e épocas de estocagem;
- Investigar uma solução para o aproveitamento dos cavacos para geração de energia elétrica no menor custo possível considerando diferentes cadeias de operações florestais e seus respectivos condicionantes de estocagem.

Para isso, o estudo seguiu três vertentes: a primeira relacionado à estocagem de pilhas de cavacos de madeira; a segunda, a estocagem de pilhas de madeira em toras, e por fim, a determinação do custo das operações florestais.

# REVISÃO DE LITERATURA

## Uso e qualidade da madeira para bioenergia

A madeira é a mais antiga fonte de energia da sociedade. A sua utilização para cocção de alimentos e aquecimento ainda é fundamental para mais de dois bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento. O carvão e a lenha são as principais formas de utilização da madeira no mundo e representam 74% de todas as biomassas utilizadas para energia (FAO, 2010). O uso da madeira proporciona vários benefícios, dentre eles: fornecimento de um combustível renovável; uma matriz energética mais limpa e maiores taxas de geração de emprego por recurso monetário investido (BRITO, 2007).

De forma geral, a madeira pode ser convertida em uma variedade de produtos químicos e de energia, incluindo combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007; ROCKWOOD et al., 2008). No Brasil ela é aproveitada como fonte energética sob diversas formas: (I) carvão vegetal utilizado como redutor em fornos siderúrgicos e fábricas de cimento; (II) lenha para queima direta − utilizada no comércio (padarias, restaurantes, hotéis) ou fábricas de cerâmicas, olarias, entre outros; (III) lenha e cavacos de madeira para alimentar usinas termelétricas a vapor; (IV) sistemas de gaseificação da madeira e do carvão vegetal para produção de calor industrial, combustível para motores e turbinas, gás redutor para siderurgia, gás de síntese para metanol, amônia e outros; (V) na forma de resíduos gerados na colheita florestal ou processos industriais (serragem, maravalhas, moinha de carvão e licor negro) aproveitados em sistemas de cogeração, usinas termelétricas e refinarias de biomassa (MÜLLER, 2005).

Para a geração de energia térmica ou elétrica, a madeira é utilizada na forma de cavacos que podem ser oriundos da árvore inteira, incluindo as frações do tronco, galhos e folhas (EUFRADE JUNIOR, 2016) ou só do fuste com e sem casca (LEINONEN, 2004). Embora o tamanho ideal dos cavacos para o aproveitamento energético dependa do sistema de queima utilizado, sendo aproveitado com granulometrias variando de 3 a 100 mm no geral, eles possuem 25 mm de comprimento e largura, e 6 mm de espessura (BADGER, 2002; FRANCESCATO et al., 2008). Os cavacos de madeira (*wood chips*) com menores dimensões e geometria

bem definida são comumente utilizados em pequenos fornos, por causa da facilidade de carregamento. Os cavacos com maiores dimensões ou os irregulares (*hog fuel*) são usados em grandes fornos com equipamentos mais robustos (SAVOIE et al., 2014).

As propriedades da biomassa têm implicações para o manuseio de matéria-prima, transporte, secagem, armazenamento e para o arranjo dos sistemas de conversão de energia (SENELWA; SIMS, 1999). A disponibilidade e o controle de qualidade no aproveitamento dos cavacos da madeira também são essenciais para a confiabilidade operacional e de combustão eficiente de todos os sistemas de conversão (BADGER, 2002; HAKKILA, 2003).

A umidade tem influência em toda cadeia produtiva (SOSA et al., 2015), no conteúdo energético (SENELWA; SIMS, 1999) e é determinante para escolha do sistema de armazenamento e secagem da biomassa entre o período da colheita e sua utilização energética (JIRJIS, 1995). Na prática, quando a biomassa está com 50% a 55% de umidade (base úmida), é necessário utilizar um combustível suplementar (gás natural ou óleo diesel, por exemplo) para alimentar a caldeira (JENKINS et al., 1998).

A densidade da madeira também é muito importante no sistema de aproveitamento dos cavacos, pois tem influência direta nos custos de manuseio e transporte. Para resíduos florestais, Leinonen (2004) reportou valores de densidade a granel de cavacos de 130 a 180 kg $m^{-3}$ para a umidade variando de 30% a 50% (b.u.).

O conteúdo energético também é imprescindível para aumentar a eficiência nos sistemas de conversão. No geral, são reportados valores médios de poder calorífico superior (PCS) de 14 MJ $kg^{-1}$ a 21 MJ $kg^{-1}$ para diversas biomassas (DEMIRBAS, 2004), para a madeira, o PCS é de 18,8 MJ $kg^{-1}$ (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Na prática, utiliza-se o poder calorífico útil ou líquido (PCU) que leva em consideração a umidade e é definido como a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (TELMO; LOUSADA, 2011, BRITO, 1993).

**Cadeia de operações da madeira para geração de energia elétrica**

As operações para aproveitamento energético dos recursos florestais compreendem a colheita, baldeio, estocagem, cavaqueamento e transporte até a unidade de conversão (ACUNA et al., 2012a; JIRJIS, 2009). Elas podem ser

organizadas em diversas vias (Fig.1) que se diferenciam em função do tipo de biomassa a ser utilizada (toras ou resíduos florestais – galhos, tocos e raízes) e da ordem das operações (cavaqueamento e sobretudo o transporte).

**Figura 1 – Cadeias de operações da biomassa florestal.**

Fonte: Forest Energy Portal (2015).

O transporte da matéria-prima é um componente condicionante no custo da utilização de energia a partir da biomassa (SEARCY et al., 2007). De modo geral, o transporte rodoviário é indicado para pequenas distâncias (menor que 100 km), o ferroviário para distâncias maiores, e o hidroviário é uma opção para longas distâncias, maiores que 800 km (HAMELINCK et al., 2005). No Brasil, o transporte dos cavacos é predominantemente realizado por sistema rodoviário (SEIXAS, 2001), sendo sua viabilidade condicionada a distância entre a fonte produtora e a termelétrica.

Outra atividade onerosa é o processo de cavaqueamento que em algumas situações pode contribuir muito para o custo da cadeia florestal (GHAFFARIYAN et al., 2014; ACUNA et al. 2012b). Este custo pode variar em função da umidade da madeira, seja o cavaqueamento da madeira úmida (recém-cortada) ou seca (após estocagem) (ACUNA et al., 2012a), e também, devido aos modelos dos picadores florestais (SPINELLI et al., 2019).

Ao longo dos anos, a busca de cadeias mais eficientes e menos onerosas levaram ao desenvolvimento de modelos logísticos, baseados sobretudo em

programação linear, como os reportados por Eriksson e Björheden (1989), Gunnarsson et al. (2004) e Kanzian et al. (2007). Na Austrália, Acuna et al. (2012b) alcançaram maiores economias nas etapas de transporte e cavaqueamento, respectivamente 52% e 29% no custo, utilizando um simulador conhecido como Fast Truck. Outros esforços foram realizados colocando a umidade da madeira como parâmetro-chave, por exemplo, Acuna et al. (2012a) desenvolveram um programa computacional – BIOPLAN – para estudar o efeito da umidade da madeira entregue na indústria nos custos das atividades na cadeia florestal ao longo do ano.

A busca de uma cadeia de operações florestais menos onerosa pode incentivar ainda mais os cavacos de madeira como uma fonte energética no Brasil, contribuindo para uma matriz mais limpa e renovável.

**Desafios na etapa da estocagem das pilhas de madeira**

A biomassa da floresta de ciclo curto pode fornecer uma valiosa fonte de energia (EUFRADE JUNIOR, 2016; GUERRA et al., 2014), mas a manutenção da qualidade desse material durante o manuseio e armazenamento ainda é um desafio. A madeira jovem é altamente propensa à degradação microbiana e pode, consequentemente, sofrer alterações na qualidade como combustível (JIRJIS, 2005), ocasionando perdas altas de matéria seca, redução do valor energético, risco de autoignição e potencial de risco para a saúde humana devido à exposição a micrósporos no ar (BARONTINI et al., 2014).

A composição química da madeira com casca pode variar em função da época de colheita das árvores (BRAND et al., 2011), o que torna ainda mais importante. De fato, a estocagem é uma ferramenta que influencia diretamente a eficiência energética do material.

Para a estocagem da madeira na forma de cavacos, Garstang et al. (2002) observaram que a umidade teve seu valor reduzido de 50% para 30% em pilhas não revolvidas na Inglaterra e Kofman (2006) registrou uma diminuição de umidade de 2 a 3% por mês no norte da Europa. No Brasil, ainda restam dúvidas sobre esses valores para cavacos de eucalipto com propósitos energéticos.

Para toras de 2,4 m de comprimento empilhadas em Lages-SC, Brand et al. (2011) constataram que o eucalipto apresentou melhores resultados que

o pinus, perdendo umidade mais rápido, com menores alterações na composição química e produção de maior ganho energético ao longo do tempo de armazenamento. Os mesmos autores ainda reportaram que para obter o melhor desempenho energético em ambas as espécies, a época ideal de estocagem seria no verão por um período de, no máximo, quatro meses.

Zanuncio et al. (2015) monitoraram toras de 1,2m de comprimento provenientes de três posições (base, meio e topo) do fuste de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*. Os autores constaram que o menor diâmetro aumenta a taxa de secagem e as toras do meio e do topo do fuste atingiram teores de umidade abaixo de 26% base úmida (umidade desejada para a carbonização) depois de 90 dias no campo.

Para toras longas (maiores de 6m de comprimento), existem dúvidas sobre o comportamento da umidade em relação ao diâmetro e comprimento, efeito das condições meteorológicas, e da qualidade da madeira para bioenergia após a estocagem.

# CAPÍTULO 1
# SECAGEM DE CAVACOS DE ÁRVORE INTEIRA PROVENIENTE DE FLORESTAS ENERGÉTICAS: UM CASO DE ESTUDO NO BRASIL

Eufrade-Junior, H. J.[1]; Oguri, G.[2]; Melo, R. X.[1]; Guerra, S. P. S.[1], Ballarin, A.W.[1]

[1]Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

[2]Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF)
Via Comendador Pedro Morganti 3500, Piracicaba – SP

RESUMO

Os autores estudaram um sistema de secagem ao ar de cavacos de árvore inteira proveniente de florestas jovens de *Eucalyptus* manejadas no sistema florestal de curta rotação (SFCR). A biomassa de plantações de alta densidade de *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idades foi estocada em quatro pilhas. Pilhas de cavacos de 5mm, 15mm e 30mm de comprimento foram colocadas em superfície cimentada para avaliar o efeito da secagem. Uma pilha adicional com cavacos de 30 mm de comprimento foi instalada para avaliar o efeito da cobertura. As pilhas não revolvidas e descobertas não apresentaram efeito do tamanho dos cavacos, e a umidade final foi de 48,4% a 53,5%, e a temperatura no interior das pilhas (temperatura de estocagem) foi de 36°C. Entretanto, a cobertura mostrou um efeito positivo no processo de secagem dos cavacos, e colaborou para obtenção de uma umidade abaixo de 35% (base úmida). Entre as pilhas de estocagem avaliadas, a maior perda de umidade foi encontrada para a pilha coberta (0,197% $dia^{-1}$) nos primeiros 30 dias de estocagem.

**Palavras-chave**: Pilhas de cavacos de madeira, período de secagem, variação de umidade diária, sistemas de estocagem.

**Drying of whole-tree chips from high-density energy plantations of *Eucalyptus*: a case study in Brazil**

ABSTRACT

The authors studied an air-drying system of whole-tree chip storage from young *Eucalyptus* plantation managed at short rotation coppice. The biomass was converted from high-density energy plantations of *Eucalyptus grandis* at 2 years old into four piles. Wood chip particles had 5mm, 15mm and 30mm length were disposed on a paved surface to evaluate the effect on the chip drying. An additional covered pile (30mm wood chip) was installed to evaluate the effect of coverage condition. The non-ventilated and uncovered piles were not affected by wood chip length, and the final moisture content was of 48.4% to 53.5% and temperature inside the piles (storage temperature) was approximately 36°C. However, the coverage showed beneficial effect on drying wood chip process, collaborating to keep the MC lower than 35%, conventionally recommended for energy purposes. Among storage systems studied, the higher daily moisture change was assigned to covered pile (0.197% $day^{-1}$) during the first 30 days of storage.

**Keywords**: wood chips piles, drying period, daily moisture change, storage systems.

## 1.1 INTRODUÇÃO

Devido suas características energéticas, o interesse pela biomassa florestal está crescendo em todo o mundo. No Brasil, as plantações com alta densidade de plantio manejada no sistema florestal de curta rotação (SFCR) são alternativas para atingir uma alta produtividade e gerar uma gama de produtos florestais para energia, como lenha, madeira na forma de cavacos e lascas [1]. A colheita dessas florestas energéticas inclui toda biomassa acima do solo que é cavaqueada e utilizada para energia, diferente da colheita convencional onde são aproveitados fustes de árvores sem casca [2]. O cavaco produzido pode variar em seu tamanho e forma de acordo com o tipo de picador utilizado [3].

Os SFCR utilizam espécies de rápido crescimento, alta densidade de plantio e ciclos curtos [4]. Levando em conta esses aspectos silviculturais, as espécies de

*Eucalyptus* se tornaram atrativas para esse uso final, ainda mais, as condições climáticas do Brasil oferecem condições ideais para seu cultivo [5]. Como resultado dessa adaptabilidade, os SFCR de *Eucalyptus* com densidade de plantio de 7000 árvores $ha^{-1}$, atinge uma produtividade de até 100 t $ha^{-1}$ de biomassa seca com ciclo de corte entre 2 e 3 anos [1]. Atualmente, as florestas de *Eucalyptus* ocupam uma área de 5,56 milhões de hectares no Brasil [6] com a grande maioria da área manejada de forma convencional (1667 árvores $ha^{-1}$) para produção de papel e celulose.

A biomassa recém-colhida tem um alto teor de água e pode afetar toda a logística da cadeia de operações florestais, como a época de colheita, o volume de biomassa a ser colhido em cada intervalo de tempo, o transporte para abastecer a termelétrica, o período de estocagem no campo, e outros [7].

A estocagem aparece com uma oportunidade para diminuir a umidade. Entretanto, o comportamento de pilhas de cavacos de madeira em condições tropicais não é bem conhecido. Também, há uma falta de informação na literatura para essas condições climáticas.

De madeira adicional, a temperatura no interior das pilhas de cavacos é um fator crucial durante o tempo de estocagem de resíduos florestais [8]; e a alta temperatura implica em uma rápida degradação biológica dos cavacos e, como consequência, uma rápida perda de massa seca [9]. Segundo Kofman [10], temperaturas nas pilhas iniciam entre 10 a 20°C e pode alcançar mais de 90°C, mas raramente levarão a uma autocombustão. Além disso, a estocagem pode afetar a qualidade da biomassa (propriedades físicas e químicas) e custos logísticos [11,12].

O conhecimento sobre pilhas de cavacos foi obtido, sobretudo em estudos europeus e norte-americanos, e não podem ser estendidos, em um primeiro momento, para as condições tropicais. Trabalhos publicados, como aqueles reportados por Brand et al. [13] e Zanuncio et al. [14] no Brasil, avaliaram apenas a estocagem da madeira na forma de toras.

Desta forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a secagem ao ar de cavacos proveniente de SFCR de *Eucalyptus*. Essa avaliação foi baseada no monitoramento da umidade e temperatura das pilhas de cavacos de árvores-inteiras, mensurando esse efeito em diferentes granulometrias de cavacos e cobertura.

## 1.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 1.2.1 Descrição do local

Este estudo foi realizado no município de Botucatu (22º50'21"S e 48º25'20"O) localizado no Estado de São Paulo, Brasil. O plantio cresceu em nitossolo com baixa drenagem, em relevo plano, e 790m de altitude. A precipitação média anual é de 1400 mm $ano^{-1}$, e temperatura média de 20°C.

A biomassa foi colhida de sistemas florestais de curta rotação e está descrita na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Caracterização da floresta.

| Características da floresta | Unidade | |
|---|---|---|
| Espécie | | *Eucalyptus grandis* |
| Clone | | G-21 |
| Idade | anos | 2 |
| Densidade de plantio | árvores $ha^{-1}$ | 6667 |
| Altura | m | 9,6 |
| DAP | cm | 6,4 |
| Área basal média | $m^2$ $ha^{-1}$ | 23,5 |
| Produtividade | t MS $ha^{-1}$ | 24,3 |
| Densidade básica da madeira | kg $m^{-3}$ | 355 |
| PCS (biomassa colhida) | MJ $kg^{-1}$ | 17,5 |

MS – biomassa seca, DAP – diâmetro a altura do peito, PCS – poder calorífico superior.

### 1.2.2 Colheita e cavaqueamento das árvores

A máquina utilizada foi uma forrageira New Holland modelo FR9060 acoplada com um cabeçote modelo NH 130FB. O sistema de colheita utilizado foi o de cavaqueamento que teve como característica principal o corte na base da árvore e a transformação da árvore inteira em cavacos [15]. O corte da base da árvore foi realizado por duas serras circulares de aproximadamente 5 cm acima do solo e rotação de 3000 rpm, resultando em um corte total que promove o desenvolvimento da rebrota. No processo de corte, as árvores são conduzidas para um picador a tambor por meio de rolos alimentadores. O picador é localizado no interior da forrageira, e é dividido em duas seções equipadas com oito facas em cada uma.

A granulometria do cavaco pode ser selecionada pelo operador para qualquer valor entre 5 e 30mm, o cavaco de madeira é movimentado por um soprador em tubo de saída em direção a um transbordo durante o sistema de colheita [16].

### 1.2.3 Pilhas de cavacos e amostragem

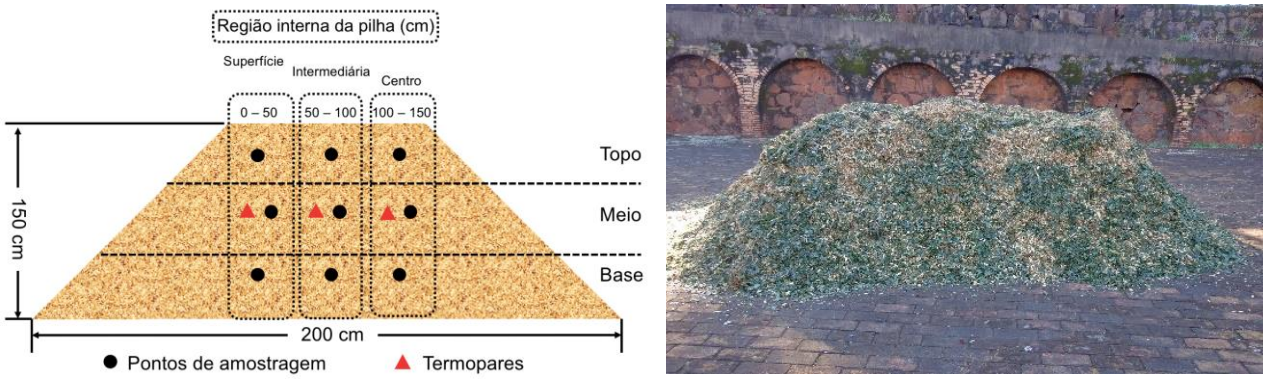
As pilhas de cavacos provenientes de árvores inteiras (150 × 200 × 300 cm) foram montadas em local cimentado (também utilizado para secagem de grãos de café) no formato trapezoidal. Três pilhas descobertas de 9 m³ foram formadas com diferentes granulometrias de cavacos (5 mm, 15 mm e 30 mm). Também, uma pilha de 30 mm de tamanho foi colocada em um barracão para avaliar o feito da cobertura. O tamanho e o formato das pilhas foram moldados de acordo com a capacidade de carga do caminhão disponível no momento da colheita. A altura do barracão foi determinante para escolha do caminhão basculante adequado para descarregar os cavacos de madeira.

Para determinação da umidade, três amostras compostas foram coletadas de cada pilha de pelo menos três pontos diferentes e divididos igualmente pela altura da pilha – topo, médio e base (30 cm acima do solo); para cada região interna da pilha – superfície (0 – 50 cm), intermediária (50 – 100 cm) e centro (100 –150 cm), totalizando pelo menos nove diferentes pontos de amostragem. O teor de água das amostras compostas foi obtido de acordo com a norma ASTM E871–82 [17] em laboratório.

A temperatura no interior das pilhas (ou temperatura de estocagem) foi medida utilizando três termopares tipo T instalados no meio da pilha e nas mesmas posições internas citadas anteriormente. O esquema de amostragem foi mostrado na Figura 1.1.

As pilhas foram monitoradas durante o período de 6 de junho de 2013 a 11 de outubro de 2013, totalizando 126 dias. O estudo compreendeu a estação de inverno inteira (os primeiros 85 dias de experimento) e o começo da primavera (os últimos 41 dias de experimento).

**Figura 1.1 – Foto da pilha de cavaco de madeira de árvores inteira (à direita) e esquema dos pontos de amostragem na pilha (à esquerda).**




Devido um atípico inverno chuvoso, o período de secagem foi dividido de acordo o total de precipitação detalhado na Tabela 1.2. O monitoramento iniciou após a montagem das pilhas no campo e seus termopares, dois dias após a colheita.

Tabela 1.2 – Condições meteorológicas durante o período de estocagem das pilhas.

| Estocagem (dias) | Precipitação total (mm) | Temperatura (°C) | Velocidade do vento (m $s^{-1}$) | Radiação solar (MJ $m^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|
| Início-30 | 105 | 17,9 | 0,62 | 7,1 |
| 30-90 | 44 | 18,2 | 0,90 | 11,4 |
| 90-126 | 151 | 19,4 | 0,93 | 13,6 |

Também, a variação de umidade diária ou "*daily moisture change*" (DMC) foi calculada pela Equação 1.1. Ela é definida pela quantidade e a variação de umidade diária durante o período de armazenamento e deve ser relacionada com os períodos de tempo [18]. Esse parâmetro é importante, já que o DMC pode ser utilizado em futuros trabalhos para construção de algoritmos de predição de curva natural de secagem para a madeira estocada.

$$\mathrm{DMC} = \frac{\mathrm{UBU}}{\mathrm{ND}} \tag{1.1}$$

Em que,

UBU – Variação da umidade (base úmida) no período observado, %;

ND – Número de dias de estocagem.

### 1.2.4 Análise dos dados

As pilhas foram agrupadas separadamente para avaliar o efeito da granulometria (pilhas descobertas de 5, 15 e 30 mm) e da cobertura (somente pilhas de 30 mm de tamanho) no teor de água e temperatura de estocagem durante o período de secagem.

A normalidade dos dados foi verificada usando o teste de Shapiro-Wilk ($p$<0,5). Posteriormente, a análise de variância (ANAVA), complementada pelo teste de Tukey ($p$<0,5), avaliaram o efeito da granulometria e cobertura.

Estatística descritiva (tendência central) foi utilizada para a variação de umidade diária (DMC) dos sistemas de estocagem.

## 1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1.3.1 Efeito da granulometria do cavaco

A granulometria do cavaco de madeira não afetou a umidade. Por outro lado, a temperatura de estocagem foi afetada pelo maior tamanho do cavaco após 30 dias de estocagem como mostrado na Tabela 1.3.

Foi observada uma maior variação da umidade entre as regiões da pilha (superfície, intermediária e central) de até 33,3%. Isso pode ser explicado pela maior influência das condições ambientais na superfície do que nas regiões internas.

Outro ponto importante é que os tamanhos dos cavacos no estudo não propiciaram uma circulação de ar do ambiente para o interior das pilhas, mantendo o calor e a umidade constante ao longo da estocagem para as regiões intermediária e central.

Tabela 1.3 – Efeito da granulometria na umidade e temperatura de estocagem das pilhas de cavacos de madeira ao ar.

| Parâmetros | Estocagem (dias) | Granulometria | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 mm | | | | 15 mm | | | | 30 mm | | | |
| | | S | INT | C | Média ± DP | S | INT | C | Média ± DP | S | INT | C | Média ± DP |
| Umidade (base úmida - %) | Início | 48,8 | 58,1 | 59,4 | 55,4 ± 5,8 a | 45,5 | 58,4 | 58,8 | 54,2 ± 7,6 a | 43,4 | 60,3 | 59,7 | 54,5 ± 9,6 a |
| | 30 | 55,2 | 61,5 | 56,5 | 57,7 ± 3,3 a | 44,5 | 66,1 | 63,5 | 58,0 ± 11,8 a | 56,8 | 67,9 | 66,0 | 63,6 ± 6,3 a |
| | 90 | 27,0 | 54,7 | 60,3 | 47,3 ± 17,8 a | 44,1 | 60,7 | 57,0 | 53,9 ± 8,7 a | 39,2 | 68,8 | 63,4 | 57,1 ± 15,8 a |
| | 120 | 32,5 | 52,2 | 60,6 | 48,4 ± 14,4 a | 38,1 | 52,5 | 51,9 | 47,5 ± 8,2 a | 31,7 | 55,6 | 58,7 | 53,5 ± 6,6 a |
| Temperatura (°C) | Início | 36,0 | 36,4 | 37,0 | 36,5 ± 0,5 a | 34,1 | 36,9 | 34,9 | 35,3 ± 1,4 a | 31,0 | 35,0 | 36,8 | 34,3 ± 3,0 a |
| | 30 | 40,3 | 44,1 | 43,9 | 42,8 ± 2,1 a | 37,3 | 38,6 | 38,4 | 38,1 ± 0,7 b | 29,8 | 31,5 | 31,3 | 30,9 ± 0,9 c |
| | 90 | 27,2 | 36,4 | 37,8 | 33,8 ± 5,8 a | 31,8 | 36,7 | 31,7 | 33,4 ± 2,9 a | 27,2 | 33,4 | 34,8 | 31,8 ± 4,0 a |
| | 120 | 34,3 | 36,1 | 38,0 | 36,1 ± 1,9 a | 37,2 | 36,6 | 35,3 | 36,4 ± 1,0 a | 34,3 | 36,1 | 38,0 | 36,1 ± 1,9 a |

S (superfície), INT (intermediário) e C (centro) – regiões internas da pilha. As médias não se diferem para um nível de significância $p<0,05$ pelo teste de Tukey para as mesmas letras na mesma linha.

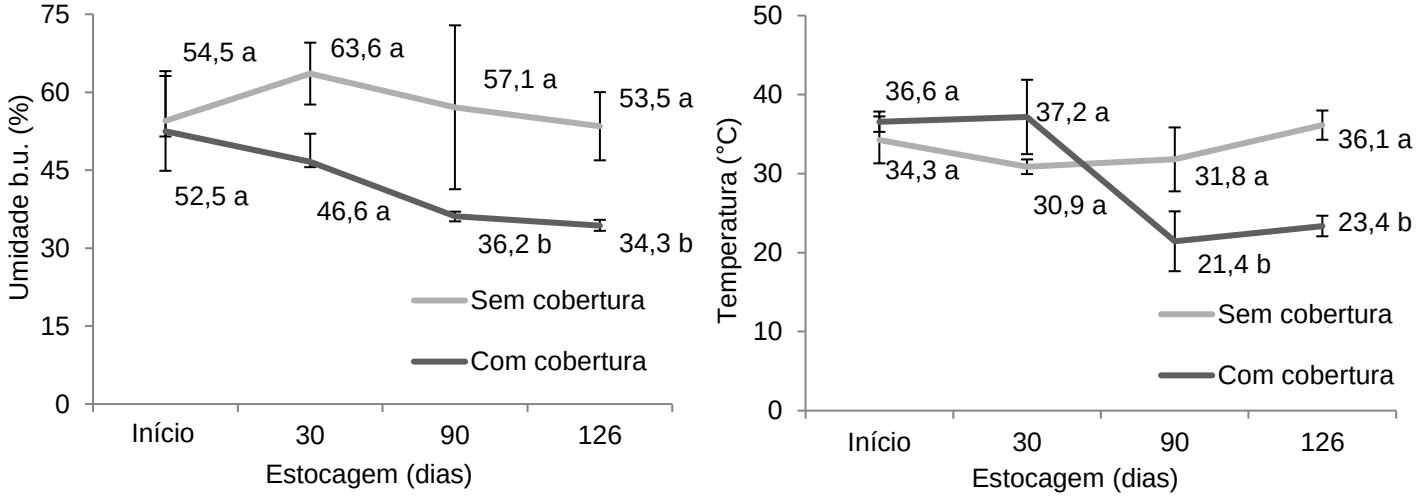
As pilhas sem revolvimento e descobertas não atingiram 35% de umidade (base úmida), que é convencionalmente assumida como referencial, abaixo do qual os cavacos deveriam ser comercializados visando a eficiência na combustão direta. Diferentemente do que encontrado para toras de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* após 90 dias de secagem natural no Brasil [14]. Assim, o cavaqueamento usado no SFCR sugere que a biomassa deveria ser transportada imediatamente após a colheita florestal ao invés do armazenamento no campo.

A temperatura de estocagem variou entre 30,9°C e 42,8°C e corrobora com estudos anteriores com pilhas de cavacos [9,19]. As temperaturas foram iguais estatisticamente, exceto para os 30 dias após o período de secagem, onde foram observados menores valores para a maior granulometria. Esse comportamento também foi descrito por Jirjis [20] que estudou a influência da granulometria e da pilha na estocagem de *Salix viminalix* na Suécia. Essas baixas temperaturas de estocagem são importantes para controlar o auto aquecimento nos sistemas de estocagem.

### 1.3.2 Efeito da cobertura

O sistema de cobertura propiciou que os cavacos atingissem uma umidade abaixo de 35% e pode ser uma alternativa frente à estocagem descoberta (Figura 1.2). Também, possibilitou uma diminuição da temperatura no interior das pilhas e consequentemente pode reduzir a taxa de degradação biológica.

**Figura 1.2 – Efeito da cobertura na umidade e temperatura nos cavacos com granulometria de 30 mm durante a estocagem.**




As médias não se diferem para um nível de significância p<0,05 pelo teste de Tukey para as mesmas letras no mesmo período de estocagem.

Devido à coleta de amostras de diferentes pontos internos na pilha de cavacos, o desvio-padrão da umidade nas pilhas cobertas durante a estocagem indica que a secagem dentro da pilha foi mais homogênea do que a pilha descoberta (Tabela 1.4).

Tabela 1.4 – Umidade e temperatura de estocagem nas pilhas cobertas.

| Parâmetros | Estocagem (dias) | Granulometria 30 mm (coberto) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Superfície | Intermediário | Centro | Média ± Desvio padrão |
| Umidade dos cavacos (base úmida - %) | Início | 40,7 | 61,4 | 55,4 | 52,5 ± 10,6 |
| | 30 | 40,5 | 50,8 | 48,4 | 46,6 ± 5,4 |
| | 90 | 36,2 | 37,0 | 35,3 | 36,2 ± 0,9 |
| | 126 | 35,6 | 33,4 | 34,0 | 34,3 ± 1,1 |
| Temperatura de estocagem (°C) | Início | 35,1 | 37,5 | 37,1 | 36,6 ± 1,3 |
| | 30 | 32,6 | 42,0 | 36,9 | 37,2 ± 4,7 |
| | 90 | 18,2 | 20,5 | 25,6 | 21,4 ± 3,8 |
| | 126 | 22,1 | 23,3 | 24,7 | 23,4 ± 1,3 |

No sistema coberto, a umidade reduziu significativamente aos 90 dias de estocagem e está associada a menor precipitação pluviométrica encontrada no inverno. Também, destaca-se o maior efeito “chaminé” que propicia uma corrente de ar que atravessa a pilha da base para o topo reduzindo a temperatura de estocagem, nesse caso, há uma maior transferência de calor por convecção.

Embora as pilhas cobertas mostrarem ser mais eficientes na redução da umidade e a temperatura, os aspectos econômicos devem ser levados em consideração.

### 1.3.3 Variação de umidade diária das pilhas

Entre as condições avaliadas, o maior DMC foi atribuída para a pilha coberta, próximo a 0,197% $dia^{-1}$ nos primeiros 30 dias (Tabela 1.5).

Tabela 1.5 – Variação de umidade diária (% unidade) de pilhas de cavacos de árvore inteira durante os períodos de secagem.

| Estocagem (dias) | Granulometria | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 mm (Descoberta) | 15 mm (Descoberta) | 30 mm (Descoberta) | 30 mm (Coberta) |
| Início - 30 | -0,076 | -0,127 | -0,304 | 0,197 |
| 30 - 90 | 0,173 | 0,069 | 0,108 | 0,174 |
| 90 - 126 | -0,030 | 0,177 | 0,101 | 0,051 |

A DMC de pilhas descobertas foi maior entre o período de 30 e 90 dias que foi o período mais seco do inverno, contribuindo para a diminuição de 10,4% de umidade para a granulometria de 5 mm. Essa perda é maior do que o reportado para coníferas no norte da Europa, de 2 a 3% por mês [10].

Em relação a condição tropical, os ganhos e perdas de umidade foram mais pronunciados do que o descrito por Sikanen et al. [18] estudando florestas energéticas na Finlândia que obtiveram um DMC máximo de 0,162% $dia^{-1}$ e mínimo de -0,133% $dia^{-1}$.

Embora, o DMC obtido durante o período menos chuvoso foi suficiente para a secagem dos cavacos de madeira, os resultados foram menores do que o reportado por Zanuncio et al. [14] monitorando toras de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* no Brasil, de 0,286% $dia^{-1}$ e 0,237% $dia^{-1}$, respectivamente.

O DMC da pilha coberta diminuiu ao longo do tempo do experimento, essa tendência pode estar associada as perdas da taxa de secagem da biomassa quando a umidade de equilíbrio estava sendo atingida.

Como um ponto importante nesse trabalho, o DMC foi associado com o período chuvoso e pode ser adotado em outros trabalhos a fim de dividir o período de secagem nas condições tropicais.

Apesar desse estudo ser um dos poucos sobre a estocagem de cavacos de árvores inteira de SFCR de eucalipto em condições tropicais, deve-se levar em consideração que o comportamento da umidade e temperatura no interior das pilhas pode ser diferente em pilhas maiores e mais repetições seriam necessárias para consolidar os efeitos e tendências observados. Também, aspectos econômicos devem ser levados em consideração.

## 1.4 CONCLUSÕES

A granulometria dos cavacos não afetou a umidade em pilhas não revolvidas e descobertas durante o período de secagem. Para a temperatura de estocagem, as maiores partículas tiveram somente efeito depois de 30 dias de estocagem.

A cobertura teve um efeito positivo durante o período de secagem atingindo uma umidade abaixo de 35%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) e ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN). Também, ao apoio das empresas Case New Holland (CNH) e Marrari Automação Industrial.

## REFERÊNCIAS

[1] S.P.S. Guerra, E.A. Garcia, K.P. Lanças, M.A. Rezende, R. Spinelli, Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production, Fuel 137 (2014) 360-363.

[2] R. Spinelli, S. Ward, P. Owende, A harvest and transport cost model for Eucalyptus spp. fast-growing short rotation plantations, Biomass and Bioenergy 33 (2009) 1265-1270.

[3] L. Pari, et al, Influence of chipping device and storage method on the quality of SRC poplar biomass, Biomass and Bioenergy 51 (2013) 169-176.

[4] E. Willebrand, S. Ledin, T. Verwijst, Willow coppice systems in short rotation forestry: effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production, Biomass and Bioenergy 4 (1993) 323-331.

[5] J.L. Stape, et al, The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production, Forest Ecology and Management 259 (2010) 1684-1694.

[6] IBA, Statistics of the Brazilian Tree Industry, Report 2015, Brasília: Brazilian Tree Industry, 2015.

[7] A. Sosa, M. Acuna, K. Mcdonnell, G. Devlin, Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland, Applied Energy 137 (2015) 338-351.

[8] X. HE, et al, Dry matter losses in combination with gaseous emissions during the storage of forest residues, Fuel 95 (2012) 662-664.

[9] M. Barontini, et al, Storage dynamics and fuel quality of poplar chips, Biomass and Bioenergy 62 (2014) 17-25.

[10] P.D. Kofman, Quality wood chip fuel. Harvesting and Transportation 6, COFORD, Denmark, 2006.

[11] R. Jirjis, Storage and drying of wood fuel, Biomass and Bioenergy 9 (1995) 181-190.

[12] P. Hakkila, Developing technology for large-scale production of forest chips, Technology Programme, Report 5, Tekes, Finland, 2003.

[13] M.A. Brand, G.I.B. Muñiz, W.F. Quirino, J.O. Brito. Storage as a tool to improve wood fuel quality, Biomass and Bioenergy 35 (2011) 2581-2588.

[14] A.J.V. Zanuncio, et al, Predicting moisture content from basic density and diameter during air-drying of Eucalyptus and Corymbia logs, Maderas. Ciencia y tecnología 17 (2015) 335-344.

[15] J. Schweier, G. Becker, Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany, Silva Fennica 46 (2012) 287-299.

[16] S.P.S. Guerra, G. Oguri, R. Spinelli, Harvesting eucalyptus energy plantations in Brazil with a modified New Holland forage harvester, Biomass and Bioenergy 86 (2016) 21-27.

[17] ASTM E871-82: standard test methods for moisture analysis of particulate wood fuels, West Conshohocken, American society for testing and materials, 2006.

[18] L. Sikanen, D. Röser, P. Anttila, R. Prinz, Forecasting algorithm for natural drying of energy wood in forest storages, Forest Energy Observer, Study Report 27, 2012.

[19] M. Manzone, P. Balsari, R. Spinelli, Small-scale storage techniques for fuel chips from short rotation forestry, Fuel 109 (2013) 687-692.

[20] R. Jirjis, Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted Salix viminalis, Biomass and Bioenergy 28 (2005) 193-201.

# CAPÍTULO 2
# MODELOS DE PREDIÇÃO DE UMIDADE DE TORAS LONGAS DE MADEIRA ESTOCADAS EM PILHAS AO AR LIVRE

Eufrade-Junior, H. J.; Rodrigues, S. A.; Spadim, E. R.; Guerra, S. P. S.; Ballarin, A.W.

[1]Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal ajustar modelos de predição de umidade de toras longas estocadas em pilhas (6,2 m) de *Eucalyptus urophylla* durante dois períodos em clima tropical, uma estação seca (outono- inverno) e outra chuvosa (primavera-verão). Para isso, a umidade foi estimada de forma indireta por meio da pesagem diária das pilhas em balanças fixas projetadas para esta finalidade ao longo de 160 dias de estocagem. No desenvolvimento das equações utilizou-se a técnica de regressão linear múltipla com a seleção de variáveis pelo método *stepwise* (passo a passo). Os modelos de predição de umidade mostraram que as variáveis umidade relativa do ar e o número de dias (tempo de estocagem), podem ser utilizadas para estimativa da umidade da madeira ($R^2$aj.>92%). O período de estocagem no outono-inverno apresentou uma umidade final menor (31,1% base úmida) quando comparado com a estocagem durante a primavera-verão (36,4% base úmida). As estações ao longo do ano influenciaram na variação de umidade diária, sendo que foi observada uma perda maior durante o inverno e a primavera.

**Palavras-chave**: Secagem ao ar. Variáveis meteorológicas. Estações do ano. Regressão linear múltipla.

**Predicting moisture content of long length log piles on outdoor storage**

ABSTRACT

The main objective of this work was to adjust moisture prediction models for wood piles with long length logs (6.2 m) of *Eucalyptus urophylla* during two storage periods, one dry season (autumn-winter) and one rainy season (spring-summer). For this, the moisture content was indirectly estimated by daily weighing of the logs in fixed scales designed for this purpose during 160 days of storage in tropical conditions. In the development of the equations, the multiple linear regression technique was used with stepwise selection of variables. The moisture prediction models showed that the variables, relative air humidity and number of days (storage time), can be used to estimate the moisture content of the wood ($R^2$aj.> 92%). The storage period in autumn-winter presented lower final moisture (31.1% wet basis) when compared to storage during spring-summer (36.4% wet basis). The seasons throughout the year influenced the variation of daily moisture content and a greater loss was observed during winter and spring.

**Keywords**: Air-drying. Meteorological variables. Seasons of the year. Multiple linear regression.

## 2.1 INTRODUÇÃO

O teor de água é uma das propriedades físicas mais importantes para o aproveitamento industrial da madeira, tanto na produção de papel e celulose, painéis de madeira, carvão quanto na combustão direta. No geral, a faixa de umidade aceitável para recebimento da madeira na indústria é de 25 a 35% (base úmida).

A madeira recém-cortada possui elevada umidade, que varia de 25 a 60% (base úmida) entre as espécies (SIMPSON, 1991). Como estratégia para diminuir os custos de transporte (HAKKILA, 2003; BERGMAN, 2010), as toras provenientes da atividade de colheita florestal são normalmente empilhadas e estocadas no campo, por período variável, dependendo das condições climáticas do local ou outros condicionantes operacionais, como a distância de transporte e a demanda da fábrica (ACUNA et al., 2012; SOSA et al., 2015).

De fato, a perda de umidade de toras empilhadas pode variar com o tamanho (diâmetro e comprimento), presença de casca (REZENDE et al., 2010; ZANUNCIO et al., 2015) e condições meteorológicas (BARROS, 2006; BRAND; MUÑIZ, 2012).

Simplificadamente pode-se assumir que a redução da umidade ocorre inicialmente pela saída de água livre ou capilar até o ponto de saturação das fibras (PSF) e, posteriormente, há a saída da água higroscópica ou de impregnação (adsorvida às paredes celulares) pela difusão (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; SKAAR, 1972; GALVÃO; JANKOWSKY, 1990), já que esses movimentos não acontecem de forma individualizada na madeira.

Durante a secagem da madeira, a água no estado líquido ou vapor se move das regiões de maior para as de menor umidade – portanto, normalmente do interior para a superfície da madeira – através de várias passagens de ar na estrutura celular bem como entre as células, através das pontoações (BERGMAN, 2010; SIMPSON, 1991). Em geral, espécies mais leves (menor densidade) secam mais rapidamente do que as espécies mais pesadas (maior densidade), porque a estrutura de madeira é mais permeável e contém mais espaços por unidade de volume; a água se move através do ar mais rapidamente do que através das paredes celulares de madeira (BERGMAN, 2010).

Alguns estudos de secagem de toras de madeira em condições de clima temperado vêm conseguindo boa predição de umidade com o uso de regressões lineares ou múltiplas (ERBER et al., 2014; ERBER et al., 2017; SIKANEN et al., 2012) ou não lineares (DONG-WOOK; MURPHY, 2013; MURPHY et al., 2012). O uso de modelos de regressão com preditores meteorológicos está se consolidando como uma ferramenta de tomada de decisão durante o planejamento da cadeia de operações florestais.

No Brasil, na maioria dos trabalhos de secagem de toras ao ar livre a umidade foi monitorada por meio da pesagem contínua e individual de toras curtas - comprimento variando de 1 m a 3,6 m (ZANUNCIO et al., 2014; REZENDE et al., 2010, RESENDE et al., 2018), procedimento que seria de difícil aplicação em estudo semelhante para toras longas (acima de 6,0m), que tem suas curvas de secagem pouco conhecidas para ambientes tropicais.

Assim, usando um dispositivo especial para contabilizar a umidade (média) da pilha como um todo, este estudo teve como objetivo modelar a umidade de toras longas de madeira *Eucalyptus urophylla* estocadas em pilhas ao ar livre durante dois

períodos de tempo, uma estação seca (outono- inverno) e outra chuvosa (primavera-verão) no ambiente tropical.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.2.1 Caracterização da floresta e das pilhas de toras longas

Para o estudo foram utilizadas árvores de uma floresta homogênea (Tabela 2.1) de eucalipto localizada na Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) em Botucatu-SP. O plantio está situado nas coordenadas 22º48'13"S e 48º25'47"O a 727 m de altitude, em região com precipitação média de 1400 mm $ano^{-1}$ e temperatura média anual de 20°C. O solo é caracterizado como Nitossolo vermelho com textura argilosa.

As árvores foram colhidas com motosserra e foram desdobradas em três a quatro toras com 6,2 m de comprimento, cada uma respeitando-se um diâmetro comercial mínimo de 5 cm e mantendo-se a casca. Na montagem das pilhas, as toras foram distribuídas aleatoriamente para simulação de uma operação comercial. As etapas do experimento estão mostradas na Figura 2.1.

Tabela 2.1 – Características da floresta.

| Características | Unidade | |
|---|---|---|
| Espécie | | *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake |
| Clone | | AEC 0144 |
| Idade | anos | 7 |
| Densidade de plantio | árvores $ha^{-1}$ | 1667 |
| Altura média | m | 21,7 |
| DAP médio | cm | 16,9 |
| IMA | $m^3$ $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ | 42,4 |

DAP – diâmetro a altura do peito; IMA – Incremento médio anual.

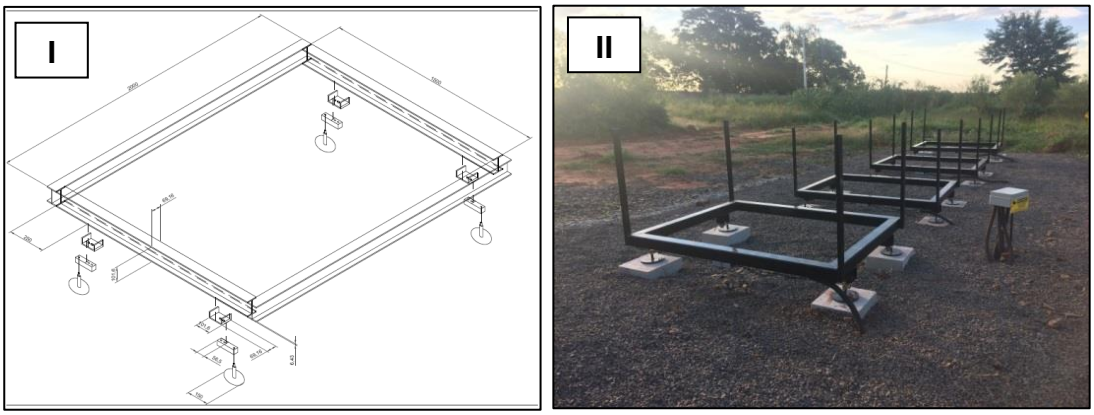
**Figura 2.1 – Etapas realizadas durante o experimento. I – Corte das árvores; II – Árvores identificadas; III – Arraste dos troncos para o carreador; IV – Corte das toras de 6,2m até diâmetro comercial de 5 cm; V – Transporte das toras para o pátio de secagem; e VI – Pilhas montadas no pátio de secagem.**

### 2.2.2 Monitoramento da umidade das pilhas de madeira

Para o monitoramento contínuo da umidade de madeira, aqui tratada simplificadamente como unidade das pilhas de madeira, foram construídas quatro pilhas de madeira, quatro repetições. Cada pilha foi montada sobre uma balança composta de estrutura metálica e células de carga, projetada para este fim (Figura 2.2). A estrutura metálica foi dimensionada para uma capacidade de 8000 kgf e

recebeu, em cada um de seus vértices, uma célula de carga de 2000 kgf (modelo CI2000, marca Líder), apoiada sobre uma base de concreto, a fim de suportar o peso da pilha.

**Figura 2.2 – Balança para monitoramento do peso das pilhas de madeira. I – Dimensões gerais; II – Balanças instaladas no local do experimento.**




As balanças foram montadas na área externa do Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia - LABB (coordenadas 22º50'53"S e 48º26'08"O) na Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) em Botucatu-SP. As pilhas de toras longas com casca foram montadas na direção leste-oeste e submetidas a secagem ao ar livre e descobertas (Figura 2.3).

**Figura 2.3 – Pilhas de madeira para acompanhamento da curva de secagem durante o período de estocagem.**

O acompanhamento da secagem das pilhas de madeira foi realizado em dois períodos, um seco, que compreendeu as estações outono e inverno, e outro chuvoso, que compreendeu as estações primavera e verão. Os mesmos procedimentos experimentais foram adotados nos dois momentos de estocagem.

A estocagem no período seco teve inicio no dia 05 de abril de 2017 e foi finalizada no dia 12 de setembro de 2017, totalizando 160 dias. As pilhas do período chuvoso foram estabelecidas no dia 27 de setembro de 2017 e desmontadas no dia 06 de março de 2018, também monitorada por 160 dias.

As dimensões das toras de madeira e outros parâmetros das pilhas após instalação do experimento para cada período avaliado estão apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Caracterização das pilhas de toras de madeira com casca acompanhadas nos períodos seco (outono-inverno) e chuvoso (primavera-verão).

| Parâmetros | Unidade | Pilhas | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| *Período seco (outono-inverno)* | | | | | |
| Dimensões (comp. × larg. × altura) | m | 6,2 × 1,5 × 0,6 | | | |
| Total do número de toras | - | 20 | 24 | 23 | 25 |
| Peso úmido inicial das pilhas | kg | 3210 | 3252 | 3225 | 3271 |
| Comprimento médio das toras | m | 6,2 | 6,3 | 6,2 | 6,3 |
| Diâmetro com casca médio das toras | cm | 17,1 | 15,4 | 15,6 | 14,7 |
| Volume de madeira sólido | m³ | 2,96 | 3,04 | 3,02 | 2,95 |
| Umidade inicial da pilha (base úmida) | % | 53,8 | 54,3 | 54,3 | 54,5 |
| Umidade final da pilha (base úmida) | % | 31,8 | 29,9 | 32,8 | 30,2 |
| *Período chuvoso (primavera-verão)* | | | | | |
| Dimensões (comp. × larg. × altura) | m | 6,2 × 1,5 × 0,6 | | | |
| Total do número de toras | - | 26 | 26 | 26 | 25 |
| Peso úmido inicial das pilhas | kg | 3095 | 3084 | 2720 | 2775 |
| Comprimento médio das toras | m | 6,1 | 6,1 | 6,0 | 6,1 |
| Diâmetro com casca médio das toras | cm | 14,7 | 14,8 | 13,7 | 14,6 |
| Volume de madeira sólido | m³ | 2,82 | 2,83 | 2,36 | 2,67 |
| Umidade inicial da pilha (base úmida) | % | 53,1 | 55,0 | 54,2 | 53,4 |
| Umidade final da pilha (base úmida) | % | 34,7 | 38,6 | 36,7 | 35,6 |

O teor de água (base úmida) médio referencial das pilhas no início da estocagem foi avaliado com a retirada de discos de madeira com casca de no mínimo 5 cm de espessura das duas extremidades de todas as toras, após o corte das árvores e imediato desdobro das toras no campo (apresentado na Figura 2.1 – etapa IV), antes da montagem das pilhas no pátio de secagem.

A umidade média referencial da pilha foi assumida como a média da umidade dos discos de suas toras e foi imprescindível para a estimativa da massa seca de cada pilha (ms) e para a estimativa indireta da umidade diária (U) por meio da pesagem nas balanças durante o período de estocagem (mu) - Equação 2.1.

$$U = \frac{mu - ms}{mu} \times 100 \quad (2.1)$$

Em que,

U – Umidade das pilhas de madeira (base úmida) no dia, %;

mu – Massa úmida das pilhas de madeira no dia aferida nas balanças, kg;

ms – Massa seca das pilhas de madeira estimadas no momento da estocagem, kg.

Além disso, foi calculada a variação de umidade diária ou "*daily moisture change*" (DMC) – Equação 2.2, que poderá servir de parâmetro para o desenvolvimento de algoritmos de predição de umidade em futuros trabalhos (SIKANEN et al., 2012). A DMC também é referida em alguns trabalhos nacionais, como taxa de secagem, embora essa terminologia seja mais empregada na secagem de madeira serrada.

$$DMC = \frac{UBU}{ND} \quad (2.2)$$

Em que,

DMC – Taxa diária de variação da umidade, pontos percentuais;

UBU – Variação da umidade (base úmida) no período observado, %;

ND – Número de dias de estocagem.

### 2.2.3 Modelos de predição da umidade da madeira e dados meteorológicos

Para o desenvolvimento dos modelos de predição de umidade das pilhas de madeira foram levadas em consideração variáveis meteorológicas (precipitação pluviométrica, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar), o tempo de estocagem (números de dias) e uma variável categórica (*dummy*). A variável categórica *dummy* foi inserida no modelo a fim de considerar os efeitos dos períodos de secagem estudados. Para o período seco (outono/inverno) foi atribuído um valor igual a 1, já para o período chuvoso (primavera/verão) foi considerado o valor de 0.

Para coleta das variáveis meteorológicas do modelo foram utilizadas leituras diárias de uma estação automática (marca Campbell Scientific Inc., modelo CR23X) localizada a 430 m da área experimental (coordenadas 22º 50' 49" S e 48º 25' 52" O). Na Tabela 2.4 estão sumarizadas as condições meteorológicas médias dos períodos de estocagem outono-inverno e primavera-verão.

Tabela 2.4 – Condições meteorológicas da estocagem ao ar livre das pilhas de madeira considerando cada período (seco e chuvoso) e suas respectivas estações do ano.

| Período de estocagem | Estação do ano | ND | P (mm) | T (°C) | V (m $s^{-1}$) | UR (%) | RS (MJ $m^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Seco | Outono | 76 | 467,6 | 19,6 | 1,8 | 80,0 | 14,0 |
| | Inverno | 84 | 74,7 | 18,5 | 2,0 | 64,4 | 16,3 |
| Chuvoso | Primavera | 84 | 413,5 | 21,9 | 2,1 | 74,5 | 19,5 |
| | Verão | 76 | 505,5 | 22,4 | 1,9 | 82,4 | 18,6 |

U – Umidade das pilhas de madeira (base úmida), V – Velocidade média diária do vento, T – Temperatura média diária do ar, UR – Umidade relativa diária, RS – Radiação solar diária, P – Precipitação diária, ND – Número de dias de estocagem.

Utilizou-se a técnica de regressão linear múltipla com a seleção de variáveis pelo método *stepwise* (passo a passo) a partir de um modelo geral (Equação 2.3). Esse procedimento teve como objetivo obter um modelo minimizado com o melhor ajuste possível, selecionando as variáveis que tenham alta correlação com a variável resposta (umidade).

$$U = Intercepto + a.V + b.T + c.UR + d.RS + e.P + f.ND + g.Dummy \quad (2.3)$$

Em que,

U – Umidade das pilhas de madeira (base úmida), %;

V – Velocidade média diária do vento, m $s^{-1}$;

T – Temperatura média diária do ar, °C;

UR – Umidade relativa diária, %;

RS – Radiação solar diária, MJ $m^{-2}$;

P – Precipitação diária, mm;

ND – Número de dias de estocagem, unidade;

*Dummy* – Valor 1 (período seco), valor 0 (período chuvoso);

a,b,c,d,e,f,g – coeficientes da equação.

Estatisticamente as regressões, foram avaliadas pela normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk; *p<0,05*), pela não existência de autocorrelação (teste Durbin-Watson) considerando-se serem os dados provenientes de séries temporais e por fim, pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2$aj.%.) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}$%).

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação da umidade média das pilhas de madeira ao longo do tempo – curva de secagem - está apresentada na Figura 2.4. O período seco (outono-inverno) foi aquele que proporcionou uma umidade final mais baixa (31,1%); já a umidade final do período chuvoso foi de 36,4%.

A inclinação da curva está intimamente relacionada com a taxa de secagem das pilhas e é maior a medida que aumenta a diferença de umidade entre a madeira e o ambiente. Essa inclinação tende a diminuir quando a umidade da madeira se aproxima da umidade de equilíbrio higroscópico (JANKOWSKY, 1990). Nas duas situações contempladas – período seco e período chuvoso - não houve uma estabilização da umidade das pilhas, o que pode ser atribuído às constantes chuvas ao longo do tempo nos dois períodos.

**Figura 2.4 – Comportamento da umidade média diária e desvio padrão das pilhas de madeira ao longo da estocagem nos períodos seco (outono-inverno) e chuvoso (primavera-verão).**

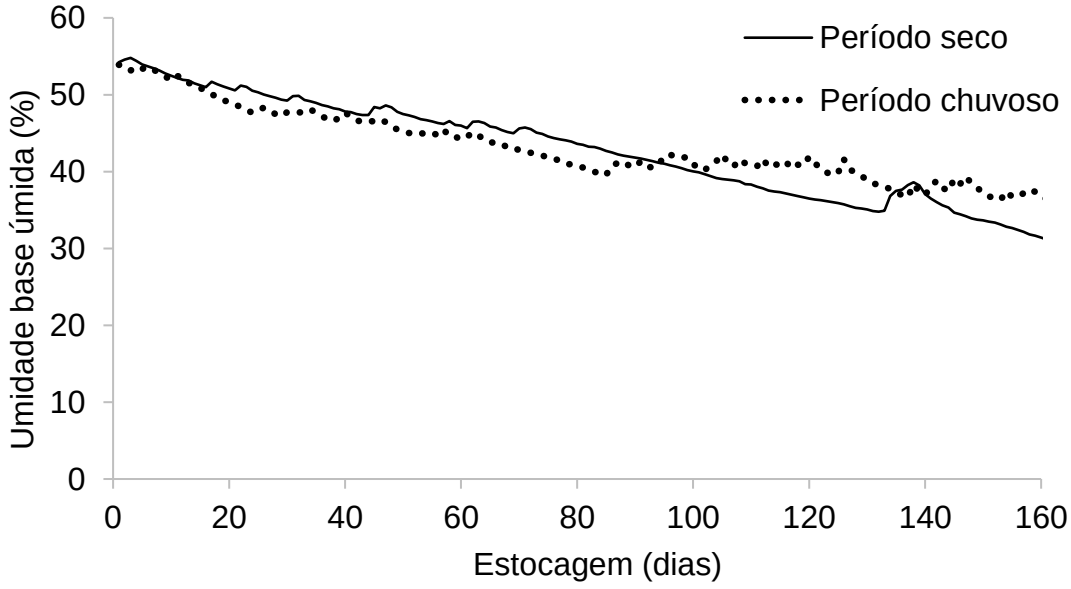
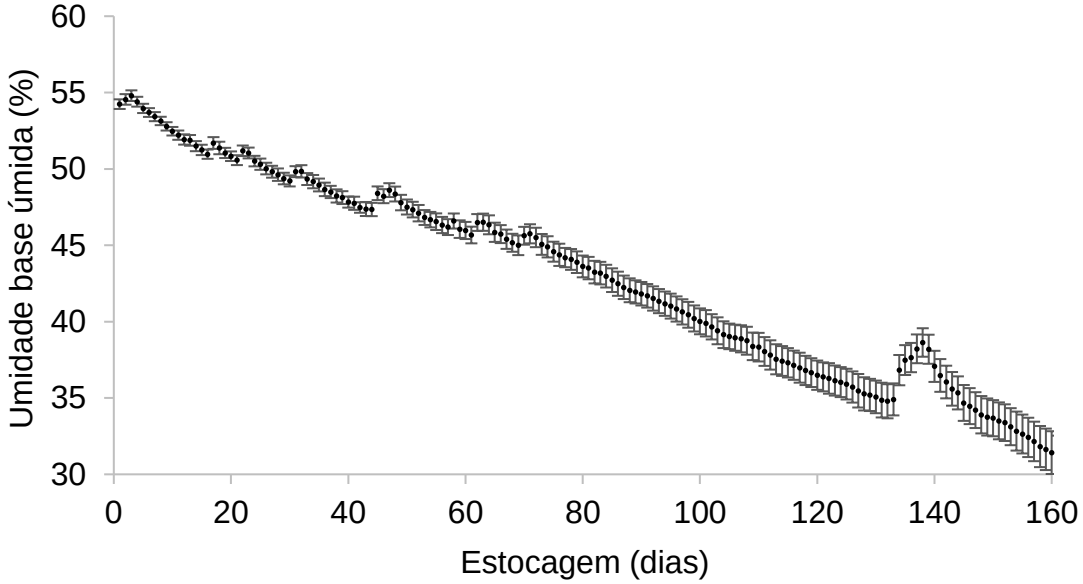
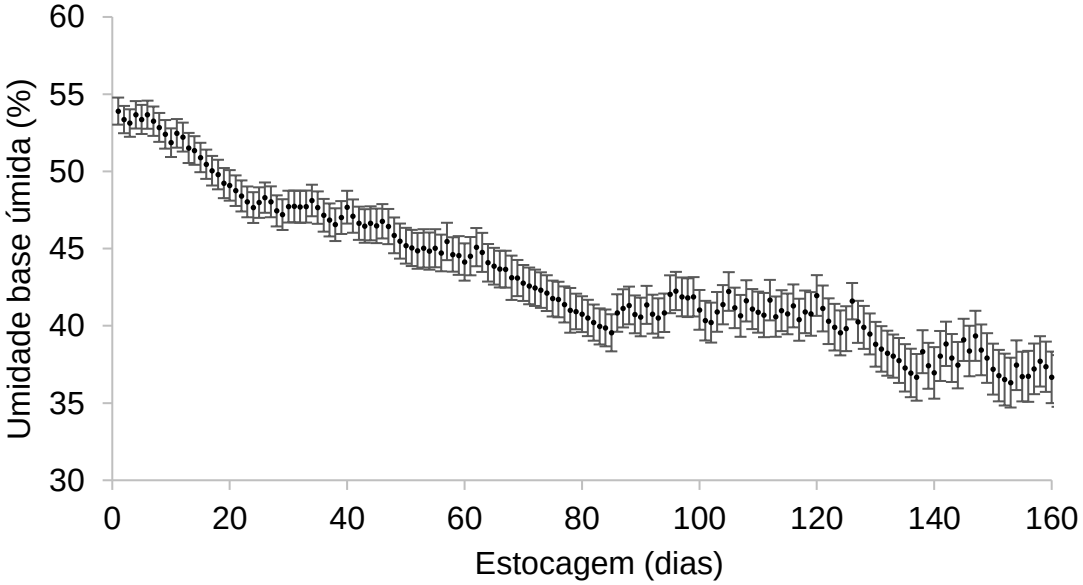


**Figura 2.5 – Comportamento do desvio padrão da umidade média diária das pilhas na estocagem no período seco (outono-inverno).**




A curva de secagem foi muito semelhante entre as repetições, o que pode ser constatado pelo comportamento do desvio-padrão do monitoramento diário da umidade para cada período de estocagem, outono-inverno (Figuras 2.5) e primavera-verão (Figura 2.6).

**Figura 2.6 – Comportamento do desvio padrão da umidade diária das pilhas na estocagem no período chuvoso (primavera-verão).**




A fim de estudar de forma mais detalhada o ganho e perda de umidade dos períodos de estocagem, foi calculada a variação de umidade diária (DMC – *Daily*

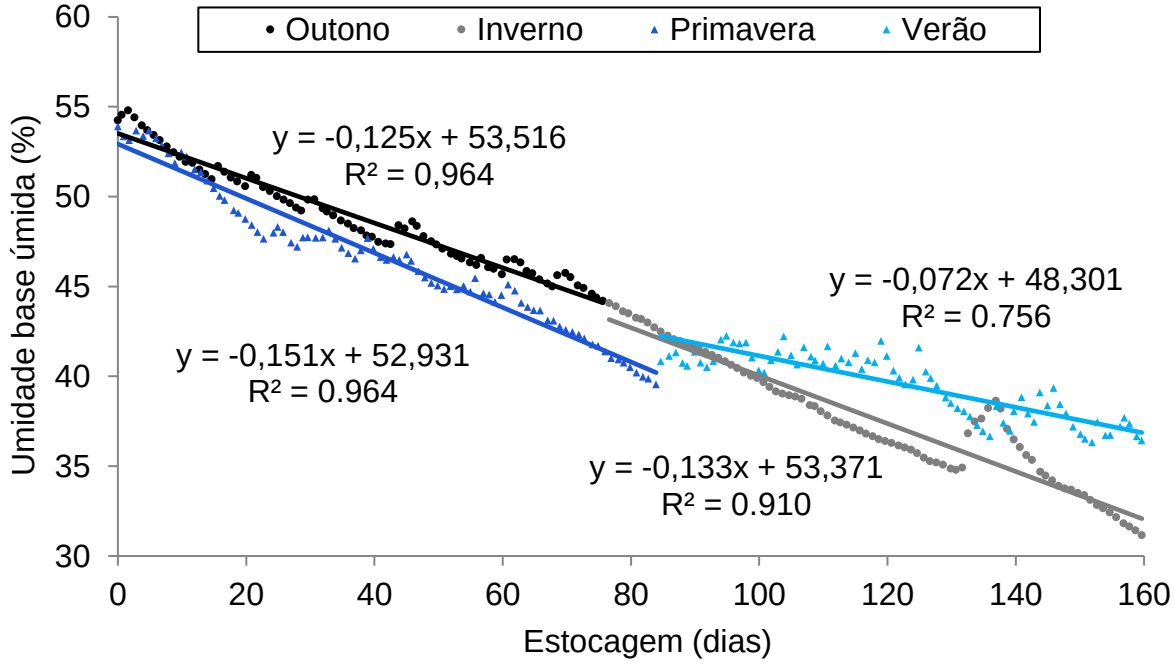
*Moisture Change*) para os períodos e estações do ano (Tabela 2.6). Como observado já na curva de secagem, o DMC foi maior para o período seco, que no geral, também apresentou uma perda de umidade mais uniforme, corroborado pelos valores próximos entre as estações desse período, o outono e o inverno. Comportamento diferente do observado para estações, primavera e verão, do período chuvoso.

Tabela 2.6 – Variação de umidade diária (DMC) das pilhas nos períodos de estocagem e estações do ano.

| Períodos | Umidade inicial (% base úmida) | Umidade final (% base úmida) | Número de dias | DMC (% dia$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Período seco | 54,2 | 31,1 | 160 | 0,144 |
| Período chuvoso | 53,9 | 36,4 | 160 | 0,109 |
| | | | | |
| Outono | 54,2 | 44,2 | 76 | 0,132 |
| Inverno | 44,1 | 31,1 | 84 | 0,154 |
| Primavera | 53,9 | 39,5 | 84 | 0,171 |
| Verão | 40,8 | 36,4 | 76 | 0,058 |

Os maiores valores de DMC foram encontrados nas estações primavera e inverno e podem ser constados pelo maior coeficiente angular das retas apresentados na Figura 2.7. Para o ano avaliado, a secagem da pilha poderia ser maior se a estocagem fosse realizada nas estações inverno-primavera.

**Figura 2.7 – Curva de secagem das pilhas detalhada por estação do ano.**

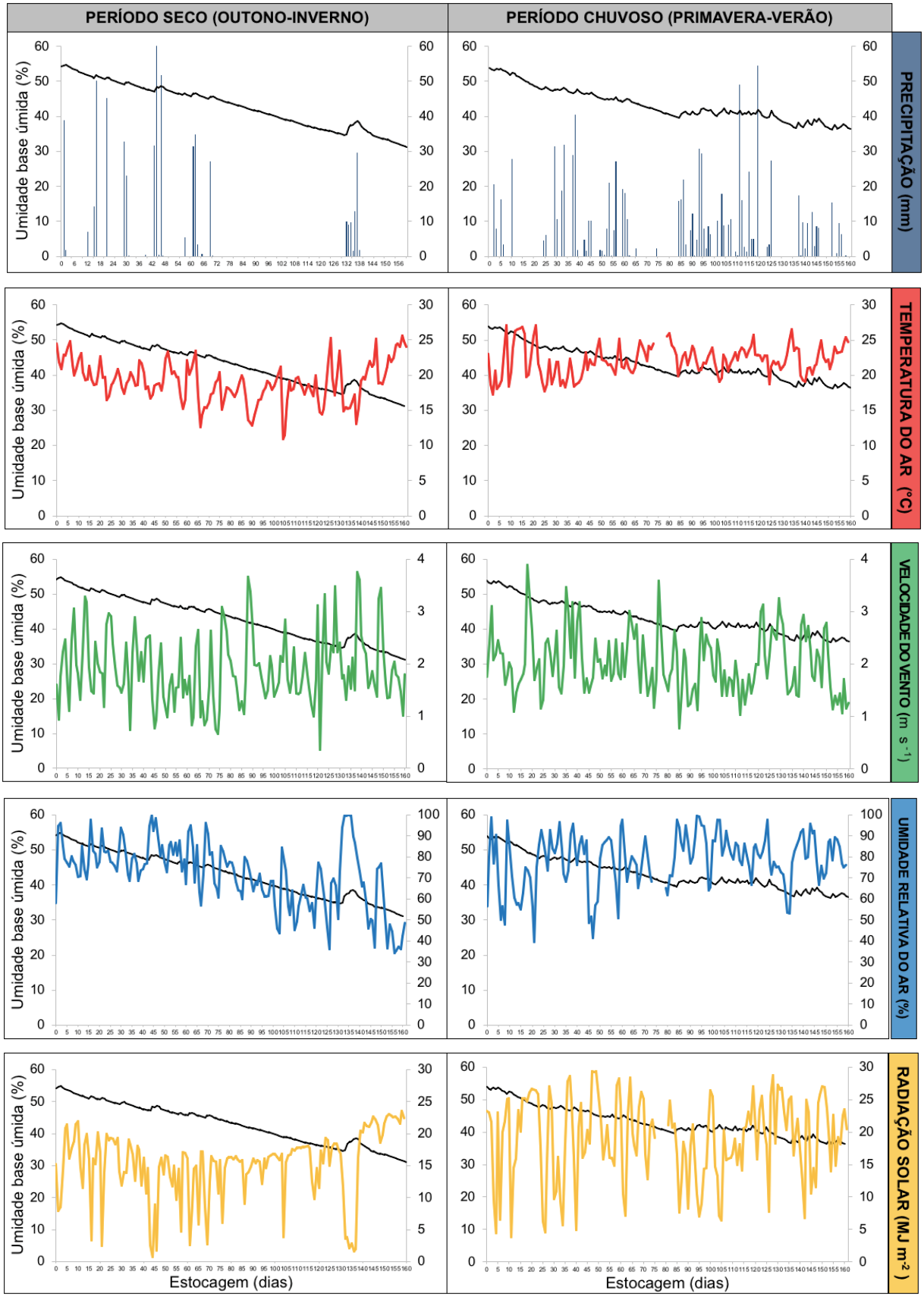


Com base nas variações reportadas, considerando uma situação hipotética, para uma umidade inicial de 54% e 80 dias de estocagem no inverno e na primavera, as pilhas poderiam atingir uma umidade final estimada abaixo de 30% de umidade, o que poderia ser mais interessante para o aproveitamento energético, por exemplo.

As variações de umidade diária encontradas estão dentro da faixa para toras curtas de eucalipto (menores que 3,6 m) estocadas no campo, que podem variar de 0,109% $dia^{-1}$ a 0,286% $dia^{-1}$ (REZENDE et al., 2010; ZANUNCIO et al., 2014). Essa variação está relacionada as condições meteorológicas em cada período de estocagem (Figura 2.8).

A precipitação pluviométrica foi maior no período que compreendeu as estações primavera-verão, interrompendo a secagem das pilhas, mesmo com os maiores picos de radiação solar. Destaque para o comportamento da umidade relativa do ar que foi muito semelhante as duas curvas de secagem nos períodos estudos.

**Figura 2.8 – Curva de secagem das pilhas e condições meteorológicas durante os períodos de estocagem.**



A fim de predizer a umidade e avaliar as variáveis mais importantes na secagem das pilhas foram desenvolvidos dois modelos com suporte da análise de regressão *stepwise* (Tabela 2.7). O Modelo 1 foi aquele que a técnica apresentou como ideal; o Modelo 2 foi testado considerando a variável ND (dias de estocagem) e a variável *dummy* para obter de maneira rápida uma estimativa do teor de água das pilhas em condições de campo. Ambos os modelos apresentaram um alto valor de coeficiente de determinação ajustado (>92%) e baixos valores de erro padrão da estimativa (< 1,5 %), demonstrando uma grande eficiência na predição da umidade das pilhas estocadas.

Tabela 2.7 – Coeficientes e estatística dos modelos de predição de umidade.

| Modelos | Coeficientes | | *p*-valor | $R^2$aj.(%) | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| *Modelo 1* | | | | 94,83 | 1,28 |
| Intercepto | 43,341532 | * | $<2\times10^{-16}$ | | |
| ND, dias | -0,113080 | * | $<2\times10^{-16}$ | | |
| T, °C | 0,122077 | * | 0,000242 | | |
| UR, % | 0,070293 | * | $<2\times10^{-16}$ | | |
| RS, MJ $m^{-2}$ | 0,043435 | * | 0,012792 | | |
| Dummy | 0,645593 | * | 0.002131 | | |
| *Modelo 2* | | | | 92,82 | 1,50 |
| Intercepto | 52,393805 | * | $<2\times10^{-16}$ | | |
| ND, dias | -0,116012 | * | $<2\times10^{-16}$ | | |
| Dummy | -0,284410 | | 0,090400 | | |

$R^2$aj. = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro padrão da estimativa; * = significativo a 5% ($p$<0,05) pelo Teste t-Student.

Durante a secagem das toras nas condições estudadas, o movimento de água livre é predominante, e a mesma é fortemente influenciada por fatores ambientais como a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do vento (GALVÃO; JANKOWSKY, 1988; SEVERO, 1990). No Modelo 1, as variáveis ND, T, UR e a *dummy* foram selecionadas como as que mais explicam a perda de umidade das toras durante a estocagem, com destaque para o forte efeito das variáveis ND e UR.

Paradoxalmente, a técnica de regressão *stepwise* eliminou a variável P (precipitação) do Modelo 1. O efeito da precipitação parece ter sido minimizado pela casca. Observações de campo permitiram evidenciar o efeito protetor da casca na reabsorção de água durante e após as precipitações. Como já é conhecido que toras descascadas apresentam uma taxa de secagem maior (REZENDE et al., 2010; BARROS, 2006; RESENDE et al., 2018) sugere-se, de maneira mais ampla, que a

casca tenha um efeito de amortecimento, suavizando as variações diárias (perdas e ganhos) de umidade ao longo da estocagem das toras ao ar livre.

Em situações rotineiras no campo o Modelo 2 mostra-se de grande utilidade para uma estimativa rápida da umidade das pilhas sem necessidade de quantificação de dados meteorológicos usando apenas as variáveis ND e *dummy* com uma precisão aceitável.

As curvas estimadas pelos modelos para cada período de estocagem estão mostradas nas Figuras 2.9 e 2.10, ambas foram próximas e se ajustaram bem em relação à variável resposta.

**Figura 2.9 – Curvas de secagem observadas e estimada para cada modelo de predição de umidade ajustado para o período seco (outono-inverno).**

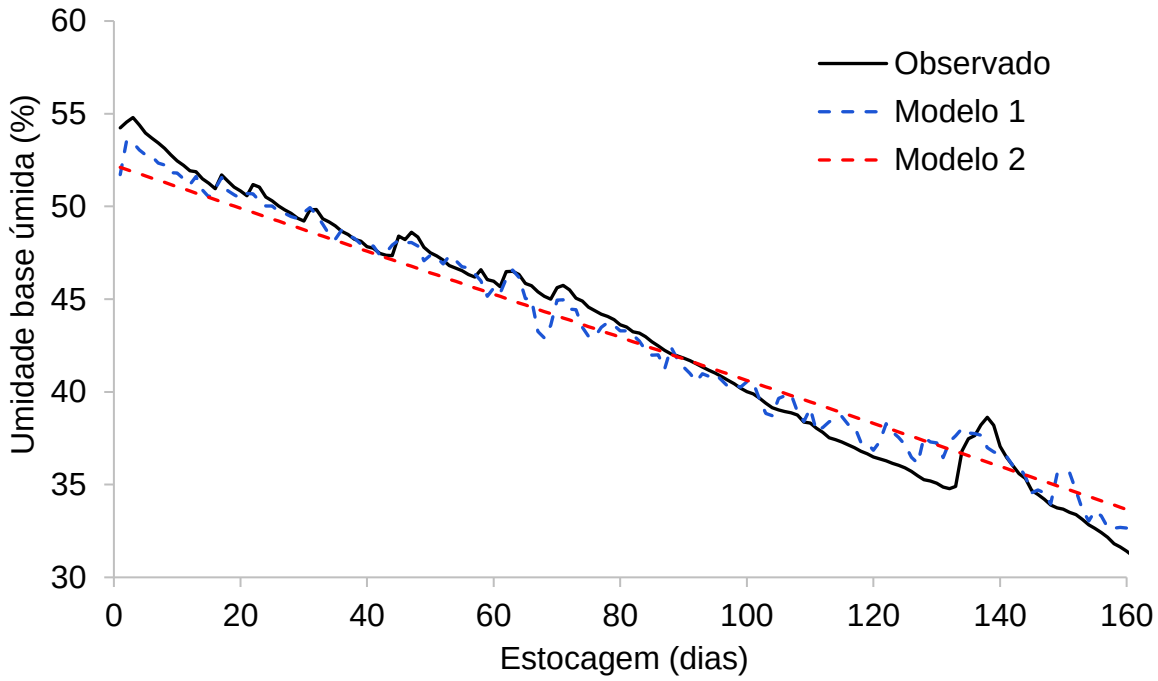
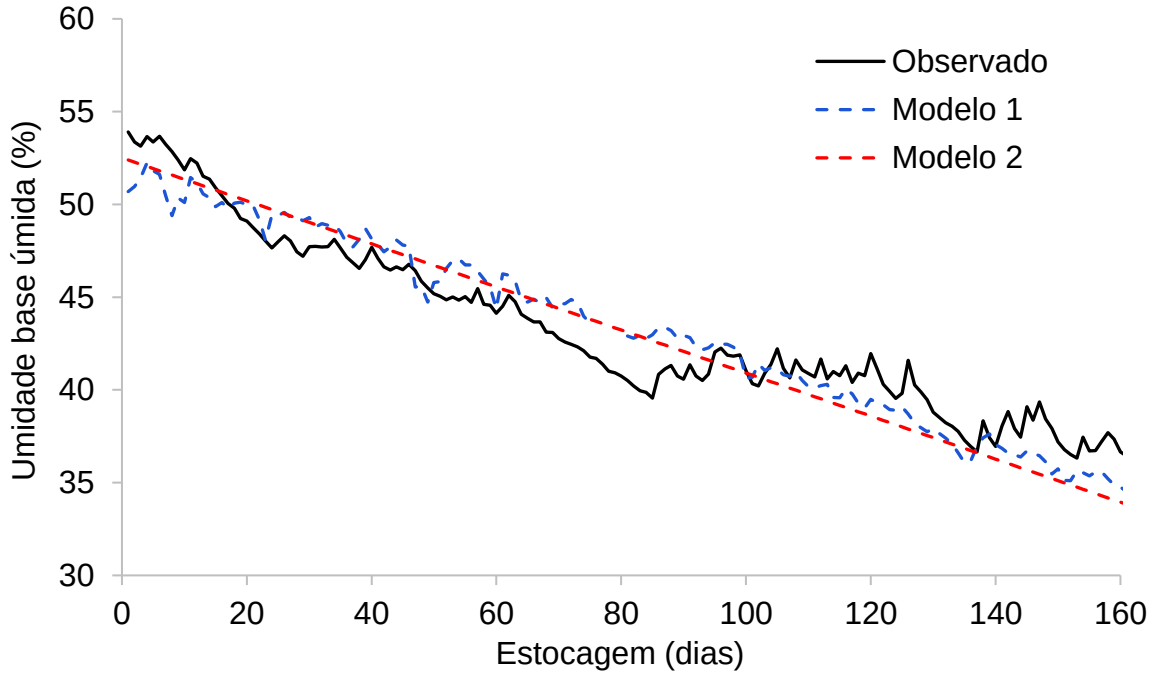


**Figura 2.10 – Curvas de secagem observadas e estimada para cada modelo de predição de umidade ajustado para o período chuvoso (primavera-verão).**




O modelo 1 foi sensível aos picos de umidade por possuir uma regressão linear múltipla e atingiu em ambos os casos, o valor mais próximo da umidade final das pilhas. Por possuir uma variável numérica (ND) e outra categórica (*dummy*), o modelo 2 se comporta como uma reta.

O experimento apresentado teve como premissa estudar o comportamento da umidade da pilha de madeira como um todo e, portanto, este comportamento pode não representar a secagem individual de cada tora. Como será discutido no Capítulo 3, os diâmetros das toras têm um grande efeito na perda de umidade, sendo assim essa umidade é diferente entre as toras que compõem a mesma pilha de madeira estocada no campo.

## 2.4 CONCLUSÕES

Toras longas de madeira estocadas ao ar livre por 160 dias nas estações outono e inverno (período com 542 mm de chuva) apresentaram uma umidade final menor - 31,1% (base úmida) em relação as toras estocadas nas estações primavera e verão (período com 919 mm de chuva) com umidade final de 36,4% (base úmida).

As variações diárias de umidade foram diferentes para os períodos analisados, bem como para as estações do ano. As maiores perdas de umidade foram observadas no inverno e na primavera.

A umidade relativa do ar e o número de dias (tempo de estocagem) foram as variáveis mais significativas no modelo de predição mais completo da umidade das pilhas de madeira de toras longas, o coeficiente de determinação ajustado do modelo foi 94,8% e o erro padrão da estimativa foi de 1,5%. No modelo mais simplificado, contabilizando exclusivamente o tempo de estocagem como variável dependente obteve um erro padrão equivalente, não sendo, contudo, sensível aos picos de umidade por ser uma regressão linear simples.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) e ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN). Também, ao apoio das empresas Sergomel Mecânica Industrial e Marrari Automação Industrial.

## REFERÊNCIAS

ACUNA, M.; ANTTILA, P.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; ASIKAINEN, A. Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 33, n. 2, p. 225-238, 2012.

BARROS, M.V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente**. 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

BERGMAN, R. Chapter 13: Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. In: Forest products laboratory, **Wood handbook: wood as an engineering material, centennial ed.**, Forest Service. Madison, 2010.

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

DONG-WOOK, K.; MURPHY, G. E. Forecasting air drying rates of small Douglas-fir and hybrid poplar stacked logs in Oregon, USA. **International Journal of Forest Engineering**, v 24, n. 2, p.137–147, 2013.

ERBER, G; et al. A prediction model prototype for estimating optimal storage duration and sorting. **Metla Working papers**, n.297, 2014, 76 p.

ERBER G, HOLZLEITNER F, KASTNER M, STAMPFER K. Impact of Different Time Interval Bases on the Accuracy of Meteorological Data Based Drying Models for Oak (*Quercus* L.) Logs Stored in Piles for Energy Purposes. **Croatian journal for engineering**, v.38, p.1-9, 2017.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111 p.

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips**. Technology Programme Report 5. Helsinki, Finland; Tekes, 2003, 54 p.

JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 13 p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood sciences and technology**. Berlin, SpringerVerlag, 1968.v.1.

MURPHY, G.; KENT, T.; KOFMAN, P. D. Modeling air drying of Sitka spruce (Picea sitchensis) biomass in off-forest storage yards in Ireland. **Forest Products Journal**, v.62, n. 6, p.443–449, 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. http://www.R-project.org/. Acesso em: 24 Nov. 2017.

RESENDE, T. R., et al. Air-drying of eucalypts logs: Genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 316–324, 2018.

REZENDE, R. N., et al. Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, v. 16, n.4, p. 565-572, 2010.

SEVERO, E. T. D.. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii*. **Floresta**, v. 20, p. 100-103, 1990.

SIKANEN, L.; RÖSER, D.; ANTTILA, P.; PRINZ, R. Forecasting algorithm for natural drying of energy wood in forest storages. **For Energy Observer**, n. 27, 2012, 7p.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: United States Department of Agriculture - USDA, 1991. 274 p.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse. Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338–351, 2015.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, F. S. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 401-408, 2014.

ZANUNCIO, A. J. V., et al, Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of Eucalyptus and Corymbia logs, **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.17, p. 335-344, 2015.

# CAPÍTULO 3
# QUALIDADE DAS TORAS DE EUCALIPTO PARA COMBUSTÃO DIRETA APÓS ESTOCAGEM AO AR LIVRE

Eufrade-Junior, H. J.; Rodrigues, S. A., Dal Pai, E.; Guerra, S. P. S.; Ballarin, A.W.

Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar os efeitos da estocagem ao ar livre do diâmetro das toras na análise imediata e no poder calorífico da madeira para combustão direta. Foram monitoradas toras de *Eucalyptus urophylla* antes e após 160 dias no campo em duas épocas de estocagem, outono-inverno (época seca) e primavera-verão (época chuvosa). Foi constatado um aumento no teor das cinzas e uma redução da umidade da madeira. A madeira atingiu uma umidade (base úmida) de 29,6% e houve um aumento de 47,6% no poder calorífico útil (12,4 MJ $kg^{-1}$) após a estocagem no outono-inverno, sendo essas as épocas mais indicadas para secagem das toras ao ar livre.

**Palavras-chave**: Umidade. Poder calorífico. Análise imediata.

**Fuel quality of eucalypt wood logs after outdoor storage for direct combustion**

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the effect of air storage and log diameter on the proximate analysis and heating value of wood for direct combustion. Logs of *Eucalyptus urophylla* were monitored before and after 160 days of storage in two time periods throughout the year, autumn-winter (dry season) and spring-summer (rainy season). An increase in the ash content and a reduction in the moisture content of the wood were observed. The wood reached a moisture content (wet basis) of 29.6% and there was an increase of 47.6% in the net heating value (12.4 MJ $kg^{-1}$) after the storage in the autumn-winter, which are the seasons most suitable for air-drying of logs.

**Keywords**: Moisture content. Heating value. Proximate analysis.

## 3.1 INTRODUÇÃO

A madeira pode ser convertida em uma variedade de produtos químicos e de energia, incluindo combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007; ROCKWOOD et al., 2008).

Na cadeia de operações florestais da madeira para geração de energia, a estocagem é muito importante, pois promove a redução de umidade e o aumento do conteúdo energético do material (TELMO; LOUSADA, 2011). Nos países de clima temperado, a madeira pode ficar estocada por até dois anos (ACUNA et al., 2012), situação diferente da vivenciada em ambiente tropical; no Brasil, por exemplo, estoca-se a madeira ao ar livre por um período máximo de seis meses.

Estudos com toras curtas (menores que 3,6m de comprimento) em condições de campo, sob o efeito de precipitação pluviométrica e temperatura mostram que ocorre alteração na qualidade energética da madeira ao longo do tempo em diferentes estações do ano (BRAND et al., 2011). Nos processos para geração de energia é imprescindível o conhecimento da composição química imediata, poder calorífico, umidade e densidade (EUFRADE-JUNIOR et al., 2018). Essas propriedades têm ainda implicações nas atividades de manuseio, transporte, secagem, estocagem da biomassa, nos sistemas de conversão de energia (SENELWA; SIMS, 1999), além de incidir significativamente nos seus custos (ACUNA et al., 2012).

Dentre as propriedades, a umidade possuí relevância e é condicionante no uso da biomassa florestal em suas diferentes vertentes. Para na combustão da biomassa, busca-se o menor valor possível para aumentar a eficiência no processo. Em condições de secagem ao ar, a umidade da madeira de eucalipto pode atingir valor menor de 35% (base úmida) (ZANUNCIO et al., 2015, RESENDE et al., 2018).

A composição química também é importante no controle de qualidade nos processos energéticos. Por exemplo, o aumento das cinzas pode ocasionar sérios danos aos equipamentos metálicos utilizados na combustão direta, como o desgaste abrasivo, além do teor de cinzas possuir relação negativa com o poder calorífico (MONTI et al., 2008). Os teores de cinzas são compostos, em parte, por partículas de solo ou areia (AFZAL et al., 2010) e a etapa de estocagem pode ter uma relação direta na variação e carreamento destas partículas com a biomassa para as termoelétricas.

Para toras longas (maiores de 6m de comprimento), ainda existem dúvidas sobre o comportamento das propriedades da madeira após a estocagem ao ar-livre e sem cobertura. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito da época e tempo de estocagem e da classe diamétrica na análise imediata, densidade básica e poder calorífico da madeira de *E. urophylla* estocada ao ar livre em pilhas de toras longas para combustão direta.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Caracterização da floresta, do sítio e das pilhas de madeira

Para o estudo foram utilizadas árvores de uma floresta clonal de eucalipto (Tabela 3.1) localizada na área experimental da Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) em Botucatu-SP, nas coordenadas 22º48'13"S e 48º25'47"O.

Tabela 3.1 – Características da floresta.

| Características | Unidade | |
|---|---|---|
| Espécie | - | *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake |
| Clone | - | AEC 0144 |
| Idade | anos | 7 |
| Densidade de plantio | árvores $ha^{-1}$ | 1667 |
| Altura média | m | 21,7 |
| DAP médio | cm | 16,9 |
| IMA | $m^3$ $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ | 42,4 |

DAP – diâmetro a altura do peito; IMA – Incremento médio anual.

A floresta está situada a 727 m de altitude, em região com precipitação média de 1400 mm $ano^{-1}$ e temperatura do ar média anual de 20°C. O solo do local é identificado como Nitossolo vermelho com textura argilosa, as propriedades físicas e químicas no momento da colheita estão apresentadas na Tabela 3.2.

Para o experimento, foram colhidas 60 árvores com auxílio de motosserra e, de cada uma, foram desdobradas de três a quatro toras de 6,2 m de comprimento com um diâmetro comercial mínimo de 5 cm. As toras foram identificadas e classificadas no campo em três classes de diâmetro (Tabela 3.3).

Tabela 3.2 – Caracterização física e química do solo.

| Propriedades | Unidade | Profundidade (cm) | |
|---|---|---|---|
| | | 0 – 20 | 20 – 40 |
| *Propriedades físicas* | | | |
| Areia grossa | g $kg^{-1}$ | 20 | 28 |
| Areia fina | g $kg^{-1}$ | 46 | 76 |
| Areia total | g $kg^{-1}$ | 66 | 104 |
| Argila | g $kg^{-1}$ | 666 | 591 |
| Silte | g $kg^{-1}$ | 268 | 305 |
| Textura do solo | | Muito argilosa | Argilosa |
| *Propriedades químicas* | | | |
| pH ($CaCl_2$) | - | 5.1 | 4.9 |
| M.O. | $g/dm^3$ | 19 | 28 |
| $P_{resina}$ | $mg/dm^3$ | 18 | 36 |
| $Al^{3+}$ | $mmol_c/dm^3$ | 0 | 1 |
| H+Al | $mmol_c/dm^3$ | 35 | 44 |
| K | $mmol_c/dm^3$ | 1.7 | 3.3 |
| Ca | $mmol_c/dm^3$ | 68 | 64 |
| Mg | $mmol_c/dm^3$ | 21 | 25 |
| SB | $mmol_c/dm^3$ | 91 | 92 |
| CTC | $mmol_c/dm^3$ | 126 | 136 |
| V | % | 72 | 68 |
| S | $mg/dm^3$ | 12 | 9 |
| B | $mg/dm^3$ | 0.30 | 0.44 |
| Cu | $mg/dm^3$ | 10.0 | 16.1 |
| Fe | $mg/dm^3$ | 20 | 47 |
| Mn | $mg/dm^3$ | 14.3 | 39.4 |
| Zn | $mg/dm^3$ | 2.0 | 3.0 |

M.O. – matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca de cátions; V – Saturação de bases.

Tabela 3.3 – Classes de diâmetros das toras.

| Classes de diâmetro | Limites das classes (cm) | Centro de classe (cm) |
|---|---|---|
| Inferior | 6,2 \|— 12,7 | 9,5 |
| Médio | 12,7 \|— 19,2 | 16,0 |
| Superior | 19,2 \|— 25,7 | 22,5 |

As toras com casca foram distribuídas aleatoriamente para composição de quatro pilhas de madeiras montadas sob uma estrutura fixa de balanças para estocagem ao longo do tempo. As dimensões das pilhas de madeira eram de 6,2 m × 1,5 m × 0,6 m, comprimento, largura e altura, respectivamente. Utilizou-se a área externa do Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia - LABB (coordenadas 22º50'53"S e 48º26'08"O) na Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) em Botucatu-SP para secagem das pilhas ao ar livre e sem cobertura.

Os procedimentos experimentais descritos se repetiram em dois momentos distintos, um período seco e outro chuvoso, ambos com 160 dias de estocagem e descritos a seguir:

- Época seca – colheita florestal e início da estocagem no dia 05 de abril de 2017 e término no dia 12 de setembro de 2017, compreendendo as estações do outono e inverno;
- Época chuvosa – colheita florestal e início da estocagem no dia 27 de setembro de 2017 e término no dia 06 de março de 2018, compreendendo as estações da primavera e verão;

Pelas condições meteorológicas nos períodos estudados (Tabela 3.4) observa-se que na época denominada chuvosa houve um acréscimo de quase 70% na precipitação pluviométrica.

Tabela 3.4 – Condições meteorológicas durante as épocas de estocagem das pilhas no campo para cada estação do ano.

| Estocagem | ND | P (mm) | T (°C) | V (m $s^{-1}$) | UR (%) | RS (MJ $m^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Época seca | 160 | 542,3 | 19,0 | 1,9 | 71,8 | 15,2 |
| Época chuvosa | 160 | 919,0 | 22,2 | 2,0 | 78,3 | 19,0 |

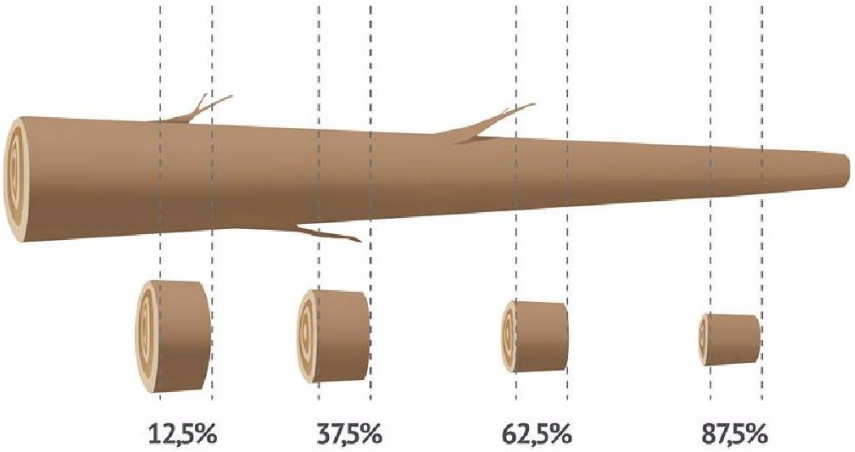
U – Umidade das pilhas de madeira (base úmida), V – Velocidade média diária do vento, T – Temperatura média diária do ar, UR – Umidade relativa diária, RS – Radiação solar diária, P – Precipitação diária, ND – Número de dias de estocagem.

### 3.2.2 Qualidade da madeira como combustível

Devido à importância da umidade no aproveitamento energético da madeira imediatamente após o abate das árvores e desdobro das toras, foram retirados discos de madeira (5 cm de espessura) das extremidades de todas as toras para uma caracterização completa da umidade inicial (referencial) e dos diâmetros das toras que compunham cada pilha.

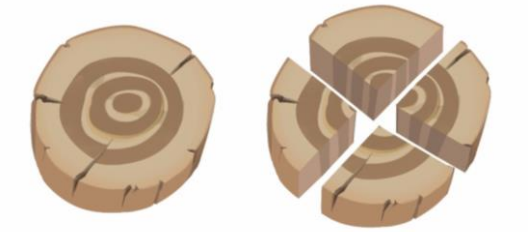
Para caracterização das demais propriedades físicas e químicas foram selecionadas pelo menos seis toras com diâmetro igual ao do centro de cada classe diamétrica em dois momentos: na montagem do experimento – 0 dia de estocagem – e aos 160 dias após estocagem, para as duas épocas avaliadas, seca e chuvosa. As toras foram amostradas por discos de no mínimo 5 cm de espessura nas posições de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% ao longo do comprimento (Figura 3.1), excluindo-se os topos como preconizado pela norma europeia EN 14778 (CEN, 2011).

Figura 3.1 – Discos amostrados das toras para determinação das propriedades físicas e químicas.




Os discos foram acondicionados em sacos plásticos, encaminhados para o laboratório e dividido para os ensaios laboratoriais (Figura 3.2). Eles foram descascados e moídos na fração de 40-60 mesh para formar uma amostra representativa para cada tora selecionada. Posteriormente, foi realizada uma amostra composta das seis toras que compunham a mesma classe diamétrica em cada período avaliado.

Figura 3.2 – Processo de quarteamento dos discos de madeira para obtenção de subamostras utilizadas na determinação das propriedades físicas e químicas.



Desta forma, houve a determinação da umidade, densidade básica, composição química imediata (cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) e do poder calorífico (superior, inferior e útil) da madeira sem casca. As normas técnicas utilizadas para determinação das propriedades estão descritas na Tabela 3.5. As análises foram realizadas em duplicata com quatro repetições cada.

Além das propriedades, foi realizada também a determinação da relação cerne/alburno (C/A) em discos de madeira de cada classe de diâmetro. O cerne foi delimitado por meio da alteração de cor do lenho. Foram traçadas duas retas perpendiculares passando pelo centro da medula definindo os quadrantes. Diâmetros do cerne e do total do disco foram medidos nos quadrantes com auxílio de uma régua (sensibilidade de 1 mm). A relação C/A foi estabelecida após cálculo da área do cerne e do alburno por diferença entre área total e do cerne, considerando que ambos apresentavam uma projeção circular na amostra.

Tabela 3.5 – Normas e metodologia dos ensaios laboratoriais.

| Propriedades físicas e químicas | Sigla | Metodologia adotada |
|---|---|---|
| Cinzas | CZ | ASTM D1102 – 84 (2007) |
| Carbono fixo | CF | ASTM E870-82 (2006) |
| Materiais voláteis | MV | ASTM E872 – 82 (2006) |
| Poder calorífico superior | PCS | ASTM E711-84 (2004) |
| Poder calorífico inferior | PCI | EN 14918 (2005) |
| Poder calorífico útil | PCU | EN 14918 (2005) |
| Densidade básica | DB | ABNT NBR 11941 (2003) |
| Umidade da madeira | UBU | ASTM E871 – 82 (2006) |

Para análise estatística, considerou-se um esquema fatorial triplo (3×2×2) com três fatores de variação: três classes de diâmetro (inferior, médio e superior), dois momentos (0 e 160 dias) e duas épocas de estocagem (seca e chuvosa).

De forma preliminar, foi aferida a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p<0,05$). O efeito dos fatores de variação foi observado após a análise de variância (ANAVA) com medidas repetidas, seguido pelo teste de média Bonferroni ($p$<0,05). Todos os dados foram analisados no ambiente do software estatístico R (R Development Core Team, 2017).

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3.6 está apresentado o *p*-valor das análises de variância (ANAVA) realizada para avaliar o efeito dos fatores de variação nas propriedades da madeira. Todas as propriedades sofreram efeito de pelo menos um fator de variação.

Tabela 3.6 – Resumo do *p*-valor da análise de variância (ANAVA) com medidas repetidas para propriedades físicas e químicas.

| Fator de variação | *p*-valor | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | UBU | DB | CZ | MV | CF | PCS | PCI | PCU |
| Época de estocagem (P) | $3\times10^{-4}$* | $5\times10^{-1}$ | $2\times10^{-2}$* | $8\times10^{-1}$ | $8\times10^{-1}$ | $4\times10^{-1}$ | $5\times10^{-1}$ | $4\times10^{-13}$* |
| Classe de diâmetro (C) | $3\times10^{-4}$* | $6\times10^{-1}$ | $4\times10^{-7}$* | $7\times10^{-3}$* | $1\times10^{-2}$* | $5\times10^{-1}$ | $5\times10^{-1}$ | $3\times10^{-15}$* |
| Dias de estocagem (D) | $5\times10^{-12}$* | $2\times10^{-4}$* | $5\times10^{-2}$* | $8\times10^{-4}$* | $1\times10^{-3}$* | $8\times10^{-5}$* | $8\times10^{-5}$* | $2\times10^{-24}$* |
| P × C | $2\times10^{-1}$ | $5\times10^{-3}$* | $2\times10^{-9}$* | $5\times10^{-1}$ | $6\times10^{-1}$ | $1\times10^{-2}$* | $1\times10^{-2}$* | $1\times10^{-12}$* |
| P × D | $5\times10^{-4}$* | $2\times10^{-1}$ | $9\times10^{-8}$* | $9\times10^{-1}$ | $7\times10^{-1}$ | $7\times10^{-4}$* | $7\times10^{-4}$* | $9\times10^{-16}$* |
| C × D | $5\times10^{-7}$* | $2\times10^{-1}$ | $3\times10^{-10}$* | $1\times10^{-1}$ | $1\times10^{-1}$ | $8\times10^{-2}$ | $8\times10^{-2}$ | $3\times10^{-17}$* |
| P × C × D | $2\times10^{-1}$ | $6\times10^{-1}$ | $4\times10^{-3}$* | $7\times10^{-2}$ | $7\times10^{-2}$ | $1\times10^{-1}$ | $1\times10^{-1}$ | $2\times10^{-6}$* |

UBU – Umidade da madeira; DB – Densidade básica; CZ – Cinzas; MV – Materiais voláteis; CF – Carbono fixo; PCS – Poder calorífico superior; PCI – Poder calorífico inferior; PCU – Poder calorífico útil. *$p$-valor menor que 0,05 é significativo a 5% pelo Teste F.

### 3.3.1 Efeito da estocagem nas propriedades físicas da madeira

As classes diamétricas e os dias de estocagem tiveram um efeito significativo no teor de água da madeira (Tabela 3.7). Foi constatada uma redução significativa da umidade ao final da estocagem (160 dias) para todas as classes de diâmetro das toras. O menor valor encontrado foi para as toras inferiores, já a umidade não diferiu entre as toras das classes média e superior.

Tabela 3.7 – Umidade da madeira (% - base úmida) em diferentes classes diamétricas antes e após estocagem no campo.

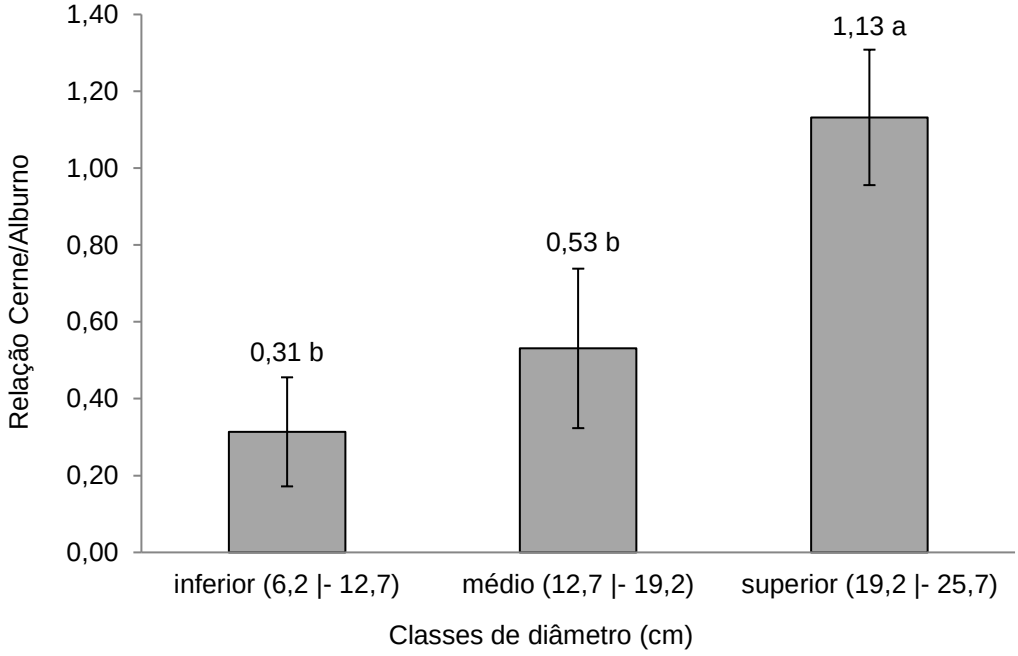
| Dias | Classe diamétrica | | |
|---|---|---|---|
| | Inferior | Médio | Superior |
| 0 | 55,9 ± 1,8 Aa | 53,1 ± 2,3 Aa | 49,7 ± 2,5 Aa |
| 160 | 23,7 ± 9,1 Ba | 37,5 ± 7.4 Bb | 41,4 ± 3,1 Bb |

Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula na coluna, e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

As toras inferiores perderam 42,2% do seu peso inicial após 160 dias, muito maior do que a classe média e superior, de 25,0% e 14,1%, respectivamente. Este efeito também já foi reportado na literatura para toras curtas (REZENDE et al., 2010; PERTUZZATTI et al., 2013).

De fato, a menor umidade da classe de diâmetro inferior pode ser explicada pela menor proporção de cerne no lenho. A relação cerne/alburno é muito maior na classe diametrica superior (Figura 3.3). Os valores aqui obtidos estão próximos aos reportados por Pereira et al. (2013) de 0,49 a 1,01 para diversos clones de eucalipto.

**Figura 3.3 – Relação Cerne/Alburno antes e após a estocagem em diferentes classes de diâmetro das toras.**




Médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

A permeabilidade a líquido (K) do alburno na direção longitudinal às fibras é muito superior à do cerne. Para *Eucalyptus grandis*, os valores são da ordem de 470 $cm^3.(cm.atm.s)^{-1}$ e 0,420 $cm^3$ $.(cm.atm.s)^{-1}$, para o alburno e o cerne, respectivamente (SILVA et al., 2010). Assim, a maior presença de cerne pode dificultar a secagem, principalmente devido à obstrução dos vasos por tilos (GALVÃO; JANKOWSKY, 1988).

Outra interação dupla importante para umidade da madeira foi entre as épocas de estocagem e os dias de estocagem (Tabela 3.8). De fato, o período seco com precipitação acumulada (de cerca de 60% do período chuvoso, Tabela 3.4), promoveu uma secagem mais acentuada das toras.

Tabela 3.8 – Umidade da madeira (% - base úmida) em diferentes épocas de estocagem.

| Dias | Época de estocagem | |
|---|---|---|
| | Seca | Chuvosa |
| 0 | 53,2 ± 4,0 Aa | 52,6 ± 2,8 Aa |
| 160 | 29,6 ± 10,6 Ba | 38,9 ± 7,7 Bb |

Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula na coluna, e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

Destaca-se um aumento da variabilidade (maior desvio padrão) da umidade no final da estocagem para ambas as épocas avaliadas. Tal fato, pode ser explicado devido as características que distinguem as repetições das pilhas para cada época de estocagem, já que foram montadas aleatoriamente. Desta forma, a maior presença de uma determinada classe diamétrica ou até mesmo a posição de toras de diferentes diâmetros na pilha, levaram a um comportamento de secagem único para cada pilha que culminou no aumento do desvio padrão da umidade ao final da estocagem.

Ao contrário do que observado por Barros (2006) que não encontrou efeito significativo da posição das toras (de 1 m e 2,3 m de comprimento) na pilha de secagem, esse efeito aparenta ser mais relevante para pilhas com toras de 6,2 m de comprimento.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a relação entre o diâmetro (D) das toras e seus teores de umidade (UBU) nas diferentes épocas de estocagem. Houve uma correlação positiva entre as duas variáveis após 160 dias de estocagem, sendo que a

variação de 1 cm de diâmetro das toras ocasionou um aumento de 1,71 e 1,59 pontos percentuais na umidade final, respectivamente para as épocas seca e chuvosa.

Os resultados sugerem que o maior controle da umidade pode ocorrer com a classificação e empilhamento das toras separadas no campo. Embora, essa prática exija um complexo arranjo operacional e logístico para as grandes empresas florestais, pode ser uma opção para o pequeno e médio produtor levando-se em conta o uso múltiplo da floresta.

**Figura 3.4 – Relação entre o diâmetro das toras e a umidade da madeira no período seco (outono-inverno).**

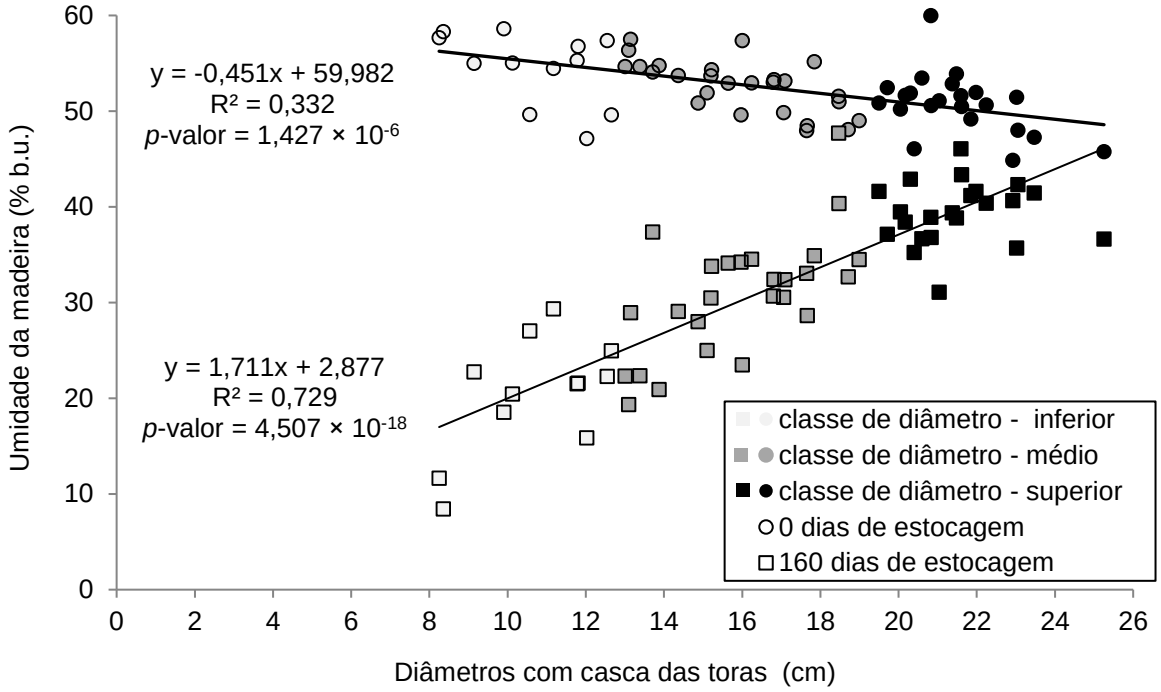
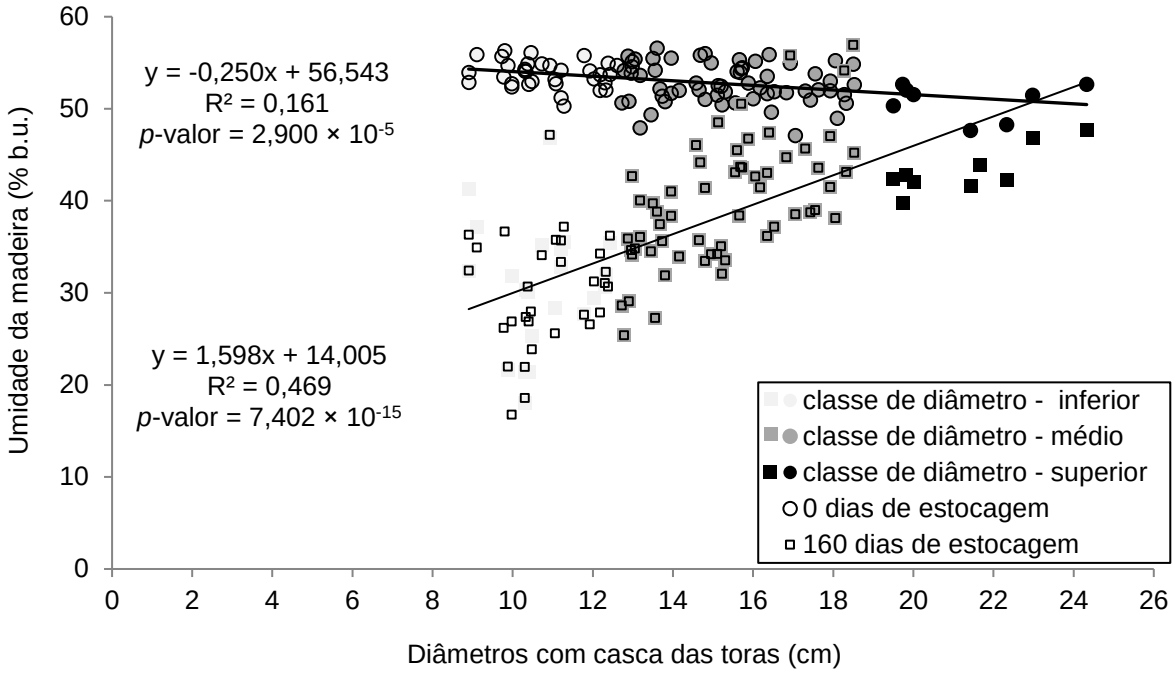


**Figura 3.5 – Relação entre o diâmetro das toras e a umidade da madeira no período chuvoso (primavera-verão).**




A densidade básica da madeira foi estatisticamente diferente entre as classes diamétricas e as épocas de estocagem (Tabela 3.9), embora não tenha apresentado um comportamento bem definido.

Tabela 3.9 – Densidade básica da madeira (Kg $m^{-3}$) no campo.

| Época de estocagem | Classe diamétrica | | |
|---|---|---|---|
| | Inferior | Médio | Superior |
| Seca | 476 ± 21 Aab | 482 ± 27 Aa | 444 ± 38 Bb |
| Chuvosa | 455 ± 18 Ab | 470 ± 23 Aab | 496 ± 23 Aa |

Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula na coluna, e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

No final da estocagem, houve uma redução da densidade básica (Tabela 3.10) o que sugere uma perda de matéria seca (0,86% $mês^{-1}$), embora não seja possível afirmar sem um estudo mais detalhado, já que o método de determinação da densidade básica apresenta uma menor sensibilidade técnica para este fim. Se faz necessário uma análise minuciosa que leve em conta as três principais fontes de degradação da madeira: fungos, insetos e intempéries climáticas (SHUPE et al., 2008). Para madeira estocada em condições de campo em clima temperado, a degradação de matéria seca é próxima de 1% para toras e 2% para resíduos florestais (LAITILA, 2006).

Tabela 3.10 – Densidade básica da madeira antes e após estocagem.

| Dias | Densidade da madeira (Kg $m^{-3}$) |
|---|---|
| 0 | 481 ± 28 A |
| 160 | 459 ± 28 B |

Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula na coluna, e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

### 3.3.2 Efeito da estocagem nas propriedades químicas da madeira

A análise imediata foi influenciada pelos fatores de variação considerados no estudo - classe diamétrica, dias e época de estocagem (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Análise imediata da madeira e os fatores de variação.

| Fatores de variação | Carbono fixo (%) | Materiais Voláteis (%) | Cinzas (%) |
|---|---|---|---|
| *Classe diamétrica* | | | |
| Inferior | 16,2 ± 0,6 A | 83,37 ± 0,6 B | 0,42 ± 0,1 A |
| Médio | 15,4 ± 0,8 B | 84,25 ± 0,9 A | 0,37 ± 0,0 B |
| Superior | 15,5 ± 0,9 AB | 84,10 ± 0,9 A | 0,35 ± 0,1 B |
| *Dias de estocagem* | | | |
| 0 | 15,0 ± 0,8 B | 84,28 ± 0,8 A | 0,37 ± 0,1 B |
| 160 | 15,7 ± 0,8 A | 83,54 ± 0,8 B | 0,39 ± 0,1 A |
| *Época de estocagem* | | | |
| Seca | 15,73 ± 0,9 A | 83,88 ± 0,9 A | 0,39 ± 0,1 A |
| Chuvosa | 15,70 ± 0,9 A | 83,93 ± 0,8 A | 0,37 ± 0,1 B |

Médias seguidas de pelo menos uma letra maiúscula igual na coluna para a mesma propriedade e fator de variação, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

A classe diamétrica superior apresentou, no geral, os menores teores de carbono fixo e materiais voláteis, além de possuir menor teor de cinzas. As diferenças encontradas podem estar relacionadas à maturidade da madeira, ou seja, a presença de cerne no lenho das toras.

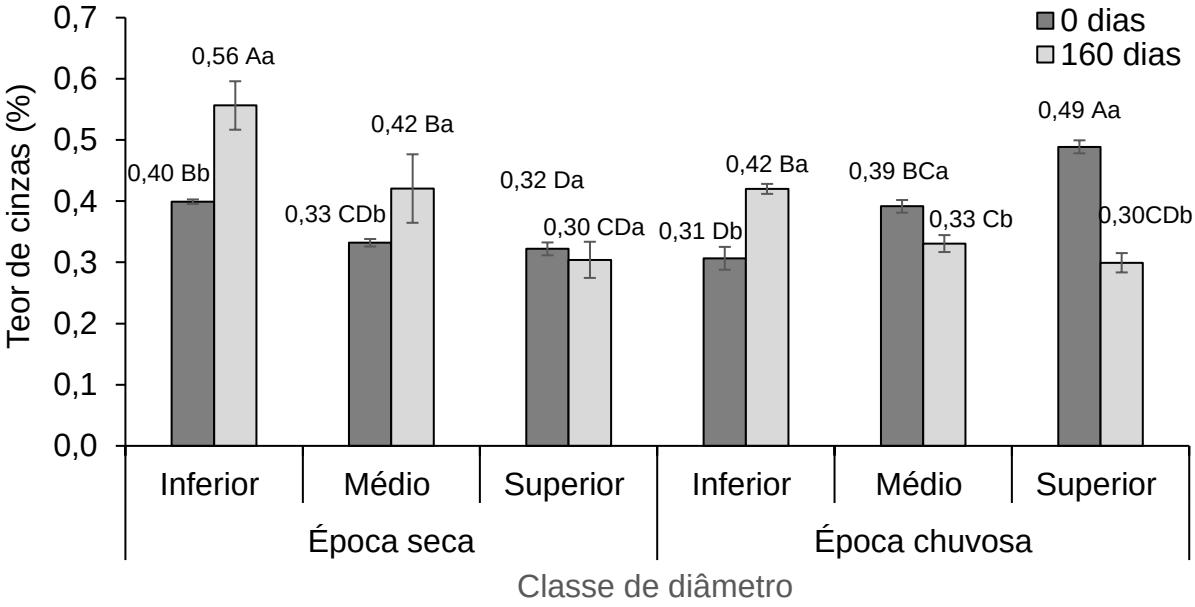
Para as cinzas, a maior quantidade foi observada nas toras menores que possuíam uma maior presença de alburno (vide Figura 3.3). Essa ocorrência é corroborada por Silva et al. (2010) que reportou o dobro da quantidade de cinzas no alburno em relação ao cerne da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora;* isso teria relação com a quantidade de substâncias inorgânicas provenientes

principalmente da seiva bruta, que é constituída de água e sais minerais, e transportada pelos vasos no alburno.

Após o período de estocagem houve um aumento do carbono fixo e redução dos materiais voláteis na madeira, já que ambos são inversamente proporcionais. Esses componentes estão relacionados à reatividade do combustível, e durante a queima, se misturam com o oxigênio do ar, promovendo as reações de combustão (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997). As cinzas também aumentaram após a estocagem, o que não é interessante, pois não contribui para o conteúdo energético (SHENG; AZEVEDO, 2005) e tem um efeito negativo nas caldeiras (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Entre as propriedades da análise imediata, as cinzas ainda apresentaram uma interação tripla entre os fatores de variação que pode ser observada na Figura 3.6. A estocagem promoveu um aumento desta propriedade em todas as classes de diâmetro na época seca o que não aconteceu para época chuvosa.

**Figura 3.6 – Teor de cinzas na madeira em diferentes classes de diâmetro e épocas de estocagem.**




Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula para o mesmo dia de estocagem, e minúscula para a mesma classe diamétrica e época, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

O poder calorífico superior e o poder calorífico inferior mantiveram-se constantes para a época seca de estocagem, já para a época chuvosa, houve uma pequena redução estatisticamente significativa (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 – Poder calorífico superior, inferior e útil (MJ $kg^{-1}$) antes e após estocagem.

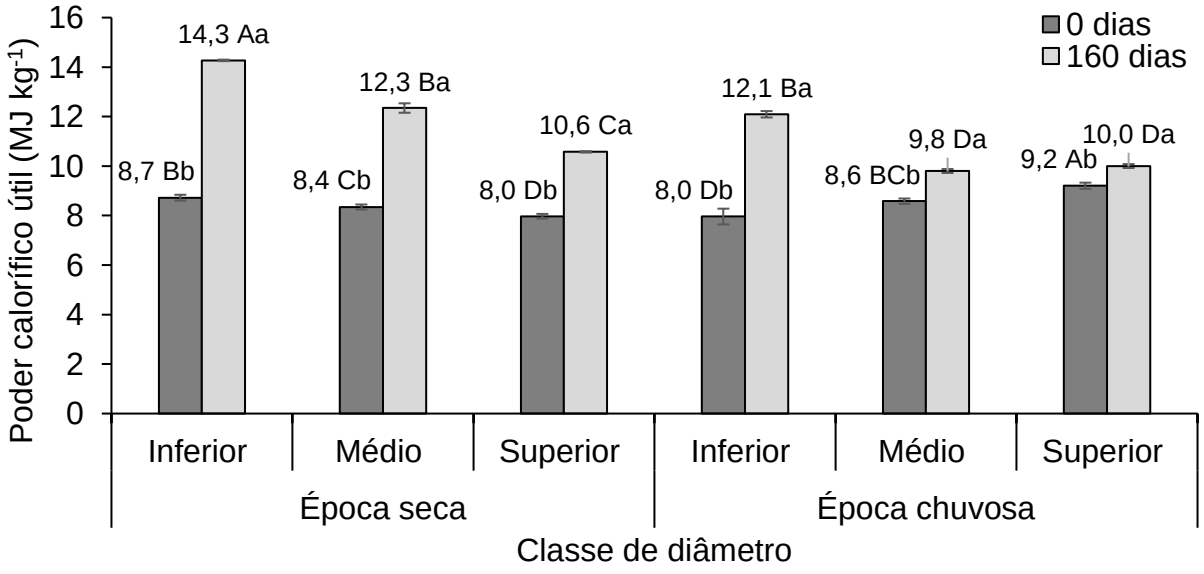
| Dias de estocagem | Época de estocagem | |
|---|---|---|
| | Seca | Chuvosa |
| *Poder calorífico superior* | | |
| 0 | 19,1 ± 0,2 Aa | 19,3 ± 0,5 Aa |
| 160 | 19,0 ± 0,3 Aa | 18,6 ± 0,2 Bb |
| *Poder calorífico inferior* | | |
| 0 | 17,7 ± 0,2 Ab | 18,1 ± 0,5 Aa |
| 160 | 17,7 ± 0,3 Aa | 17,4 ± 0,2 Ba |
| *Poder calorífico útil* | | |
| 0 | 8,4 ± 0,3 Bb | 8,6 ± 0,6 Ba |
| 160 | 12,4 ± 1,6 Aa | 10,6 ± 1,1 Ab |

Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula na coluna, e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

Em termos caloríficos, a estocagem aumentou o conteúdo energético útil para 47,6% e 23,3%, nas épocas seca e chuvosa, respectivamente. Considerando-se como equivalentes os PCU iniciais nas duas épocas de estocagem, o ganho energético de estocagem em época seca foi 17% superior em relação à chuvosa.

Quando consideradas as classes de diâmetro, as toras inferiores obtiveram maior PCU após a estocagem (Figura 3.7). Esta propriedade também aumentou para todos os tratamentos.

**Figura 3.7 – Poder calorífico útil na madeira em diferentes classes de diâmetro e épocas de estocagem.**




Médias seguidas de pelo menos uma letra igual, maiúscula para o mesmo dia de estocagem, e minúscula para a mesma classe diamétrica e época, não diferem estatisticamente pelo teste de Bonferroni a 5% de probabilidade.

## 3.4 CONCLUSÕES

As propriedades que mais foram influenciadas pelo tempo e época de estocagem foram a umidade, poder calorífico útil e cinzas da madeira. A época seca, que compreendeu as estações de outono e inverno, propiciou um ganho energético na madeira de 17% comparada a estocagem na primavera-verão.

A presença e quantidade de cerne e alburno tem grande influencia nas propriedades da madeira quando analisada entre as classes de diâmetro das toras. Do ponto de vista energético, as toras com menores diâmetros e estocadas na época seca seriam aquelas mais indicadas para geração de energia, pois apresentaram o maior poder calorífico útil (14,3 MJ $kg^{-1}$) e menor umidade final (23,7%).

O aumento de uma unidade (cm) de diâmetro das toras ocasionou um aumento de 1,7 pontos percentuais na umidade (base úmida) após a estocagem.

As toras de diferentes classes diamétricas que compuseram as pilhas de madeira montadas de forma aleatória no experimento, tanto em proporção como em diferentes posições na pilha (interior ou borda), ocasionaram um aumento da variabilidade da umidade final após a estocagem.

Houve uma redução da densidade básica após a estocagem, o que sugere uma perda de matéria seca de 0,86% $mês^{-1}$.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) e ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN).

## REFERÊNCIAS

ACUNA, M.; ANTTILA, P.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; ASIKAINEN, A. Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 33, n. 2, p. 225-238, 2012.

AFZAL, M.T.; BEDANE, A.H.; SOKHANSANJ, S.; MAHMOOD, W. Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. BioResources, v. 5, n. 1, p. 55-69, 2010.

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

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

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

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

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

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

BARROS, M.V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente**. 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2581–2588, 2011.

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. 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.
EUFRADE-JUNIOR, H.J.; GUERRA, S.P.S.; SANSÍGOLO, C. A.; BALLARIN, A. W. Management of Eucalyptus short-rotation coppice and its outcome on fuel quality, v. 121, p. 309-314,2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN EN 14778:2011. Solid Biofuels: Sampling. Brussels, 2011, 68p.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. Secagem racional da madeira. São Paulo: Nobel, 1988. 111 p.

LAITILA, J. Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. **Forest Studies**, v.45, n.1, p. 5-10, 2006.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

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

MONTI, A.; VIRGÍLIO, N.; VENTURI, G. Mineral composition and ash contente of six major energy crops. Biomass and bioenergy, v. 32, p. 216-223, 2008.

PEREIRA, B. L. C.; et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

PERTUZZATTI, A.; et al. Influência do diâmetro das toras na secagem ao ar livre de *Eucalyptus globulus* Labill. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 2, p. 191-201, 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. http://www.R-project.org/. Acesso em: 02 Fev. 2019.

RESENDE, T. R., et al. Air-drying of eucalypts logs: Genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 316–324, 2018.

REZENDE, R. N., et al. Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, v. 16, n.4, p. 565-572, 2010.

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

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

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.

SHUPE, T.; LEBOW, S.; RING, D. **Causes and control of wood decay, degradation and stain**. Louisiana Cooperative Extension Service, Pub.2703 (5M), Baton Rouge, LA, 2008.

SILVA, Marcio Rogério da; MACHADO, G. O. ; DEINER, L. J. ; CALIL JUNIOR, C. . Permeability Measuremens of Brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**, v. 13, p. 281-286, 2010.

ZANUNCIO, A. J. V., et al, Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of Eucalyptus and Corymbia logs, Maderas. Ciencia y tecnología, v.17, p. 335-344, 2015.

# CAPÍTULO 4

# EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUTIVIDADE E NOS CUSTOS DA CADEIA DE OPERAÇÕES FLORESTAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Eufrade-Junior, H. J.[1]; Acuna, M.[2]; Brown, M.[2]; Esperancini, M.S.T.[1]; Ballarin, A.W.[1]; Guerra, S. P. S.[1]

[1]Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

[2]Australian Forest Operations Research Alliance (AFORA) / University of the Sunshine Coast
Sippy Downs Drive, 90 Sippy Downs QLD, Austrália

## RESUMO

O aproveitamento da madeira para geração de energia requer uma cadeia produtiva mais eficiente nas diversas etapas que a compõe: colheita, baldeio, cavaqueamento, transporte, estocagem e sistemas de conversão. A umidade da madeira afeta a época de colheita e o volume a ser cavaqueado, o transporte da matéria-prima, o tempo de armazenamento no campo, entre outros, o que impacta economicamente a cadeia. Assim, este trabalho tem como objetivo principal investigar o efeito da umidade da madeira na produtividade e nos custos de diferentes cadeias de operações florestais para geração de energia elétrica no Brasil. A colheita e o transporte florestal foram as atividades que mais oneraram as cadeias, 45,1% e 39,2%, respectivamente. Foi possível constatar uma diferença de até 33% no custo unitário da energia gerada devido a umidade da madeira. Os menores custos foram encontrados a partir de 120 dias de estocagem da madeira em toras até uma distância de 100 km da termelétrica

**Palavras-chave**: Operações florestais. Termelétrica. Período de estocagem. Custo operacional.

**Effect of wood moisture content on the productivity and costs of the forest energy supply chain**

ABSTRACT

The use of wood for power generation requires a more efficient production chain in the various steps that comprise it: harvesting, forwarding, storage, chipping, transport and conversion systems. The moisture content (MC) of the wood affects the harvesting time and the volume to be chipping, the transport the raw material, the time of storage in the field, among others, which economically impacts the chain. The main objective of this work is to investigate the effect of wood moisture content on the yield and costs of different chains of forest operations for power generation in Brazil. Harvesting and forest transport were the activities that most charging the chains, 44.2% and 38.5%, respectively. It was possible to verify a difference of up to 33% in the unit cost of the energy generated due to the MC. The lowest costs were found from 120 days of log storage and at the distance of 100 km to the thermoelectric plant.

**Keywords**: Forest operations. Biomass power plant. Storage period. Operational cost.

## 4.1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira para geração de energia compreende as operações de colheita e baldeio, estocagem, cavaqueamento e transporte da biomassa até a termelétrica (ACUNA et al., 2012a; JIRJIS, 2009). Dentre as operações, o transporte da matéria-prima é um componente principal no custo da utilização de energia a partir da biomassa (SEARCY et al., 2007, MÜLLER, 2005, ALVES, et al. 2013). Outra atividade onerosa é o processo de cavaqueamento que em algumas situações pode contribuir muito para este custo (GHAFFARIYAN et al., 2014; ACUNA et al. 2012b).

Considerando as propriedades da madeira, o teor de água é fundamental no planejamento logístico das cadeias produtivas, pois afeta a época de colheita e o volume a ser cavaqueado, o número de caminhões necessários para transporte da matéria-prima, o tempo de armazenamento no campo, o conteúdo energético, entre outros (JIRJIS, 1995; SOSA et al., 2015). Novos esforços direcionam a otimização dessas cadeias em função desse parâmetros-chave. Na Finlândia, por exemplo, Acuna et al. (2012a) desenvolveram um programa computacional – BIOPLAN – para

investigar o efeito da umidade da madeira entregue na indústria nos custos das atividades na cadeia florestal ao longo do ano.

Quando utilizada para geração de energia térmica ou elétrica, a madeira é normalmente reduzida a cavacos (CANTO, 2009) e ainda são escassas as informações econômicas da cadeia de produção dos cavacos, algumas dúvidas persistem, como o momento ideal da etapa de cavaqueamento e estocagem da madeira.

A dificuldade é maior quando se avaliam cenários com os condicionantes maiores, como a distância entre a termelétrica e a fonte de madeira, umidade inicial da madeira, época do ano e demanda da unidade de conversão. Ainda, não foi estudada qual seria a configuração das operações florestais menos onerosa no desempenho das etapas de colheita e baldeio, estocagem, cavaqueamento e transporte da matéria prima.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal investigar o efeito da umidade da madeira nos custos operacionais e no volume de madeira necessário para suprir a demanda de uma termelétrica abastecida por diferentes cadeias de operações florestais e seus respectivos condicionantes, como o tempo de estocagem e a distância da floresta até a unidade de conversão.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Cadeia de operações florestais

Para realização do estudo, o projeto simulou o abastecimento de uma usina termelétrica (unidade de conversão) localizada na região central do Estado de São Paulo, movida a cavacos de madeira e com capacidade instalada de 20 MW e uma demanda energética mensal constante durante o ano.

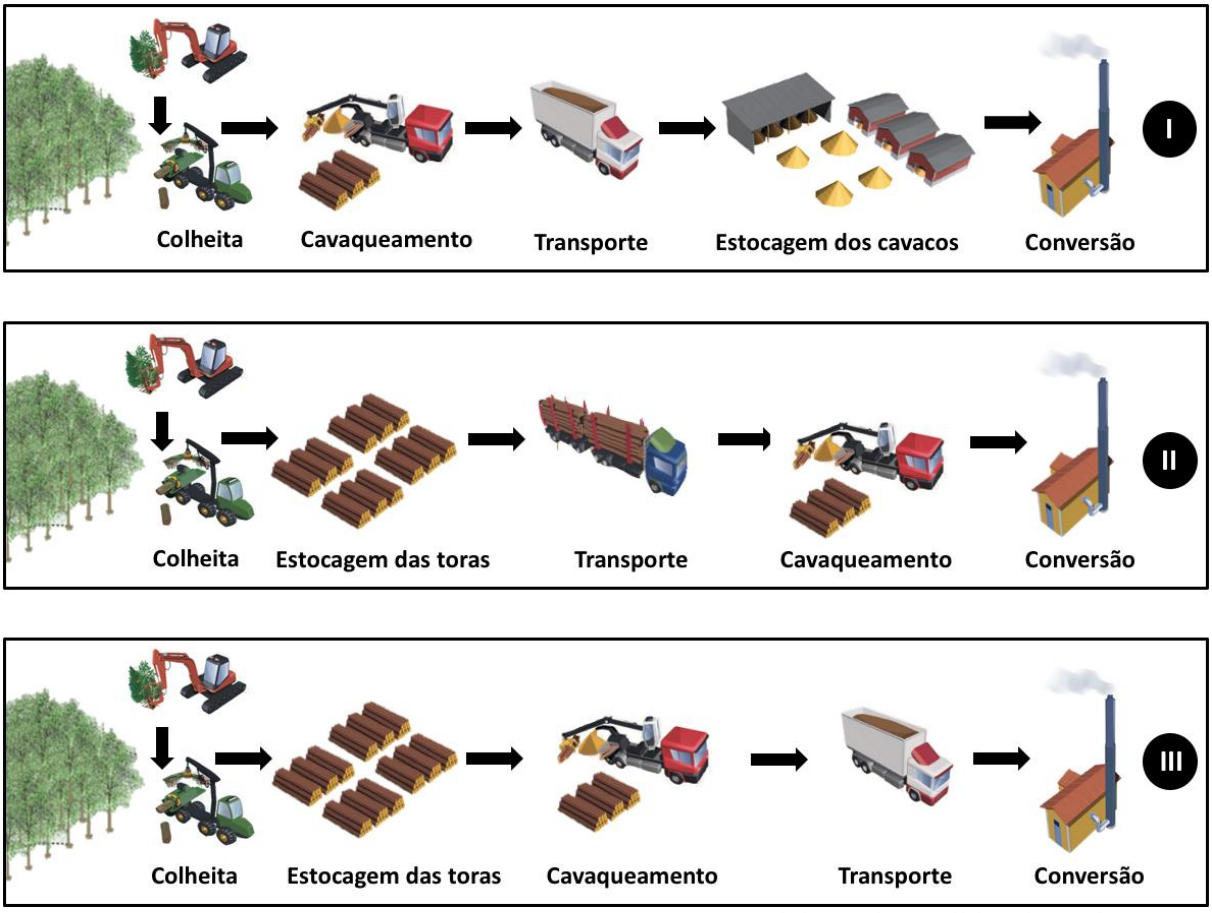
As vias de aproveitamento dos cavacos consideradas para este estudo foram exemplificadas na Figura 4.1. Elas contemplam as principais etapas que compõem a transformação da madeira em cavacos para geração de energia. Como mostra a Figura 4.1, a cadeia I é caracterizada pelo cavaqueamento da madeira úmida imediatamente após a colheita florestal. Nas cadeias II e III, inicialmente é feita a estocagem do material em toras e, posteriormente, o cavaqueamento da madeira seca, na indústria (cadeia II) ou no campo (cadeia III).

Simulou-se o abastecimento da termelétrica por uma das três cadeias de operações florestais de forma a garantir o volume mínimo de madeira para atender a demanda energética mensal da termelétrica. Ainda para a simulação, considerou-se a madeira proveniente de uma floresta clonal de eucalipto descrito na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Características da floresta.

| Características | Unidade | |
|---|---|---|
| Espécie | - | *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake |
| Clone | - | AEC 0144 |
| Idade | anos | 7 |
| Densidade de plantio | árvores $ha^{-1}$ | 1667 |
| Altura média | m | 21,7 |
| DAP médio | cm | 16,9 |
| Incremento médio anual | $m^3$ $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ | 42,4 |

**Figura 4. – Cadeia de operações I, II e III de aproveitamento dos cavacos para geração de energia.**




Fonte: Forest Energy Portal (2017) modificado pelo autor.

### 4.2.2 Demanda de madeira para abastecimento da termelétrica

O volume mensal de cavacos de madeira para abastecimento da termelétrica foi calculado em três etapas. A primeira foi baseada no trabalho de Perea (2005) que utilizou a equação descrita por Hugot (1976) relacionando a quantidade de vapor, entalpia do vapor e da água, rendimento da caldeira e o poder calorífico útil para obtenção da quantidade de biomassa necessária para o processo térmico (Equação 4.1). Destaca-se que o poder calorífico útil é a propriedade balizadora para estudar o efeito da umidade da madeira no volume demandado pela termelétrica.

$$\mathrm{Qc} = \frac{Qv\,(hv-ha)}{\eta(PCU)} \qquad (4.1)$$

Em que,

Qc = quantidade de combustível (kg);

Qv = quantidade de vapor (kg);

hv = entalpia do vapor em função da pressão e temperatura (MJ $kg^{-1}$);

ha = entalpia da água em função da temperatura (MJ $kg^{-1}$);

$\eta$ = rendimento da caldeira (%);

PCU = Poder Calorífico Útil (MJ $kg^{-1}$).

Na segunda etapa, essa quantidade foi estimada em kg $MWh^{-1}$ levando em conta a eficiência de um sistema caldeira-turbina, sendo que uma vazão de vapor de 80000 kg $h^{-1}$ produziria 17,78 MWh, como descrito no trabalho de Miranda et al. (2017) e Ribeiro (2018). Por último, foi estimada a geração de energia elétrica mensal considerando 680 horas produtivas de trabalho em um mês, descontadas as horas de parada e manutenção fabril, resultando em 13600 MWh.

Foi considerado a densidade da madeira de eucalipto de 460 kg $m^{-3}$ para conversão da madeira em kg para $m^3$ sólido.

### 4.2.3 Estimativa do custo operacional das operações florestais

Na determinação dos custos operacionais nas etapas da cadeia produtiva da madeira de plantações comerciais de eucalipto foram utilizados rendimentos descritos

na literatura e dados provenientes de empresas consolidadas no setor. Como particularidade deste estudo, foi contabilizado apenas os custos a partir da operação de colheita florestal.

Os custos operacionais da biomassa entregue à termelétrica foram determinados com base no volume sólido de madeira (R$ $m^{-3}$) a fim de estabelecer uma unidade em comum nas diferentes operações que compõem a cadeia florestal de energia. O custo operacional foi caracterizado pelo somatório dos custos variáveis - mão de obra, combustível, lubrificação, reparos e manutenção, determinados em cada etapa (colheita, transporte, cavaqueamento e estocagem) de acordo com o proposto na norma ASAE D472-3 (ASABE, 2001).

Para a colheita florestal, considerou um sistema composto por trator florestal *Feller buncher* (corte e formação dos feixes de madeira), *skidder* (extração dos feixes da madeira do interior do talhão para o pátio de processamento) e garra traçadora (traçamento da madeira com comprimento de até 6m) como descrito por Miyajima (2015). Neste sistema, considerou-se o custo de R$ 20,00 $m^{-3}$ sólido de madeira colhido (CCo), valor compatível com o praticado pelas empresas florestais da região.

Na etapa de transporte foi considerado o volume de madeira sólido transportado por quilômetro rodado considerando uma carreta com capacidade de carga de 100 $m^3$. Foram testadas diferentes distâncias de transporte até o centro de consumo, considerou-se os seguintes deslocamentos: 0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 km. Para este custo, foi utilizada a Equação 4.2 que levou em consideração a densidade da pilha (relação entre o volume estéreo na carreta e o volume sólido de madeira).

$$\mathrm{CT} = \frac{Pf \times d \times 2}{Ca \times Dp} \qquad (4.2)$$

Em que,

CT – custo de transporte, R$ $m^{-3}$;

Pf – preço médio do frete no mercado, R$ $km^{-1}$;

d – distância percorrida, km;

Ca – capacidade de carga do caminhão, $m^3$;

Dp – densidade da pilha de toras (Dpt) ou cavacos (Dpc).

O custo da estocagem das pilhas (CE) foi caracterizado apenas pelo custo de oportunidade da terra (Equação 4.3), calculado com base na quantidade de área utilizada para estocagem da madeira, preço da terra para uso na silvicultura no Estado de São Paulo praticado em janeiro de 2019 (IEA, 2019), o tempo de armazenamento das pilhas e taxa de juros de 0,5 % mês$^{-1}$ (taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia - Selic) praticada em fevereiro de 2019.

$$\mathrm{CO} = \mathrm{Vi} \times \mathrm{r} \times \mathrm{t} \times \mathrm{A} \quad (4.3)$$

Em que,

CO – Custo de oportunidade da terra, R$ ha$^{-1}$;

Vi – Valor inicial da terra, R$ ha$^{-1}$;

r – Taxa de juros, % mês$^{-1}$;

t – Tempo de estocagem, mês;

A – Área de estocagem, ha.

Para a quantidade de área (Equação 4.4) utilizada na estocagem da madeira foi considerada uma altura máxima de 3,0 m para as pilhas de toras e 6,0 m para as pilhas de cavacos. Foi considerado o fator de correção de 3,0 para contabilizar os espaços entre as pilhas no pátio ou no campo, incluindo a área de manobra para a movimentação da carga. Para o cálculo, também foi utilizado o fator de empilhamento (Fe) que converte o volume sólido em volume empilhado. Além disso, considerou-se que a área estimada garanta o estoque de pelos dois meses de madeira na falta de abastecimento.

$$\mathrm{A} = \frac{\frac{V \times Fe}{h} \times 3}{10000} \times e \quad (4.4)$$

Em que,

A – Área de estocagem, ha;

V – Volume de madeira sólido mensal para atender a termelétrica, m$^3$;

h – Altura da pilha, m;

e – tempo de estoque (mês)

Fe – Fator de empilhamento de toras (Fet) ou cavacos (Fec).

O custo do cavaqueamento (CCa) foi baseado no trabalho de Acuna et al. (2012a) que associou o custo da atividade por volume cavaqueado (R$ $m^{-3}$) com a umidade da madeira (base úmida) em três faixas: maior de 50%, de 50 a 36%, e abaixo ou igual a 35%. Os custos encontrados para o cavaqueamento estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Custo de cavaqueamento por $m^3$ de madeira em diferentes umidades durante a estocagem.

| Umidade da madeira (% base úmida) | R$ $m^{-3}$ |
|---|---|
| <= 35% | 12,9 |
| De 36% a 50% | 8,3 |
| >= 50% | 6,8 |

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros e fatores utilizados nos diferentes cálculos realizados no trabalho.

Tabela 4.3 – Parâmetros e fatores de conversão utilizados.

| Parâmetros e fatores de conversão | Símbolo | Valor |
|---|---|---|
| *Relativos à geração de energia elétrica* | | |
| Potência da termelétrica | P | 20 MW |
| Quantidade de vapor | Qv | 80000 kg $h^{-1}$ |
| Entalpia do vapor | hv | 3,394 MJ $kg^{-1}$ |
| Entalpia da água | ha | 0,439 MJ $kg^{-1}$ |
| Rendimento da caldeira | $\eta$ | 89% |
| Horas produtivas no mês | hm | 680 horas |
| *Relativos à madeira* | | |
| Poder calorífico superior | PCS | 19,00 MJ $kg^{-1}$ |
| Poder calorífico inferior | PCI | 17,65 MJ $kg^{-1}$ |
| Densidade básica da madeira | Db | 460 kg $m^{-3}$ |
| Densidade à granel | Dg | 300 kg $m^{-3}$ |
| Densidade de pilha das toras | Dpt | 0,56 |
| Densidade de pilha dos cavacos | Dpc | 0,42 |
| Fator de empilhamento das toras | Fet | 1,79 |
| Fator de empilhamento dos cavacos | Fec | 2,43 |
| *Relativos as operações florestais* | | |
| Preço médio do frete no mercado | Pf | R$ 4,00 $km^{-1}$ |
| Distância da floresta até a indústria | d | 100 km |
| Valor da terra no Estado de SP | Vt | R$ 20.000,00 $ha^{-1}$ |
| Taxa de juros | r | 0,50% $mês^{-1}$ |
| Capacidade de carga do caminhão | Ca | 100 $m^3$ |

Por último, o custo mensal do volume de madeira entregue a termelétrica foi determinado considerando a quantidade de biomassa necessária para suprir a demanda energética da unidade. Obtendo-se este montante, foi possível estimar o custo por MWh, por meio da Equação 4.5.

$$\mathrm{CEn} = \frac{V(CCo + CT + CCa + CE)}{P \times h} \quad (4.5)$$

Em que,

CEn – custo operacional da energia elétrica gerada na termelétrica, R$ $MWh^{-1}$;

V – volume de madeira sólido mensal demandado para atender a termelétrica, $m^3$;

CCo – custo de colheita, R$ $m^{-3}$;

CT – custo de transporte, R$ $m^{-3}$;

CCa – custo de cavaqueamento, R$ $m^{-3}$;

CE – custo de estocagem, R$ $m^{-3}$;

P – potência da termelétrica,MW;

hm – horas produtivas no mês, horas.

### 4.2.4 Umidade da madeira de toras e cavacos durante a estocagem

Para a umidade da madeira estocada na forma de toras ou cavacos em condições tropicais, foram utilizados os dados obtidos nos Capítulos 1 e 2 deste material, estimados para os seguintes tempos de estocagem: 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias. Também, foi utilizada a marcha de secagem diária obtida para as toras durante o período outono e inverno (Capítulo 2). Para as cadeias de operações II e III, como a estocagem foi realizada em toras, a umidade final foi a mesma (Tabela 4.4).

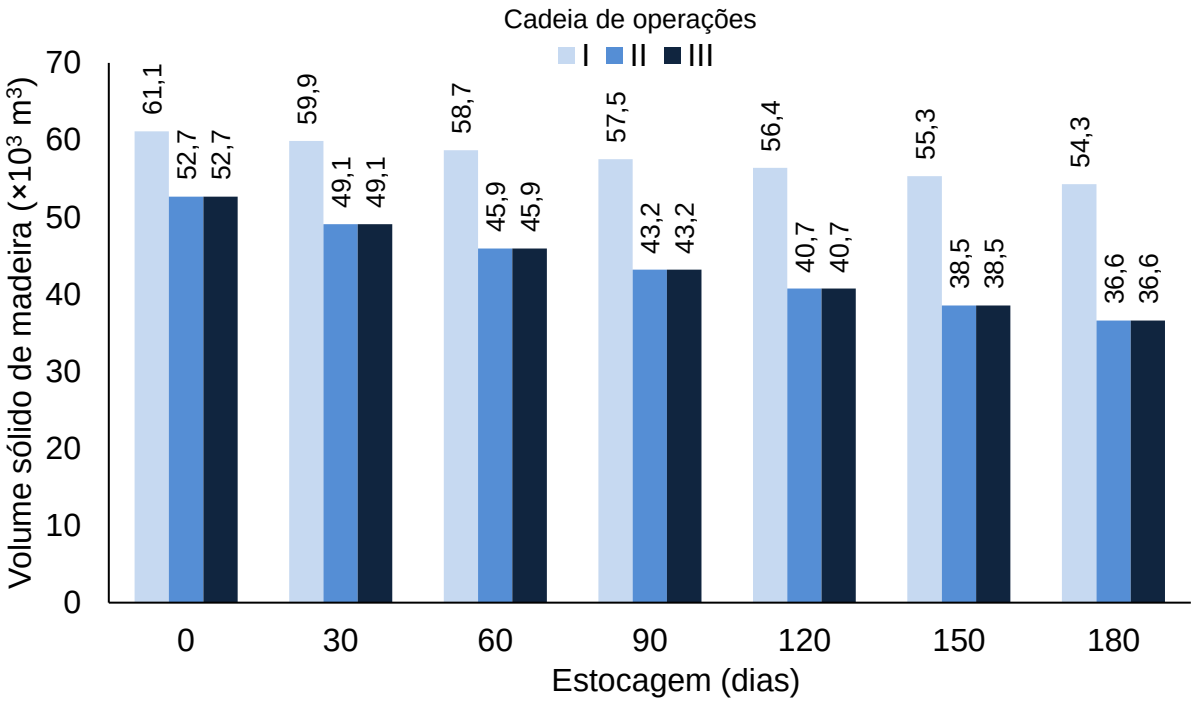
Tabela 4.4 – Umidade base úmida (%) durante a estocagem da madeira no campo.

| Cadeia de operações | Tempo de estocagem (dias) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| I | 59,0 | 58,1 | 57,2 | 56,4 | 55,5 | 54,7 | 53,8 |
| II | 52,4 | 48,9 | 45,4 | 42,0 | 38,5 | 35,0 | 31,5 |
| III | 52,4 | 48,9 | 45,4 | 42,0 | 38,5 | 35,0 | 31,5 |

## 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4.2 está apresentado o volume de madeira sólido para abastecer uma termelétrica com potência de 20 MW e energia elétrica gerada de 13600 MWh por mês a uma distância de 100 km da fonte de biomassa até a unidade de conversão. Essa distância foi fixada para entender o efeito da umidade da madeira nos cenários estudados.

**Figura 4.2 – Demanda de volume sólido de madeira para abastecimento mensal da termelétrica (20 MW) nas três cadeias de operações florestais estudadas.**



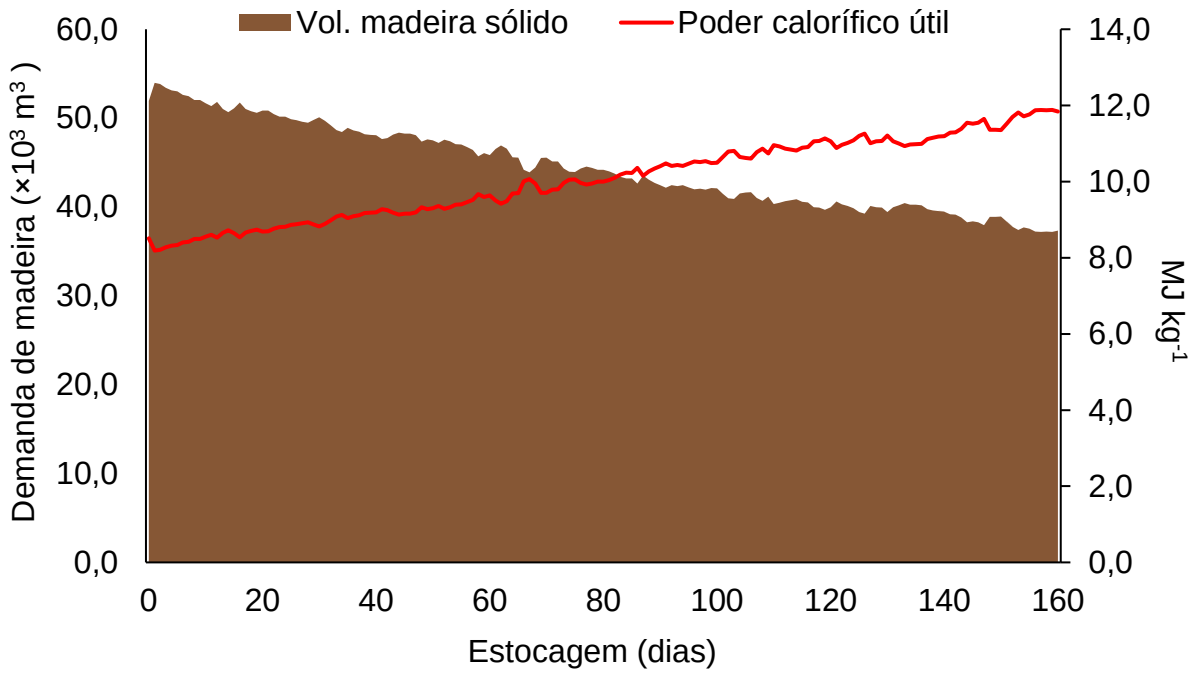

Como as cadeias II e III possuem o mesmo tipo de estocagem e umidade final da madeira, a quantidade necessária para suprir a unidade de conversão foi a mesma. A cadeia de operações I foi aquela que mais demandou madeira, já que a umidade permaneceu alta (>53% b.u.) em todos os meses de estocagem.

Foi possível observar que a quantidade de madeira diminuiu com o tempo de estocagem, sendo que houve uma redução de até 30,5% no volume necessário para suprir a termelétrica após 180 dias de estocagem nas cadeias II e III.

De fato, o aproveitamento da madeira mais seca aumenta a eficiência na geração de energia, esse comportamento pode ser detalhado quando considerado a variação do poder calorífico útil (PCU) ao longo da estocagem (Figura 4.3).

Na prática, o PCU é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível deduzidas as perdas da evaporação da água na madeira (TELMO; LOUSADA, 2011, BRITO, 1993). A demanda de madeira tende a se estabilizar à medida que a biomassa fica estocada no campo e atinge uma umidade de equilíbrio.

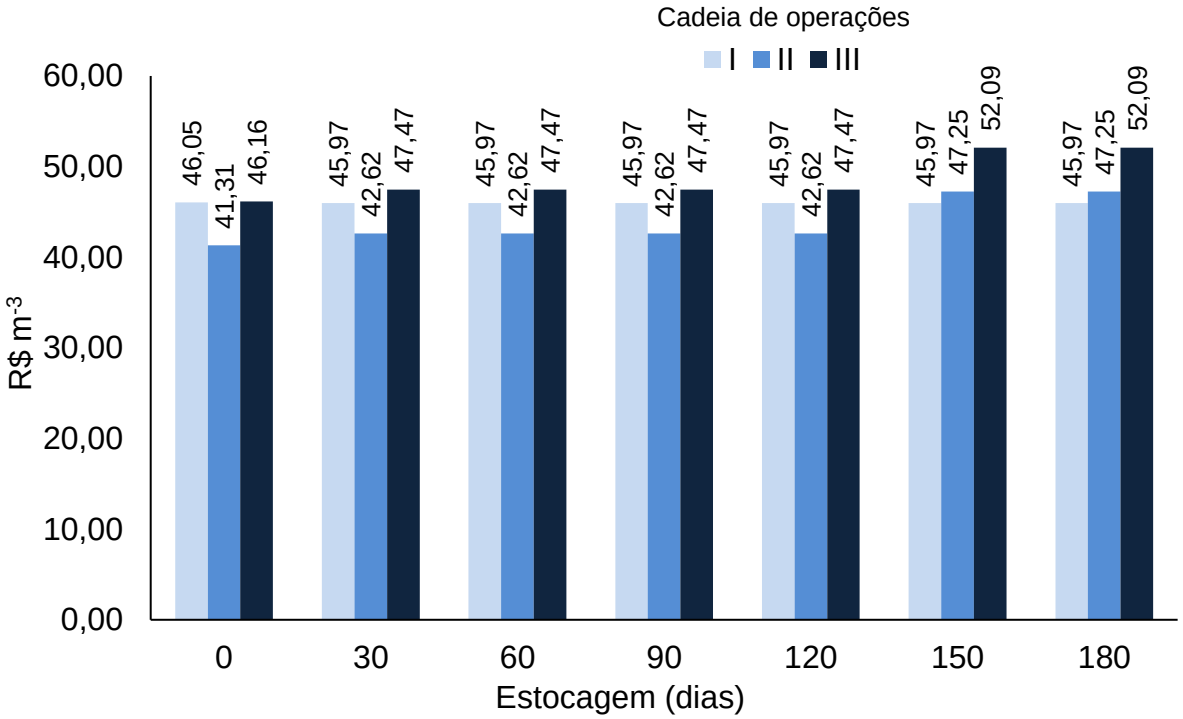
**Figura 4.3. Poder calorífico útil e volume de madeira mensal demandado pela termelétrica (20 MW) para a estocagem de toras em condições tropicais.**




No planejamento e administração florestal, os resultados sugerem que o uso da madeira com menor umidade ou a mais tempo estocada reflete diretamente na área de floresta a ser colhida para abastecimento da unidade de conversão, bem como a área a ser plantada nos anos seguintes, o que destaca a importância da qualidade da madeira e seu efeito na cadeia de operações florestais (ACUNA et al., 2012a; SOSA et al., 2015, ZANUNCIO, et al., 2017).

O custo operacional do $m^3$ sólido de madeira entregue na termelétrica está apresentado na Figura 4.4. Para a estocagem até 120 dias, o custo por $m^3$ foi menor na Cadeia II, seguido das Cadeias I e III, respectivamente. A partir dos 150 dias de estocagem, há uma inversão nos valores e aumento do valor para a Cadeia II, tal situação deve-se ao custo de cavaqueamento da madeira seca que aumenta substancialmente quando a umidade é menor ou igual a 35% b.u. (vide Tabela 4.1).

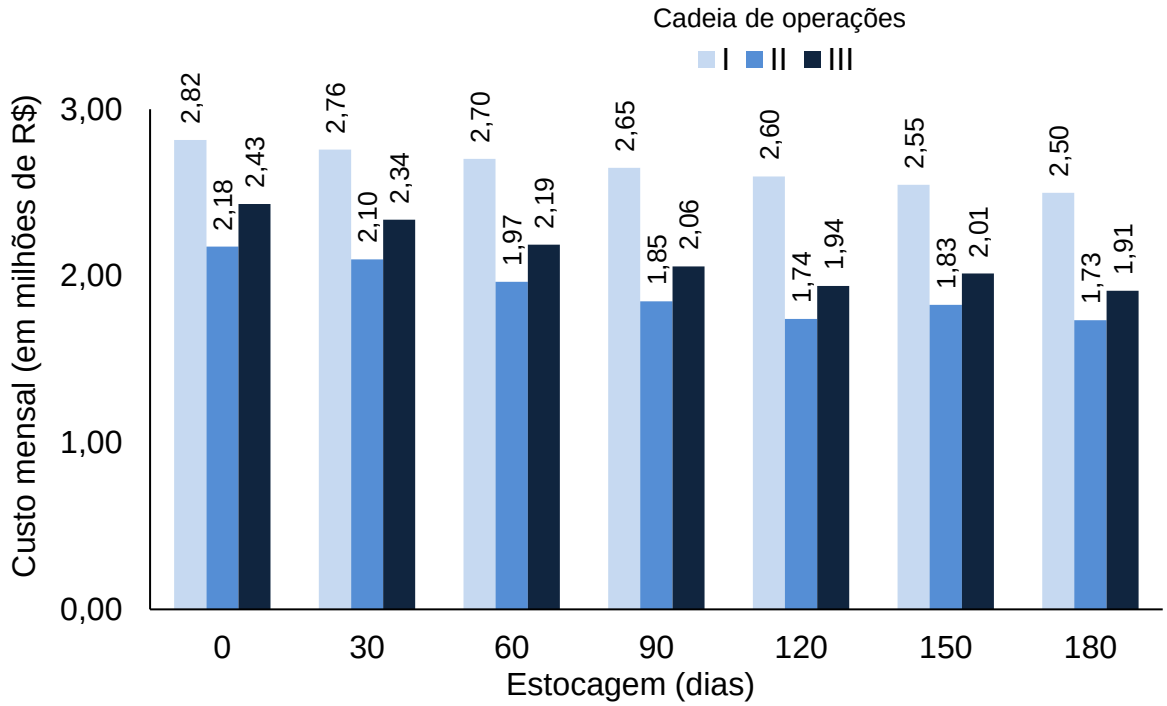
**Figura 4.4 – Custo do m³ sólido de madeira entregue na unidade de conversão em diferentes períodos de estocagem e cadeias de operações florestais.**




O custo operacional por m³ de madeira entregue na termelétrica foi o mesmo durante a maior parte da estocagem, já que os resultados foram obtidos com base no volume sólido. Tal situação é melhor compreendida quando analisado o custo operacional mensal que leva em conta a demanda de madeira para abastecimento da termelétrica (Figura 4.5).

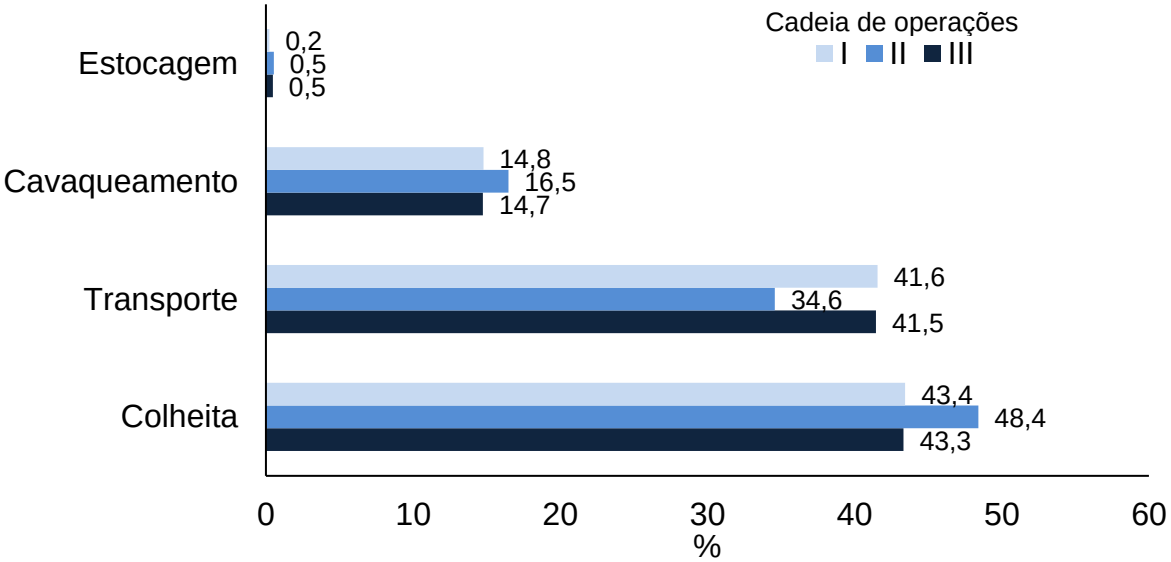
Os valores para abastecimento da termelétrica mostram que a cadeia I é aquela mais onerosa, o que é explicado pela maior demanda de biomassa, já que a mesma apresenta uma alta umidade independente do tempo de estocagem da madeira no campo, como já reportado anteriormente. Uma saída para redução deste custo é realizar a estocagem dos cavacos sob algum tipo de cobertura, como discutido no Capítulo 1.

**Figura 4.5 – Custo operacional mensal em função da demanda de madeira necessária para abastecimento da termelétrica de 20 MW.**




De forma mais detalhada, o custo operacional por $m^3$ de madeira é onerado principalmente pelas atividades de colheita e transporte florestal (Figura 4.6), estas atividades juntas, representam mais de 80% do montante. De fato, apenas o transporte de madeira no Brasil pode representar até 60% do custo logístico (ALVES et al., 2013).

**Figura 4.6 – Custo operacional percentual de cada etapa nas cadeias de operações florestais para 120 dias de estocagem.**

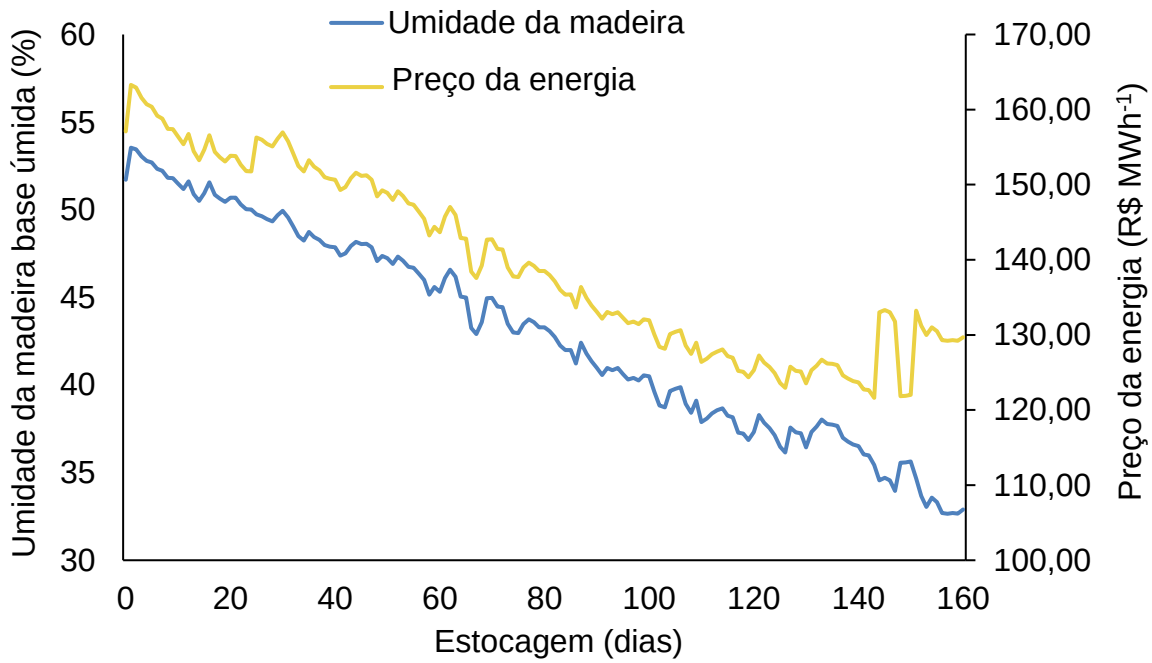


Para o custo da etapa de cavaqueamento, o valor pode ser reduzido se a atividade for realizada no pátio da indústria por picadores estacionários (DIEGO et al., 2016).

Já a operação de estocagem foi aquela que menos acarretou no custo operacional nas cadeias avaliadas, próximo a 0,5%, esse comportamento também foi observado por Acuna et al. (2012a) que encontrou valores até 0,9% para estocagem da madeira em até dois anos na Finlândia.

O efeito da umidade da madeira no custo de energia produzido na termelétrica pode ser observado na Figura 4.7.

**Figura 4.7 – Variação no preço de energia gerada (R$ MWh$^{-1}$) na estocagem de toras em condições tropicais.**

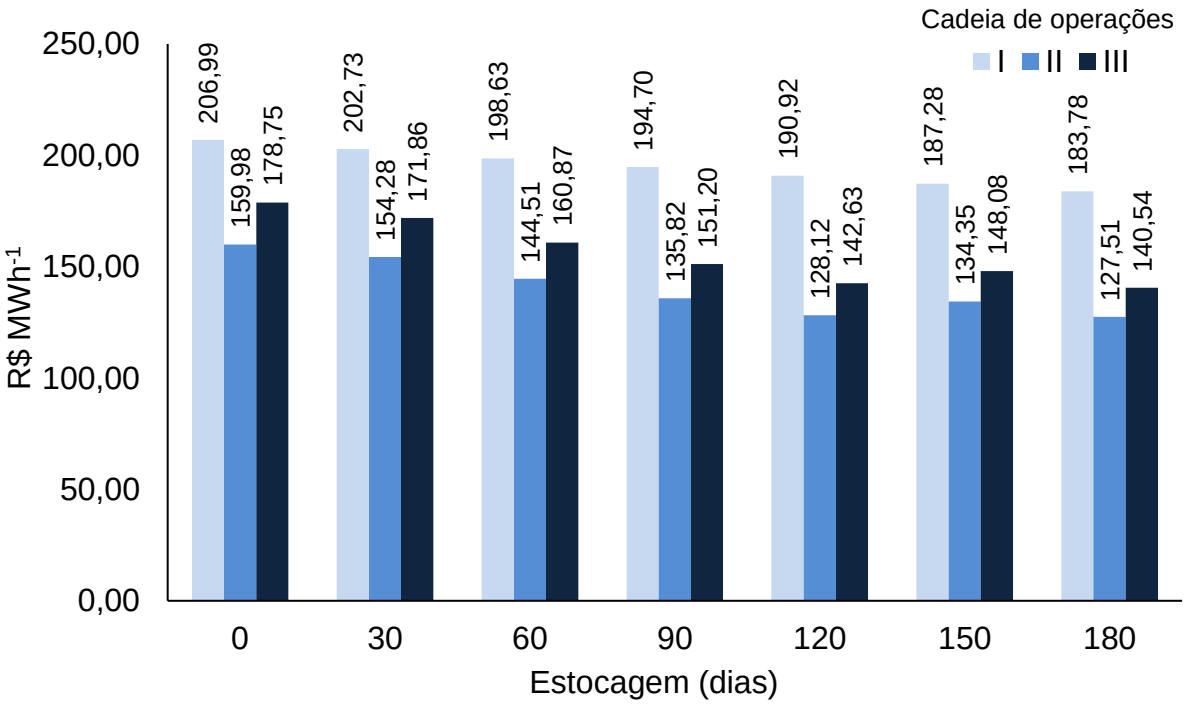



Com o aumento da estocagem e a redução da umidade, há também uma redução no preço da energia gerada. Levando em consideração o Capítulo 2, este preço estará condicionado a umidade relativa do ar e ao tempo de estocagem, já que estas variáveis tem um efeito significativo na predição da umidade da madeira.

Após um período seco, há o barateamento da energia elétrica gerada a partir da madeira, já que a menor quantidade de chuva favorece uma maior secagem da biomassa estocada sem cobertura e ao ar-livre no campo ou no pátio da indústria.

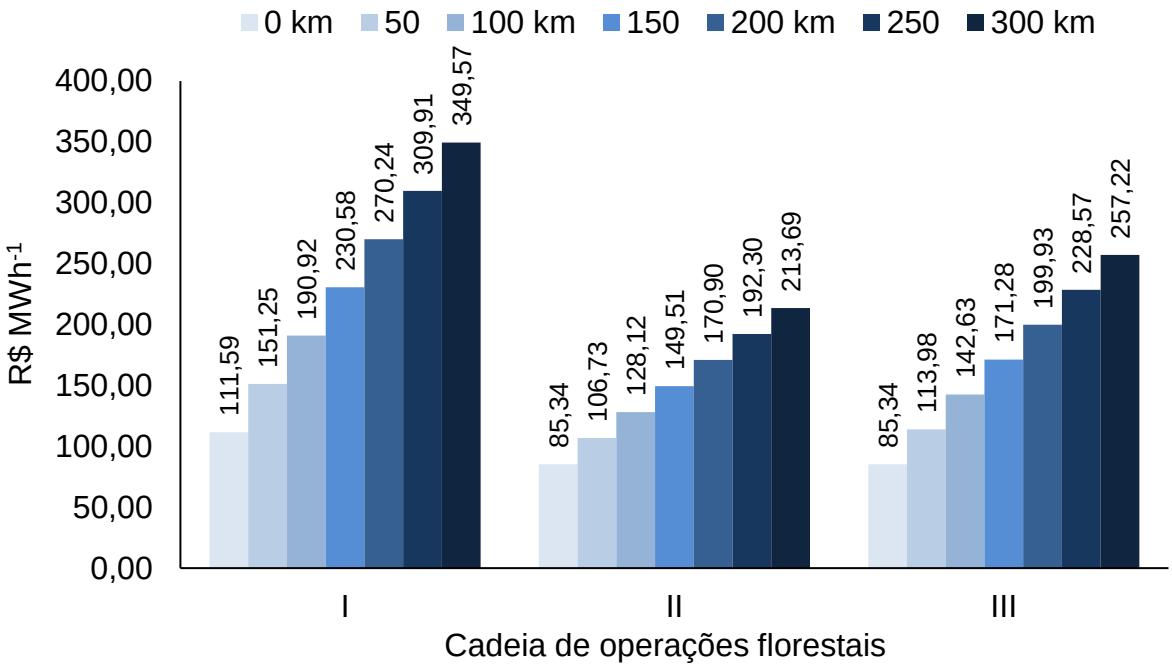
O menor custo da energia elétrica foi encontrado na cadeia de operações florestais II aos 120 dias de estocagem (Figura 4.8), seguido pela Cadeia III, e por último, a Cadeia I. Foram encontradas diferenças de 13,8% a 33,0% no custo unitário da produção de MWh entre as cadeias de operações nos períodos estudados para uma distância de até 100 km da termelétrica.

**Figura 4.8 – Variação do preço do MWh gerado em função do período de estocagem para as cadeias de operações florestais estudadas.**




A distância da floresta até a unidade de conversão é um fator limitante no aproveitamento da madeira para geração de energia elétrica. A Figura 4.9 apresenta o custo unitário da energia produzida em diferentes raios de transporte até a termelétrica. As cadeias II e III obtiveram o menor custo para produção de energia (R$ 85,34 $MWh^{-1}$) para a menor distância possível.

**Figura 4.9 – Custo da energia produzida para as cadeias operacionais em diferentes distâncias até a unidade de conversão após 120 dias de estocagem.**

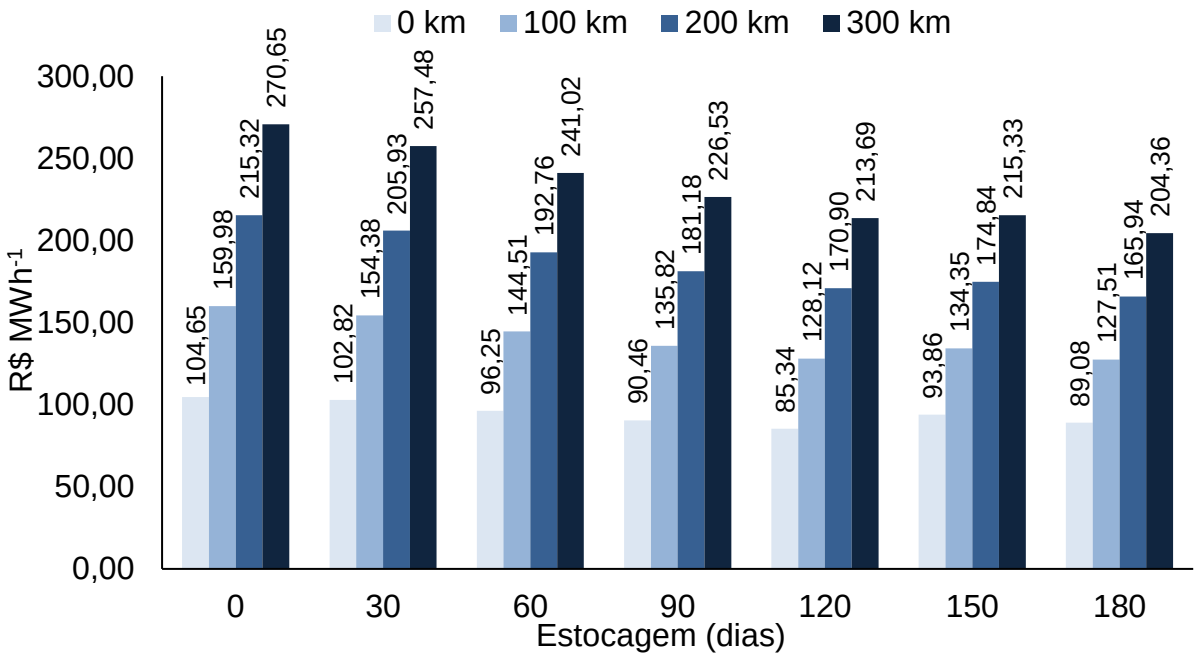



Os maiores valores obtidos nas Cadeias I e III quando comparado a Cadeia II se deve ao transporte da biomassa exclusivamente na forma de cavacos, já que há uma redução de até 33% no volume sólido de madeira transportado quando comparado com a madeira em toras para a mesma capacidade de carga no caminhão. O transporte na forma de toras também foi mais eficiente no trabalho do Diego et al. (2016) estudando diferentes cadeias de operações florestais para bioenergia na Itália.

Adicionado ainda o efeito do tempo de estocagem na distância no custo da energia elétrica produzida na cadeia de operações florestais II, nota-se que o menor valor poderia ser obtido após 120 dias de estocagem (Figura 4.10).

Os valores encontrados mostram que um maior período de estocagem permite o aumento do raio de transporte da madeira até a termelétrica. Além disso, a estocagem tem influencia direta na redução do número de viagens necessárias para abastecimento fabril, Zanuncio et al. (2017) encontraram uma redução de 27.8% no número de viagens para abastecimento de uma indústria de papel e celulose após 90 dias de secagem da madeira em toras de *Eucalyptus urophylla*.

**Figura 4.10 – Custo da energia gerada em função das distâncias até a termelétrica para a Cadeia de operações florestais II.**




Embora os custos encontrados possam aumentar com a distância de transporte e a umidade, o uso da madeira para geração de energia elétrica fica condicionada ao preço da energia vendida no mercado. Como exemplo, tem-se o histórico do preço de liquidação das diferenças (PLD) da energia vendida no mercado livre no ano de 2018 e 2019 (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Histórico da média mensal do preço de liquidação das diferenças (PLD) em R$ $MWh^{-1}$ para o submercado sudeste e centro-oeste (SE/CO).

| Mês | Ano base | |
|---|---|---|
| | 2018 | 2019 |
| Janeiro | R$ 180,07 | R$ 192,10 |
| Fevereiro | R$ 188,79 | R$ 443,66 |
| Março | R$ 219,23 | |
| Abril | R$ 109,71 | |
| Maio | R$ 325,46 | |
| Junho | R$ 472,87 | |
| Julho | R$ 505,18 | |
| Agosto | R$ 505,18 | |
| Setembro | R$ 472,75 | |
| Outubro | R$ 271,83 | |
| Novembro | R$ 123,92 | |
| Dezembro | R$ 78,96 | |

Fonte: CCEE (2019)

O preço da energia para biomassa é muito favorável nos meses que englobam as estações outono e inverno, já que há uma redução das chuvas e consequentemente uma redução da geração de energia pelas hidrelétricas.

Levando em conta apenas o histórico do PLD no ano de 2018 e 2019, bem como apenas os custos operacionais levantados neste trabalho, as Cadeias de operações florestais II e III poderiam entregar a biomassa até 100 km de distância durante quase o ano todo, exceto nos meses de novembro, dezembro e abril. O mesmo acontece com a Cadeia I, entretanto para uma distância de 50 km.

Silva et al. (2007) estudando o custo de diferentes tipos de veículos de transporte de madeira (rodotrem, bitrem, tritem, caminhão truck, entre outros) também reportaram um raio de distancia máximo de 100km para o aproveitamento da madeira de reflorestamentos.

Neste estudo, para ambas as cadeias, o transporte da madeira acima de 200 km inviabiliza o uso da madeira para produção de energia elétrica nas épocas chuvosas, sobretudo no verão.

## 4.4 CONCLUSÕES

A umidade da madeira influenciou até 30% na demanda de volume de madeira para abastecimento da termelétrica. Foram observadas diferenças de até 33% no custo unitário da energia gerada entre as cadeias de operações florestais estudadas.

A colheita e o transporte foram as atividades que mais oneraram o uso da madeira para geração de energia (>80%). A cadeia menos custosa foi aquela com a estocagem e transporte da madeira em toras, e a atividade de cavaqueamento realizada no pátio da termelétrica. Para um aproveitamento mais eficiente, as toras deveriam ser estocadas no período de 120 dias e transportadas em uma distância máxima de 100 km.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN) e a empresa Leonello Transportes.

## REFERÊNCIAS

ACUNA, M.; ANTTILA, P.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; ASIKAINEN, A. Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 33, n. 2, p. 225-238, 2012a.

ACUNA, M.; MIROWSKI, L.; GHAFFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Optimising transport efficiency and costs in Australian wood chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v.46, n. 2, p. 291-300, 2012b.

ALVES, R.T.; FIEDLER, N.C.; SILVA, E.N.; LOPES, E.S.; CARMO, F.C.S. Technical analysis and transportation costs of wood with different types of vehicles. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p.897-904, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASABE ASAE D472-3** standards 2001: machinery, equipment, and buildings: operating costs. Ames, 2001. 226p.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o desenvolvimento**: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais. São Paulo: SBS; [S.l.]: SBEF, 1993. v. 3. p. 280-282

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Preço médio**. CCEE, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/> Acesso em: 3 mar. 2019.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia.** 2009. 127 f. Tese (doutor em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

DIEGO, R.; GIORGIO, M.; GIUSEPPE, L.; ALESSANDRO, D.R. Wood energy plants and biomass supply chain in Southern Italy. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 223, p. 849-856, 2016.

FOREST ENERGY PORTAL. **Illustrations for your presentations and publications**, COST- European Cooperation in Science and Technostemy, IEA Bioenergy e project Metsäenergia, 2017. Disponível em: http://www.forestenergy.org/pages/images/

GHAFFARIYAN, M. R.; ACUNA, M.; BROWN, M. Biomass harvesting residue supply chain optimisation and verifying the effect of major parameters affecting the supply chain cost in Western Australia. **Transportation**, v.18, p.16-3, 2014.

HUGOT, E. Producción de Vapor. In: CONTINENTAL, C. E. (Ed.). **Manual para ingeneiros azucareros.** 4. ed. México: 1976. p. 603–705.

JIRJIS, R. **On-site biomass moisture management for transportation and boiler efficiency**. Making Bioenergy Projects Work – Manage Supply Chains . Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), jun. 2009. Disponível em: <http://www.canbio.ca/upload/documents/sherbrooke09jirjis.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2015.

MIRANDA, M. A. S.; RIBEIRO, G. B. D.; VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C. Eucalyptus sp. woodchip potential for industrial thermal energy production. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, e410604, 2017.

MIYAJIMA, R.H. **Influência do relevo e da experiência dos operadores nos rendimentos e custos da colheita de madeira de eucalipto**. 2015. 107f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2015.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba-MG**. 2005. 94f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

PEREA, L.A. **Avaliação técnico-econômico do processo de cogeração em uma indústria sucroalcooleira**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

RIBEIRO, G. B. D. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal**. 2018. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2018.

SEARCY, E.; FLYNN, P.; GHAFOORI E.; KUMAR, A. The Relative Cost of Biomass Energy Transport. A**pplied Biochemistry and Biotechnology,** v. 137-140, n. 1-12, p. 639-652, 2007.

SILVA, M.L.; OLIVEIRA, R.J.; VALVERDE, S.R.; MACHADO, C.C.; PIRES, V.A.V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338–351, 2015.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

ZANUNCIO, A.J.V.; CARVALHO, A.G.; SILVA, M.G.; LIMA, J.T. Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 147-152, 2017.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo uniu diversos campos da ciência florestal a fim de avaliar e destacar o efeito da umidade da madeira no rendimento e no custo final da mesma entregue na fábrica, sendo uma oportunidade para otimização do sistema, por meio da seleção da cadeia de operações florestais mais eficiente.

As variações diárias de umidade foram diferentes para os períodos analisados, bem como para as estações do ano. As maiores perdas de umidade foram observadas no período de menor precipitação acumulada.

A umidade relativa do ar e o número de dias (tempo de estocagem) foram as variáveis mais significativas para a predição da umidade da madeira de pilhas de toras longas.

A estocagem da madeira na forma de toras foi mais eficiente para redução da umidade e aumento do conteúdo energético no ambiente tropical. Quando armazenada na forma de cavacos, a biomassa deve ser estocada sob algum tipo de cobertura.

Os diâmetros das toras têm grande efeito na secagem da madeira e no conteúdo energético final. As toras de menores dimensões tiveram um ganho energético maior comparado com as toras de maiores diâmetros. O aumento de uma unidade (cm) de diâmetro das toras ocasionou um aumento de 1,7 pontos percentuais na umidade (base úmida) após a estocagem.

A presença e quantidade de cerne e alburno tem grande influencia nas propriedades da madeira quando analisada entre as classes de diâmetro das toras. Considerando a composição química imediata da madeira, houve um acréscimo no teor de cinzas das amostras após a estocagem.

A cadeia menos onerosa foi aquela com a estocagem e transporte da madeira em toras, e a atividade de cavaqueamento realizada no pátio da termelétrica. A colheita e o transporte florestal foram as atividades que mais oneraram as cadeias.

Foi possível encontrar uma diferença de até 33% no custo unitário da energia elétrica gerada devido a umidade da madeira. Os menores custos foram encontrados a partir de 120 dias de estocagem da madeira em toras e até 100 km de distância da termelétrica.

## REFERÊNCIAS

ACKERMAN, P. et al. The COST model for calculation of forest operations costs. **International Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 1, p. 75-81, 2014.

ACUNA, M.; ANTTILA, P.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; ASIKAINEN, A. Predicting and controlling moisture content to optimise forest biomass logistics. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 33, n. 2, p. 225-238, 2012a.

ACUNA, M.; MIROWSKI, L.; GHAFFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Optimising transport efficiency and costs in Australian wood chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v.46, n. 2, p. 291-300, 2012b.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASABE ASAE D472-3** standards 2001: machinery, equipment, and buildings: operating costs. Ames, 2001. 226p.

BADGER, P. C. **Processing cost analysis for biomass feedstocks**. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2002/199, Tennessee, EUA. 53 p.

BARONTINI, M. et al. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. **Biomass and bioenergy**, n. 62, p. 17-25, 2014.

BINKLEY D.; CAMPO, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L.THE interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management** v. 405, p. 271–283, 2017.

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

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2581–2588, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2018**: Relatório Síntese, ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2018. 62p.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o desenvolvimento**: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais. São Paulo: SBS; [S.l.]: SBEF, 1993. v. 3. p. 280-282

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

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia.** 2009. 127 f. Tese (doutor em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

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

ERIKSSON, L. O.; BJÖRHEDEN, R. Optimal storing, transport and processing for a forest-fuel supplier. **European Journal of Operational Research**, v. 43, n. 1, p. 26-33, 1989.

EUFRADE JUNIOR, H. J.; MELO, R. X.; SARTORI, M. M. P.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 15-21, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14778:2011**. Solid Biofuels: Sampling. Brussels, 2011, 68p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14774-1:2009**. Solid Biofuels: Determination of moisture content - Oven dry method, Part 1 - Total Moisture Reference Method. Brussels, 2009, 80p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. What woodfuels can do to mitigate climate change. Forestry paper 162. Rome, 2010, 83p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/013/i1756e/i1756e00.pdf> Acesso em: 11 ago. 2015.

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

FRANCESCATO, V. et al. **Wood fuels handbook: production, quality requirements, trading**. Italian Agroforestry Energy Association (AIEL), Legnaro, Italy, v. 1, 2008, 79p.

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

GHAFFARIYAN, M. R.; ACUNA, M.; BROWN, M. Biomass harvesting residue supply chain optimisation and verifying the effect of major parameters affecting the supply chain cost in Western Australia. **Transportation**, v.18, p.16-3, 2014.

GONÇALEZ, J. C. et al. 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.

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

GUNNARSSON, H.; RÖNNQVIST, M.; LUNDGREN, J. T. Supply chain modelling of forest fuel. **European Journal of Operational Research**, v. 158, n. 1, p. 103-123, 2004.

HAMELINCK C, SUURS R, FAAIJ A. International bioenergy transport costs and energy balance. **Biomass and Bioenergy**, n. 29, p. 114–134, 2005.

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips**. Technology Programme Report 5. Helsinki, Finland; Tekes, 2003, 54 p.

IBÁ. **Relatório 2017**. Indústria brasileira de árvores, Brasília: IBÁ; 2017. 80p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA. **Principles of nutrient management for sustainable forest bioenergy production.** IEA Bioenergy Task 31, ExCo62 Doc 07.03b, 2008. Disponível em: <http://www.ieabioenergytask43.org/Task_31_Web_Site/IEA_Bioenergy_Task_31/IEA%20Task%20Technol%20Report%20to%20ExCo62%20final.pdf> Acesso em; 12 ago. 2015.

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

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

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 193–201, 2005.

JIRJIS, R. **On-site biomass moisture management for transportation and boiler efficiency**. Making Bioenergy Projects Work – Manage Supply Chains . Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), jun. 2009. Disponível em: <http://www.canbio.ca/upload/documents/sherbrooke09jirjis.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2015.

KANZIAN, C.; HOLZLEITNER, F.; STAMPFER, K.; ASHTON, S. Regional energy wood logistics–optimizing local fuel supply. **Silva Fennica**, v.43, n. 1, p. 113-128, 2009.

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

KOFMAN, P. D. **Quality wood chip fuel**. Coford. Harvesting and Transportation, n. 6, Denmark, 2006.

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; HAMELINCK, C.; FAAIJ, A. Developments in international solid biofuel trade—An analysis of volumes, policies, and market factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3176–3199, 2012.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland**. Espoo, Finland: VTT, Research Notes 2229, 2004, 132 p.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M.. ÂNGELO, J. A.; OKAWA, H. Sistema integrado de custos agropecuários – custagri. **Informações Econômicas**, SP, v.28, n.1, 1998.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba-MG**. 2005. 94f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

POPP, J.; LAKNER, Z.; HARANGI-RÁKOS, M.; FÁRI, M. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 559–578, 2014.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21 Secretariat, França, Paris. 2019. 324p.

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

SÃO PAULO. **Plano paulista de energia 2020**. Secretaria de Energia. São Paulo: PPE2020, 2012.

SAVOIE, P.; AUDY-DUBÉ, M.-A.; THIBODEAU, F.; MORISSETTE, R. **Mechanical Sieving and Image Analysis to Determine Length and Shape of Processed Woody Particles**. ASABE Paper N.141898507. St. Joseph, Mich.: ASABE, 2014, 7p.

SEARCY, E.; FLYNN, P.; GHAFOORI E.; KUMAR, A. The Relative Cost of Biomass Energy Transport. A**pplied Biochemistry and Biotechnology,** v. 137-140, n. 1-12, p. 639-652, 2007.

SEIXAS, F. **Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira**. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, v. 5, p. 1-27, 2001.

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

SIKANEN, L.; RÖSER, D.; ANTTILA, P.; PRINZ, R. **Forecasting algorithm for natural drying of energy wood in forest storages**. Forest Energy Observer. Study Report n.27, 7p., 2012.

SILVÉRIO, F. O. et al. Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in Eucalyptus cultivated in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4878–4886, 2008.

SILVA, M. L. da; OLIVEIRA, R. J. de; VALVERDE, S. R.;. MACHADO, C. C; PIRES, V. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.6, p.1073-1079, 2007.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338–351, 2015.

SOUZA, G. M.; VICTORIA, L. R.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. **Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps. São Paulo, SCOPE and FAPESP**. Disponível em: <http://bioenfapesp.org/scopebioenergy/images/chapters/bioenergy_sustainability_scope.pdf>. Acesso em: 13 set. 2015.

SPINELLI, R.; ELIASSON, L.; MAGAGNOTTI, N. Determining the repair and maintenance cost of wood chippers. **Biomass and bioenergy**, v. 122, p. 202-2010, 2019.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. D. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. BNDES Setorial, n. 33, mar. 2011, p. 261-314. Disponpivel em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523> Acesso em: 02 mar. 2019.

ZANUNCIO, A. J. V.; et al. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of Eucalyptus and Corymbia logs, **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.17 , p. 335-344, 2015.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia forestalis**, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.