

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

RAIANA AUGUSTA GRANDAL SAVINO BARBOSA

**EFEITO DA DETERIORAÇÃO DA MADEIRA ESTOCADA EM CAMPO PARA
FINS ENERGÉTICOS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

RAIANA AUGUSTA GRANDAL SAVINO BARBOSA

**EFEITO DA DETERIORAÇÃO DA MADEIRA ESTOCADA EM CAMPO PARA
FINS ENERGÉTICOS**

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

Orientador: Vinicius Resende de Castro

Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira
Carneiro

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

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

T

B238e
2020
Barbosa, Raiana Augusta Grandal Savino, 1994-
Efeito da deterioração da madeira estocada em campo para fins
energéticos / Raiana Augusta Grandal Savino Barbosa. - Viçosa, MG,
2020.

91 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Vinicius Resende de Castro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 71-86.

1. Madeira - Deterioração. 2. Biomassa florestal. 3. Madeira -
Armazenamento. 4. Densitometria. 5. Madeira - Secagem.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.98529

RAIANA AUGUSTA GRANDAL SAVINO BARBOSA

**EFEITO DA DETERIORAÇÃO DA MADEIRA ESTOCADA EM CAMPO PARA
FINS ENERGÉTICOS**

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

APROVADA: 03 de novembro de 2020.

Assentimento:


Raiana Augusta Grandal Savino Barbosa
Autora


Vinicius Resende de Castro
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e saúde, e todas as criaturas divinas, por me abençoarem e darem forças de continuar e chegar até aqui.

À minha família, por todo carinho e apoio quando decidi que era hora de alçar um voo mais alto, mesmo que isso implicasse no aumento da distância física entre nós. Principalmente à minha mãe, Rosana, minha maior parceira, incentivadora e exemplo de garra.

Ao meu namorado Luiz Felipe, por todo companheirismo, apoio, carinho, compreensão e, sobretudo, por sempre se fazer presente, mesmo muitas vezes estando longe.

À Universidade Federal de Viçosa, que foi minha casa por dois anos, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal por essa grande realização e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento do projeto.

Ao meu orientador, Vinicius Resende de Castro, pela oportunidade de me orientar no decorrer do mestrado. Obrigada pelos ensinamentos, disposição, amizade e bom humor sempre presentes no dia a dia, também pelo exemplo de profissionalismo e empenho.

À minha coorientadora, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, por todo auxílio na elaboração, execução e desenvolvimento do projeto, além dos conhecimentos compartilhados.

Aos demais professores da área de Tecnologia da Madeira, por toda colaboração.

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e Laboratório de Celulose e Papel (LCP), por toda estrutura e equipamentos para a realização dos experimentos, principalmente aos funcionários e técnicos, que me auxiliaram sempre com muita disposição, em especial à Leila, Wellington, Fernanda, Edna, Lawrence, Éder, Bráulio, Francisco Bizerra, Sálvio (Moiado) e Gustavo.

À marcenaria da UFV, pela estrutura e funcionários, em especial ao Dentinho e Paulinho, que, muito pacientes e solícitos, sempre se fizeram disponíveis quando era preciso fazer as coletas ou cortar algum corpo de prova.

Aos colegas da família LAPEM/LPM, pelas conversas descontraídas, sugestões, disponibilidade para ajudar e, também, pelo acolhimento.

Aos meus orientadores de iniciação científica e TCC, Victor Hugo Pereira Moutinho e Fernando Wallase Carvalho Andrade, por me auxiliarem nos primeiros passos dentro do mundo da ciência.

Aos amigos de vida e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

BARBOSA, Raiana Augusta Grandal Savino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Efeito da deterioração da madeira estocada em campo para fins energéticos**. Orientador: Vinicius Resende de Castro. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do tempo de estocagem em campo nas propriedades físicas e químicas da madeira de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Árvores com 7 anos de idade foram seccionadas em toretes de 1 metro de comprimento, com casca, classificados em duas classes diamétricas, sendo CDI (DAP 6cm-11 cm) e CDII (DAP 11,1cm-14cm), distribuídos aleatoriamente em três alturas ao longo da pilha de estocagem instalada ao ar livre, em contato direto com o solo. A cada 60 dias foram retirados três toretes por classe diamétrica e posição na pilha para avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira por um período de 365 dias (outubro de 2018 a outubro de 2019). A presença de anomalias externas foi avaliada por meio de inspeções visuais realizadas a cada coleta, além da obtenção de teor de umidade, base seca, no sentido longitudinal e radial (medula-casca), densidade básica e aparente (de acordo com a norma NBR 7190 e por densitometria de raios X), composição química imediata e termogravimétrica (TG). A partir do teor de umidade, obteve-se também a curva de secagem das madeiras por classe de diâmetro e altura da pilha. A presença de anomalias foi verificada desde os 60 dias de estocagem, com incidência de organismos xilófagos, presença de líquen na superfície da madeira e fotodegradação. Tanto a classe de diâmetro quanto posição dos toretes na pilha da estocagem influenciaram na velocidade de secagem da madeira. Os toretes de menor classe de diâmetro chegaram próximo à umidade de saturação das fibras (37,0% aos 240 dias) antes que os de maior diâmetro (29,8% aos 365 dias). Em média, os toretes alcançaram o teor de umidade recomendado pela DN 227 de 40% na base seca, somente após 365 dias. Houve perda significativa da densidade da madeira. A escala *rainbow* associada à plotagem da superfície em 3D facilitou a visualização e interpretação da variação do perfil da densidade aparente da madeira devido à maior variabilidade de cores. Não houve alteração significativa na composição química imediata, exceto para o teor de cinzas da madeira localizada na região inferior da pilha aos 120 dias. Os perfis de degradação térmica foram semelhantes, com pequenas variações nas temperaturas correspondentes aos picos de degradação das hemiceluloses e celulose. Independente da classe de diâmetro, as madeiras localizadas na região superior da pilha tiveram os menores percentuais de perda de massa lenhosa e as que ficaram

em contato direto com o solo tiveram as maiores perdas. Verificou-se redução na densidade energética das madeiras de menor diâmetro das três regiões amostradas na pilha, bem como nas de maior diâmetro da região superior, e ligeiro incremento nas madeiras de maior diâmetro das demais regiões da pilha.

Palavras-chave: Biomassa florestal. Densitometria de raios X. Estocagem. Secagem da madeira.

ABSTRACT

BARBOSA, Raiana Augusta Grandal Savino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November 2020. **Deterioration effect of wood stored outdoors for energy purposes.** Adviser: Vinicius Resende de Castro. Co-adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The objective of this study was to evaluate the effect of storage time in the field on the physical and chemical properties of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* wood. Trees with 7 years old were sectioned in one-meter long logs, with bark, classified in two diametric classes, being CDI (DAP<11cm) and CDII (DAP>11.1cm), and randomly distributed at three heights along the storage pile installed outdoors in contact with the ground. Every 60 days, three logs were removed per diametric class and position in the pile, to evaluate the physical and chemical properties of the wood over 365 days (from October 2018 to October 2019). The presence of external anomalies was evaluated through visual inspections made at each data collect, besides the moisture content, dry basis, in the longitudinal and radial direction (pith-bark), basic and apparent density (according to NBR 7190 and by X-ray densitometry), immediate chemical composition and thermogravimetry (TG). From the moisture content, the wood drying curve was obtained, by diameter class and pile height. The anomalies has been verified since 60 days of storage, with an incidence of xylophagous organisms such as rotting fungi, termites, insects, in addition to the presence of lichen on the wood surface and photodegradation, caused by weathering. The diameter class and the position of the logs in the storage pile influenced the wood drying speed. The smaller diameter class logs reached fiber saturation point faster (37.0% at 240 days) than the larger ones (29.8% at 365 days). On average, the wood moisture content recommended by DN 227 of 40% on a dry basis was reached only after 365 days. There was a significative reduction of wood density. The rainbow scale associated with 3D surface plotting facilitated the visualization and interpretation of the wood apparent density variation due to its widest color range. There was no significant change in the immediate chemical composition, except for the ash content of the wood located in the lower region of the pile after 120 days. The thermal degradation profiles were similar, but small variations in temperatures corresponding to the degradation peaks of hemicelluloses and cellulose were observed. Regardless of the diameter class, the wood located in the upper region of the pile had the lowest percentages of mass loss and the ones in contact with the soil had the highest losses. There was a reduction in the energy density of the woods with the smallest diameter in the three regions

sampled in the pile, as well as those with the largest diameter in the upper region, in addition to a slight increase in the woods with the largest diameter in the other pile regions.

Keywords: Forest biomass. X-ray densitometry. Storage. Wood drying.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo geral	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
3. REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1. Eucalipto	12
3.2. Secagem da madeira	13
3.2.1. Relação água-madeira	14
3.2.2. Movimento da água na madeira.....	15
3.3. Estocagem da madeira.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1. Propriedades das madeiras	23
4.2. Inspeção visual das madeiras	27
4.3. Delineamento experimental.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. Presença de anomalias.....	28
5.2. Efeito do tempo de estocagem na redução do teor de umidade da madeira	32
5.2.1. Efeito da posição radial no teor de umidade da madeira durante a secagem	35
5.3. Densidade.....	39
5.3.1. Densidade Básica	39
5.3.2. Densidade Aparente.....	42
5.3.2.1. De acordo com a norma NBR 7190	42
5.3.2.2. Densidade aparente por imagens digitais de raios X	44
5.4. Análise termogravimétrica e composição química imediata da madeira estocada.....	53
5.5. Perda de massa lenhosa e densidade energética da madeira no sentido radial	61
6. CONCLUSÕES	69
7. RECOMENDAÇÕES	70
8. REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

O uso da biomassa florestal como fonte de energia desperta interesse por ser limpa e renovável quando comparada ao uso de combustíveis fósseis, como derivados do petróleo e carvão mineral, além de ser um combustível de baixo custo (GUO et al., 2015; BORGES et al., 2016). Em 2019 foram consumidos 154,2 milhões de m³ de madeira para uso industrial, principalmente pelos setores de celulose e energia (IBÁ, 2020).

O manejo das toras após a colheita, em especial para uso energético, requer planejamento, principalmente no que tange a estocagem, considerada como parte integrante do pré-tratamento da biomassa para uso em diversos segmentos, que abrange desde o armazenamento quando não há demanda suficiente no mercado, redução de custos de transporte e por fim sua conversão em energia (SOARES et al., 2006; BRAND et al., 2014; EUFRADE JUNIOR et al., 2016).

Logo, o teor de umidade da madeira é um dos parâmetros mais importantes para produção de energia, seja para queima direta, na forma de lenha, ou produção de carvão vegetal, pois a umidade reduz a eficiência energética, interfere no rendimento e qualidade do carvão produzido e tem influência direta no poder calorífico (ERBER et al., 2015; BRAND, GIESEL, 2017). Vale salientar que a Deliberação Normativa 227 do Estado de Minas Gerais, que estabelece os “*procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de florestas plantadas*”, cita que a madeira utilizada para essa finalidade deve ter teor de umidade, em base seca, inferior a 40% (COPAM, 2018).

O método mais utilizado para reduzir o teor de umidade da madeira em tora é a estocagem ao ar livre devido ao seu baixo custo em relação à secagem artificial. No entanto, os ganhos desse processo estão sujeitos a fatores como duração e época do ano da estocagem, condições meteorológicas, tipo de pavimentação, dimensões e arranjo das pilhas no pátio, além das propriedades inerentes à biomassa (BRAND et al., 2010; KRIGSTIN, WETZEL, 2016; LIEBL et al., 2017).

Esses fatores inerentes à secagem natural em campo ocasionam, na maioria das vezes, longos períodos de estocagem, o que promove de imediato a estagnação do capital investido, além de, dependendo das condições, perda da qualidade da madeira decorrentes da biodeterioração por organismos xilófagos e intemperismo.

No entanto, são poucas as pesquisas que quantificam as variações, principalmente de massa de madeira e energia durante o período de estocagem, evidenciando a necessidade de estudos que avaliem os danos causados pelos organismos xilófagos e intemperismo, de modo a

auxiliar na tomada de decisão no planejamento florestal do uso da madeira em tora para geração de energia.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito do tempo de estocagem em campo nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* para fins energéticos.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar a presença de anomalias externas nos toretes de madeira durante o período de estocagem por meio de inspeções visuais;
- Verificar o efeito do tempo de estocagem em campo na redução do teor de umidade da madeira em função da classe de diâmetro da madeira e altura da pilha;
- Construir curvas de secagem e obter as taxas de secagem da madeira em função dos tratamentos;
- Avaliar o efeito do tempo de estocagem na densidade básica e aparente da madeira no sentido longitudinal;
- Comparar métodos de obtenção de densidade da madeira;
- Testar uso da escala *rainbow* nas imagens digitais de raios X para melhor percepção da variação da densidade aparente ao longo do lenho;
- Avaliar a decomposição térmica da madeira estocada;
- Avaliar o efeito da estocagem na composição química imediata em função dos tratamentos;
- Obter a perda de massa lenhosa e perfil de densidade energética da madeira, por m³, no sentido radial.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Eucalipto

Em 2019 a área total de florestas plantadas no Brasil somou 9 milhões de hectares, dos quais 6,97 milhões estão ocupados por espécies do gênero *Eucalyptus*, situados principalmente nos Estados de Minas Gerais (28%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%), seguido por 1,64 milhão de hectares de plantio de pinus e 390 mil de outras espécies como seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2020). A cultura de eucalipto se destaca por se adaptar às condições edafoclimáticas do país e possuir rápido crescimento com grande oferta de madeira, reduzindo a pressão sobre florestas nativas (FERREIRA et al., 2017).

A expansão de plantios de eucalipto ganhou destaque nos últimos anos devido à crescente demanda por madeira projetada para as próximas décadas, com acréscimo estimado de 40% para os próximos 30 anos, pode chegar a 5,2 bilhões de $\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$ (JANOSELLI et al., 2016). A variedade de espécies possibilita selecionar as mais adequadas para a indústria de destino, como papel e celulose, madeira tratada e produção de carvão vegetal, tendo como base os padrões de qualidade pertinentes a cada uma.

No comércio mundial, o Brasil se destaca como o maior exportador e segundo maior produtor de celulose, atrás apenas dos Estados Unidos (IBÁ, 2020). Neste setor, o teor de umidade da madeira ideal para o uso está entre 25-30% (base seca), acarretando prejuízos financeiros para o processo se estiver fora dessa faixa. Caso ela seja levada à fábrica com quantidade de água maior que o recomendado, o licor negro gerado pode ter menor concentração de teor de sólidos. Em contrapartida, a madeira com teor de umidade muito abaixo do recomendado demandará maior tempo de vaporização e impregnação dos reagentes (GONÇALVES et al., 2016).

Para a indústria de madeira tratada é imprescindível que o teor de umidade da madeira esteja abaixo da umidade de saturação das fibras (USF), visto que valores acima desta comprometerão a eficácia do tratamento preservativo com uso de químicos (CCA ou CCB aplicados em autoclave), avaliado por meio de ensaios de retenção e penetração do produto utilizado (ABNT, 2013; VIDAL et al., 2015).

Na indústria de carvão vegetal, o Brasil é líder mundial, sendo responsável por 12% da produção global em 2019, dos quais 95% foram produzidos a partir de madeira proveniente de florestas plantadas, sobretudo do gênero *Eucalyptus*, representando um aumento significativo em relação ao ano anterior (+4,1%), no qual o Estado de Minas Gerais foi o principal polo consumidor (IBÁ, 2020). Segundo a Deliberação Normativa 227 do Estado de Minas Gerais (COPAM, 2018), o teor de umidade da madeira destinada ao uso energético deve estar abaixo

de 40% (base seca). Enfornar madeiras com teor de umidade acima do recomendado implica no aumento na fase endotérmica, que é a fase inicial na qual ocorre grande liberação de vapor de água, estendendo o tempo total de carbonização e reduzindo sua eficiência, resultando em um carvão de baixa qualidade, ou seja, quebradiço, com muitas fissuras, maior friabilidade e menor poder calorífico, densidade e resistência mecânica (GARSTANG et al., 2002; TRUGILHO et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2010; CARNEIRO et al., 2016).

3.2. Secagem da madeira

O processo de secagem da madeira foi definido por Hart (1966) como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a madeira, a superfície de evaporação, a difusão da umidade através da madeira e a vazão da água livre nela contida. Consiste na combinação das fases de movimentação interna e evaporação superficial que ocorrem simultaneamente. A secagem pode ser artificial ou natural e é essencial para melhor utilização da madeira para fins energéticos e estruturais (ZANUNCIO et al., 2016).

Durante a secagem artificial, a madeira é submetida a sistemas de aquecimento com circulação forçada do ar, tornando possível a alteração das condições do meio à qual está exposta, como temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar (PONCE, WATAI, 1985). A secagem natural ou ao ar livre consiste em remover a maior quantidade de água possível da madeira utilizando as forças da natureza, principalmente o vento e a radiação solar, logo, se dá a partir da exposição da madeira à ação de fatores climáticos de um determinado local (KOFMAN, KENT, 2009).

A secagem ao ar livre é um método que requer baixo investimento, mas exige um longo tempo de secagem e é de difícil controle, por se tratar de um processo limitado às variações climáticas locais (REZENDE et al., 2010a; ZEN et al., 2019). A madeira está susceptível às variações de umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade e direção dos ventos, localização do pátio de secagem, inclinação e drenagem do terreno, modo de empilhamento e distância entre a madeira e o solo. No Brasil, devido às condições climáticas favoráveis, a secagem natural é muito utilizada como pré-secagem ou secagem definitiva para madeira serrada na forma de tábuas e pranchões (REZENDE et al., 2010a).

No início do período de estocagem ao ar livre, quando o teor de umidade da madeira está mais elevado, a secagem é rápida, diminuindo a velocidade conforme se aproxima da umidade de equilíbrio, o que depende de fatores como temperatura do ar e umidade relativa do ambiente na qual está inserida (JANKOWSKY, 2000). A instalação de pilhas de madeira

serrada ou em toretes em locais abertos e com altitudes mais elevadas contribui positivamente com a velocidade que a madeira irá secar (KOFMAN, KENT, 2009).

3.2.1. Relação água-madeira

A água presente na madeira pode ser classificada como água livre, de adesão e de constituição (SIAU, 1971). A água livre ou de capilaridade está presente nos espaços intercelulares na forma de líquido ou vapor quando o teor de umidade da madeira está acima da umidade de saturação das fibras, geralmente entre 20-35% de umidade base seca, dependendo da espécie (KOLLMANN, CÔTÉ, 1968; SKAAR, 1972). Por estar ligada à madeira por meio de fracas forças capilares, é a que sai mais facilmente durante a secagem (BRAZ et al., 2015).

A água de adesão, conhecida também como água de parede ou água higroscópica, está localizada nos espaços intracelulares, isto é, aderida à parede celular através de ligações de hidrogênio aos grupos hidroxílicos das cadeias de celulose e hemicelulose e, em menor extensão, da lignina (SIAU, 1984). É a água remanescente quando a madeira está com teor de umidade abaixo da umidade de saturação das fibras, ou seja, quando a madeira já perdeu toda a água livre, porém ainda mantém as paredes celulares saturadas. Por isso, a saída da água de adesão causa redução de volume na madeira e alteração nas propriedades físicas e mecânicas, visto que a remoção das moléculas de água causa a aproximação das microfibrilas de celulose e ligação entre os grupos hidroxílicos, o que pode ocasionar defeitos de secagem como empenamentos, fendilamentos e rachaduras em madeira serrada ou roliça (KOLLMANN, CÔTÉ, 1968).

A água de constituição está quimicamente combinada com as estruturas primárias presentes na parede celular e sua remoção somente é possibilitada caso haja uma degradação irreversível da madeira, ou seja, uma alteração completa na composição química, sobretudo os grupos hidroxílicos (STEIN, 2003; BRITO et al., 2006).

A saída de água da madeira armazenada ao ar livre depende das condições climáticas locais, situação na qual não se tem o controle das variáveis ambientais, principalmente precipitação, com isso, a madeira está susceptível a frequentes condições de umedecimento e secagem (BRISCHKE, ALFREDSSEN, 2020). Tais variações dificultam estimar quanto tempo irá durar a estocagem (PERTUZZATTI et al., 2013), além de impossibilitar que se estabeleça uma relação entre a velocidade de saída da água da madeira com a duração da estocagem ao ar livre.

3.2.2. Movimento da água na madeira

Por ser um material higroscópico, a madeira está constantemente trocando moléculas de água com o ambiente no qual se encontra (JANKOWSKY, 1985). Tal propriedade é explicada pela constituição química da madeira, basicamente formada por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina, dentre as quais a hemicelulose é a mais hidrófila, contribuindo em maior escala para as variações dimensionais (MELO, 2013). Com isso, uma vez abaixo da USF, a madeira é capaz de contrair ou expandir conforme perde ou adquire umidade do ambiente até atingir a chamada umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), quando entra em equilíbrio com o teor de umidade do meio que a circunda (SKAAR, 1972).

A saída de água da madeira se dá em todos os sentidos, porém com maior velocidade no longitudinal do que no radial e tangencial (SIAU, 1971). Logo, o teor de umidade da madeira varia tanto no sentido radial quanto longitudinal, em que a movimentação de água ocorre das camadas internas da madeira para as mais externas até atingir a superfície, quando ocorre a evaporação da água das camadas superficiais, que é absorvida pela atmosfera (OLIVEIRA et al., 2005a).

A secagem tem início com a saída da água livre na forma de vapor do interior para a superfície da madeira, sendo facilmente eliminada por forças capilares até alcançar a USF, fase na qual não há alteração dimensional, apenas perda de massa. A saída da água de adesão ocorre por difusão através das paredes celulares, como consequência das forças originadas pelo gradiente de umidade existente. É um processo mais lento porque é mais complexo, em que ocorre difusão de vapor através das cavidades celulares simultaneamente à difusão de água higroscópica nas paredes celulares da madeira (TEIXEIRA, 2015).

3.3. Estocagem da madeira

O conteúdo de umidade de uma árvore viva de *Eucalyptus urophylla* é elevado, podendo variar de 30 a mais de 200% (base seca), e após a derrubada tem início o processo de secagem natural, que ocorre na fase de estocagem da madeira em pilhas organizadas horizontalmente no solo até atingir teor de umidade desejado, geralmente abaixo de 30% em base seca (GLASS, ZELINKA, 2010). Durante a secagem natural, estima-se que a contração volumétrica da madeira seja entre 3 e 6% (FOELKEL, 2016). As alterações ocorridas na biomassa florestal durante esse período se devem, principalmente, às variações de teor de umidade da madeira e susceptibilidade à biodeterioração por bactérias, fungos, cupins e brocas.

Em países europeus como Alemanha, Dinamarca e Finlândia, estudos sobre a influência da estocagem de biomassa florestal ao ar livre com finalidade energética ocorre desde 1984

(THÖRNQVIST, 1984, 1985, 1988; JIRJIS, 1995; NURMI, 1995, 1999; FILBAKK et al., 2011; RÖSER et al., 2011). As pesquisas em território brasileiro são mais escassas e caminham a passos mais lentos (BRAND et al., 2010, 2014; REZENDE et al., 2010b; BRAND, MUÑIZ, 2012; TEIXEIRA, 2015), em que grande parte dos estudos relacionados à secagem da madeira são mais concentrados na secagem artificial e ao ar livre de madeira serrada, tendo ainda poucos os trabalhos com madeira roliça (toretas) (REZENDE et al., 2010a; ZANUNCIO et al., 2013).

No Brasil, a estocagem de madeira roliça ao ar livre é considerada o principal método para secagem da madeira destinada à produção de carvão vegetal e indústria de papel e celulose, uma vez que é um método de baixo investimento, embora demande mais tempo para secagem comparado aos métodos artificiais (ZANUNCIO et al., 2013). A instalação de pilhas de secagem em ambientes abertos é mais vantajosa quando comparada aos fechados, visto que os locais abertos são capazes de promover o fluxo de ar através do material, facilitando a secagem, ao passo que na área protegida esse processo será mais lento (FILBAKK et al., 2011).

O principal objetivo da estocagem ao ar livre é fazer com que a madeira perca a maior quantidade de água possível levando em consideração os fatores climáticos do local em que a pilha será instalada (PONCE, WATAI, 1985), cuja eficácia e velocidade de secagem dependerão da temperatura do ambiente e da velocidade do vento nas diferentes posições da pilha, tipo de pavimentação e manutenção do local, além de fatores inerentes à madeira, como características anatômicas, espécie, permeabilidade, dimensões da peça e presença ou ausência de casca (REZENDE et al., 2010a).

O tamanho e disposição da pilha de madeira roliça (toretas) são determinantes para a velocidade de secagem e facilidade de entrada de ar (ventilação) no interior da pilha (ERBER, KÜHMAIER, 2017). Pilhas de menores dimensões (largura x altura) têm uma maior velocidade de secagem associada à maior facilidade de entrada de ar e maior área de exposição à radiação solar, ocasionando um menor tempo de secagem ao ar livre (BRAND et al., 2014). Nas pilhas mais altas, além de ocorrer o inverso, também tende a ser ocasionado um gradiente decrescente de umidade de dentro para fora da pilha (RÖSER et al., 2011).

A estocagem da biomassa em forma de cavacos pode afetar de forma negativa os resultados do processo com ocorrência de microrganismos decompositores de madeira (fungos apodrecedores e termófilos), que estão diretamente relacionados à limitada circulação de ar no centro da pilha, causando um aumento da temperatura no centro e maior perda de massa quando comparada à estocagem de madeira roliça (ERBER et al., 2014). Também ocorre uma maior variação no teor de umidade na altura da pilha de cavacos e ineficiência na perda de umidade, tornando o combustível mais heterogêneo (JIRJIS, 2005).

A estocagem de madeira em tora pode causar alterações nas propriedades físicas, químicas e características energéticas, com maior ou menor variação dependendo das condições externas e intrínsecas da madeira, bem como o tempo de estocagem (BRAND et al., 2014).

O diâmetro das toras armazenadas também é relevante, visto que nas de maior diâmetro, a água precisa percorrer uma maior distância do centro até a superfície para que evapore. Madeiras de menor diâmetro empilhadas ao ar livre com casca secam quase 1,4 vezes mais rápido do que as de maior diâmetro (REZENDE et al. 2010a). O processo de saída de água das toras é desfavorecido por conta da orientação dos componentes anatômicos da madeira, além de possuírem maior quantidade de água quando comparadas às de menor diâmetro, mesmo quando expostas às mesmas condições e tempo de secagem, portanto, secam de forma mais lenta (ERBER, KÜHMAIER, 2017). Há relatos de perdas de massa de até 19,9% (GARSTANG et al., 2002) e 21% (JIRJIS, 1995) da madeira em tora estocada ao ar livre durante 12 meses, enquanto a madeira em forma de cavacos pode perder até 27% (BARONTINI et al., 2014) no mesmo período de armazenamento.

As diferenças climáticas relacionadas às estações do ano têm influência sobre o comportamento da biomassa durante a estocagem influenciando ganhos e perdas no teor de umidade da madeira de acordo com o tempo de armazenamento (BRAND et al., 2011). A secagem é geralmente mais rápida nos meses de verão devido às altas temperaturas, podendo a biomassa readquirir umidade nos períodos de outono e inverno caso a estocagem ultrapasse os meses mais favoráveis à secagem ou enfrente épocas de maior umidade/precipitação (BRAND, 2007; ERBER, KÜHMAIER, 2017).

Quanto à duração do tempo de estocagem, períodos muito longos podem atuar de forma negativa sobre a qualidade da biomassa e contribuir para a ocorrência de perdas energéticas (BRAND, 2007). O tempo deve ser suficiente para que haja a redução do teor de umidade da biomassa sem que ocorram prejuízos energéticos devido à perda de massa seca causada pelos processos de deterioração química e biológica que ocorrem no material por conta da origem orgânica. Foi verificada uma tendência de aumento linear no teor de cinzas quanto maior for o tempo de estocagem (GARSTANG et al., 2002). Brand e Muñiz (2012) citam perda dos componentes extrativos da madeira estocada durante 6 meses, sem haver degradação dos componentes da parede celular.

A secagem da madeira também é influenciada por fatores inerentes à madeira tais como espécie, componentes anatômicos, propriedades físicas, presença ou ausência de casca, entre outros.

As madeiras do gênero *Eucalyptus* geralmente possuem dificuldades durante a secagem principalmente por conta da composição anatômica, constituída em geral por pontuações de pequenos diâmetros, tiloses, vasos e raios estreitos, características que tornam o processo de secagem mais lento (REZENDE et al., 2015; ZEN et al., 2019). A relação cerne-alburno também exerce influência na velocidade de secagem por conta da impermeabilidade do cerne, causada pela obstrução dos vasos por tilos, gomas e/ou outras substâncias (SILVA et al., 2010).

A presença de casca também pode prejudicar a saída de água da madeira atuando como uma barreira física (PERTUZZATTI et al., 2013), além de conter suberina, que dificulta o processo de secagem (REZENDE et al., 2010a). Sua presença tem maior influência na saída de água durante as primeiras semanas de secagem, quando a madeira está perdendo água livre (VITAL et al., 1985; REZENDE et al., 2010a).

A espessura da peça de madeira também interfere na velocidade de secagem, uma vez que, quanto mais espessa, maior será a relação entre massa de água a ser removida e a superfície de evaporação e menor será a taxa de movimentação por difusão, portanto, maior será o tempo de secagem para que se atinja um mesmo teor de umidade final (JANKOWSKY, 2000). Rezende et al. (2010a) e Vital et al. (1985) relatam a influência direta do diâmetro na secagem da madeira em condições naturais, destacando que madeiras de menor diâmetro têm uma maior taxa de secagem em comparação às maiores. Oliveira et al. (2017) citam que toras com diâmetro entre 16,1 e 20 cm requerem tempo de secagem até 2 vezes superior quando comparadas às de 8 e 12 cm.

Jesus et al. (2016) constataram comportamento condizente com a literatura, em que o teor de umidade da madeira é inversamente proporcional à sua massa específica, ou seja, madeiras com menor densidade aparente têm maior teor de umidade inicial e maior taxa de secagem devido suas características anatômicas.

Além dos fatores supracitados, vale salientar que a madeira está susceptível à ação de agentes deterioradores bióticos e abióticos, capazes de alterar a estrutura e propriedades físico-químicas e mecânicas de forma significativa.

Devido a constituição química, a madeira pode ser facilmente deteriorada por agentes químicos, físicos, mecânicos e biológicos, sendo estes últimos os responsáveis pela maior parte dos danos causados na madeira por utilizarem os constituintes orgânicos como fonte de alimento, reduzindo o valor no mercado (CORASSA et al., 2014; SILVA et al., 2014; SACCOMAN et al., 2017). O teor de umidade é determinante para o ataque de organismos xilófagos, uma vez que a velocidade de deterioração tem correlação positiva com o teor de umidade contido na madeira (ŽLAHTIČ, HUMAR, 2017). Quando a biomassa está acima da

USF, o ataque de bactérias, fungos e alguns térmitas pode ser favorecido (CORASSA et al., 2014). Os fungos apodrecedores são os responsáveis pelos principais danos causados à madeira, podendo comprometer significativamente as propriedades físico-química e mecânicas (SILVA et al., 2014; VIVIAN et al., 2018).

Os primeiros organismos a colonizar a madeira são as bactérias, especialmente quando a árvore é recém-cortada, isto é, o teor de umidade ainda está bem acima da USF, ou está armazenada em ambiente com elevada umidade, causando o amolecimento da superfície da madeira e aumento da permeabilidade (CARVALHO et al., 2018).

Os fungos podem ser divididos em três grandes grupos: emboloradores, manchadores e apodrecedores, e são semelhantes entre si em diversos aspectos, porém diferenciando-se de acordo com o modo de ataque e danos causados às peças afetadas. Eles comumente atacam madeiras recém-cortadas que estejam em condições elevadas de umidade, ou seja, acima da USF. Não necessariamente o fungo morre quando a madeira seca, mas pode permanecer em estado latente e retornar ao desenvolvimento quando ela for novamente umedecida (CARVALHO et al., 2018).

Os fungos emboloradores, com aspecto algodado, e manchadores, cujas manchas penetram mais profundamente na madeira, possuem mecanismos de ataque semelhantes e superficiais, causando danos estéticos à madeira atacada devido ao crescimento acentuado das hifas, portanto, não comprometem a resistência mecânica da madeira por não afetarem as paredes celulares (CARVALHO et al., 2018).

Os mais prejudiciais são os apodrecedores, pois degradam compostos fundamentais da parede celular, causando a perda de resistência mecânica da madeira (STANGERLIN et al., 2013). Destaca-se a classe Basidiomicetos, à qual pertencem os fungos responsáveis pela podridão parda e branca, que possuem características enzimáticas próprias quanto à decomposição dos elementos primários da madeira, decompondo os polissacarídeos da parede celular (celulose e hemicelulose), deixando a madeira atacada com coloração mais escura (podridão parda), e polissacarídeos e lignina, deixando a coloração residual da madeira atacada com aspecto mais esbranquiçado (podridão branca) (OLIVEIRA et al., 2005b).

Em sequência aos ataques dos fungos apodrecedores, além da madeira ficar com aspecto esponjoso, fibroso e laminado, ela também sofre modificações na composição química (alteração nos teores de holoceluloses e lignina) e coloração natural, bem como perda de massa, aumento da permeabilidade, redução do poder calorífico e maior susceptibilidade ao ataque de insetos, comprometendo a qualidade da madeira, além de inviabilizar a utilização para fins tecnológicos (STANGERLIN et al., 2013).

Costa e Cabral (2020) relatam que as madeiras localizadas na superfície da pilha de secagem tendem a ser mais atacadas por cupins, fungos e brocas, enquanto as localizadas na região interna da pilha têm maior incidência de ataque de fungos por conta do ambiente favorável de maior umidade para seu desenvolvimento.

Já os agentes abióticos podem ser classificados em físicos, químicos e mecânicos e são capazes de reduzir a qualidade da biomassa, bem como o valor econômico, além da possibilidade de interação com agentes bióticos, intensificando a deterioração da madeira. Os agentes físicos são consequência de fenômenos climáticos e meteorológicos, como radiação solar direta, precipitação, vento e mudanças abruptas de temperatura; alterações químicas por ácidos, sais, bases e extrativos presentes na madeira; mecânicos caracterizados por atritos e desgastes nela causados (CASTRO, GUIMARÃES, 2018).

Quando a madeira está sujeita a uma combinação de fatores como variação de umidade relativa do ar, incidência de luz solar, temperatura, exposição a produtos químicos e/ou presença de agentes biológicos, ocorre o *weathering*, termo que caracteriza a lenta deterioração quando exposta às condições climáticas locais. Apesar do *weathering* promover maiores prejuízos na superfície da madeira, causado inicialmente pela radiação solar, quando o mesmo ocorre em conjunto com ataque de organismos xilófagos, a deterioração do material é acelerada influenciando negativamente as propriedades físicas e químicas da madeira para uso energético (WILLIAMS, 2005).

Mattos et al. (2013) relatam descoloração da madeira de eucalipto aos 135 dias de armazenamento ao ar livre. Quando armazenada ao ar livre durante 360 dias, Cademartori et al. (2015) citam tais alterações, bem como degradação de seus macro componentes, já aos 120 dias de exposição às condições ambientais.

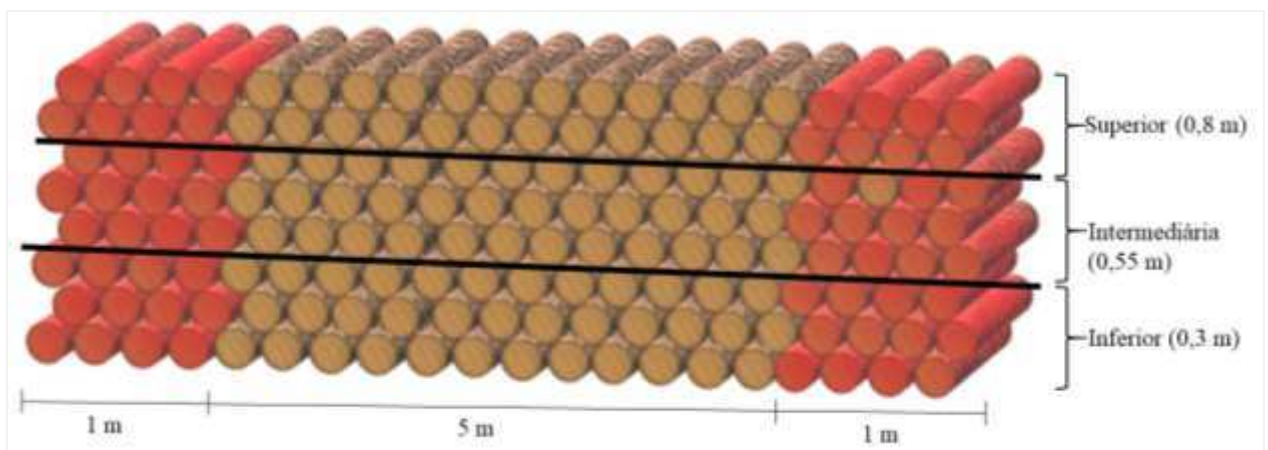
4. MATERIAL E MÉTODOS

Árvores do clone comercial AEC 1528 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), com sete anos de idade, provenientes de plantio localizado no município de Viçosa/MG (20° 47' 56.80" S e 42° 49' 58.60" O) foram utilizadas tendo como critério de seleção o diâmetro à altura do peito (DAP), com o mínimo de 6 cm.

A avaliação da influência do tempo de estocagem sobre a qualidade da biomassa florestal foi realizada no Laboratório de Propriedades da Madeira da Universidade Federal de Viçosa – LPM/UFV com toretes de um metro de comprimento, com casca e empilhados ao ar livre.

Após classificados em duas classes diamétricas (CD), sendo CDI ($DAP \leq 11$ cm, com o mínimo de 6 cm) e CDII ($DAP \geq 11,1$ cm, com o máximo de 14 cm), os toretes foram distribuídos ao acaso em três alturas ao longo de uma pilha com sete metros de comprimento (Figura 1), construída em contato direto com o solo e com orientação no sentido Leste-Oeste para que houvesse uma máxima radiação solar sobre a superfície (BRAND, 2007). Ao longo de um metro de cada lado da pilha, a seleção de toretes para amostragem foi desconsiderada, visando evitar possíveis efeitos de bordadura.

Figura 1 – Esquema com as dimensões adotadas ao longo da pilha. Toretos marcados de vermelho representam os que foram desconsiderados durante a amostragem.



Fonte: Autora.

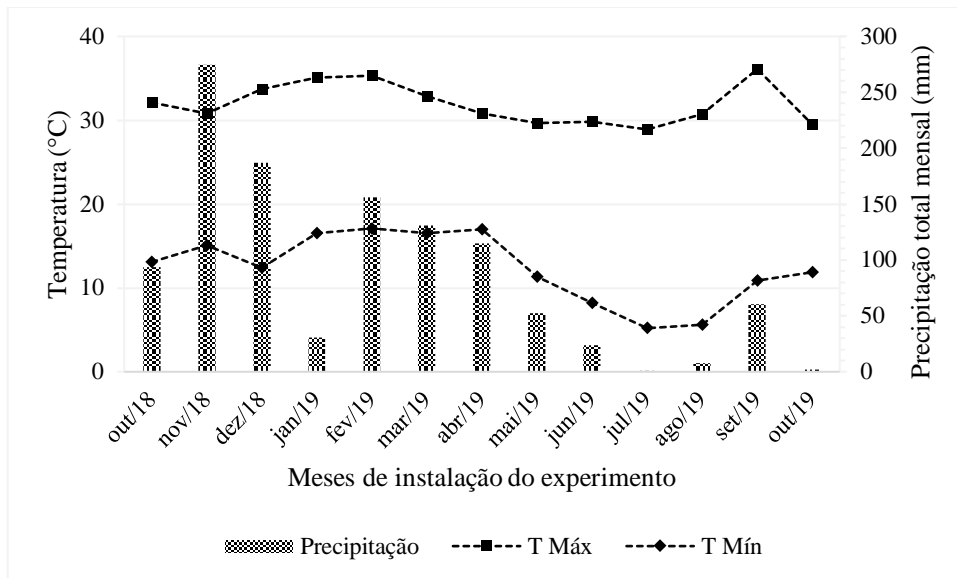
Para a obtenção de dados no tempo 0 (zero) (dia da coleta dos toretes), três toretes de cada classe diamétrica foram selecionadas aleatoriamente no momento da colheita, os quais foram utilizados para determinação das propriedades físicas e químicas da madeira.

A partir do momento em que os toretes foram empilhados, realizou-se coletas com intervalos regulares de 60 dias, com exceção da última, cujo intervalo foi de 120 dias, num total

de 365 dias de avaliação, correspondente a outubro de 2018 a outubro de 2019. Ressalta-se que o intervalo de 120 dias entre a penúltima e última coleta ocorreu por não haver madeira suficiente na pilha para duas coletas com intervalo de 60 dias, portanto, decidiu-se prolongar o intervalo de modo que se completassem os 365 dias de estocagem.

Dados climáticos da Estação Automática de Viçosa (MG), localizada na Universidade Federal de Viçosa/UFV (20° 45' 45.385" S e 42° 51' 50.447" O), referentes ao período de execução do experimento (Figura 2) também foram coletados.

Figura 2 – Dados de precipitação e temperatura máxima e mínima no período de execução do experimento.

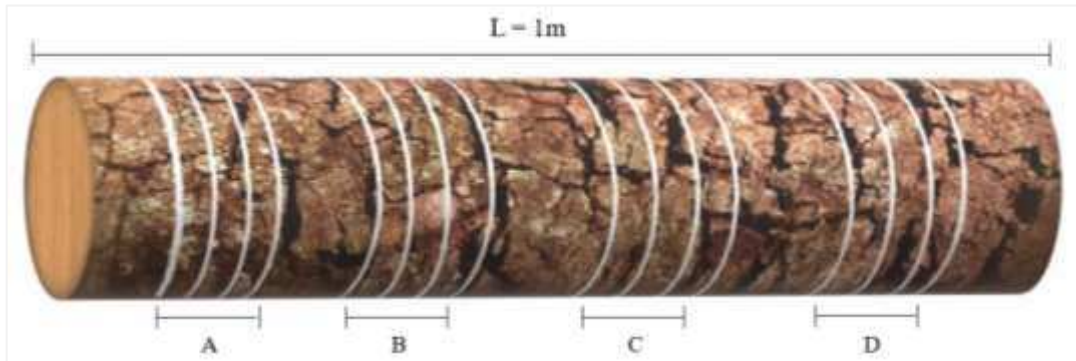


Fonte: INMET/UFV (2018-2019)

Para avaliar a influência do tempo de estocagem nas propriedades das madeiras, a cada intervalo de tempo foram retirados, por vez, três toretes por classe diamétrica e altura/posição na pilha (superior, intermediária e inferior). Ressalta-se que os toretes coletados nas posições superior e inferior eram, obrigatoriamente, os que estavam a pleno sol e em contato direto com o solo, respectivamente.

Cada torete retirado foi seccionado em quatro posições equidistantes ao longo do eixo longitudinal, sendo as posições A e D correspondentes às extremidades e B e C às posições centrais. De cada posição foram retirados três discos com aproximadamente 4 cm de espessura (Figura 3), destinados às análises de teor de umidade, densidade básica e aparente, densitometria de raios X, composição química imediata, poder calorífico superior e termogravimetria (TG/DTG).

Figura 3 – Posições de seccionamento para retirada dos discos no sentido longitudinal dos toretes.



Fonte: Autora.

4.1. Propriedades das madeiras

De cada posição ao longo do torete (A, B, C e D), três discos foram retirados, descascados e seccionados. A determinação do teor de umidade da madeira (base seca) se deu a partir de cunhas; para verificar essa variação no sentido radial (medula-casca), uma bagueta central com 1 cm de espessura foi demarcada no sentido medula-casca, a qual foi dividida em quatro partes iguais, obtendo-se os corpos de prova nas distâncias 0-25%, 25-50%, 50-75% e 75-100% (Figura 4). Os ensaios do teor de umidade (base seca) foram realizados de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

A partir dos teores de umidade foram construídas as curvas de secagem das madeiras, por classe de diâmetro e altura na pilha. A taxa de secagem foi calculada de acordo com a equação 1, conforme descrito por Santos et al. (2003).

$$TS = \frac{\Delta m_{\text{água}}}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

TS: taxa de secagem (g/dia);

$\Delta m_{\text{água}}$: variação da massa de água (g);

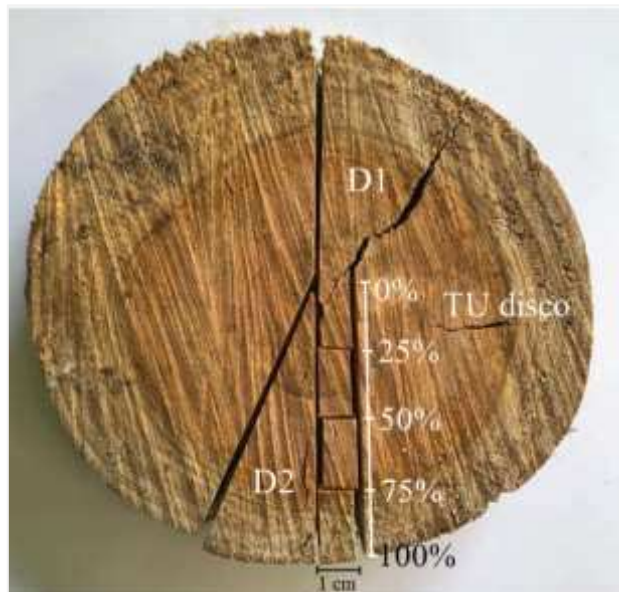
Δt : variação de tempo em que ocorreu a $\Delta m_{\text{água}}$ (dia).

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). De cada disco da posição B, retirou-se cunhas opostas, passando pela medula, as quais foram identificadas, saturadas em água para mensuração do volume pelo método de imersão em água, e em seguida, levadas à estufa a 103 ± 2 °C até massa constante. O valor da

densidade básica média do disco foi ponderado pelo volume de cada seção (torete) de acordo com Arizapana-Almocinad (2013).

Para determinar a densidade aparente da madeira, um disco da posição B foi marcado em dois pontos, correspondentes ao cerne e alburno (Figura 4), dos quais foram retiradas amostras com auxílio de uma furadeira vertical de bancada acoplada a uma serra copo. Retirados os corpos de prova, estes foram identificados e levados para sala de climatização com condições de temperatura e umidade controladas (20 °C e 60% de umidade relativa do ar), onde permaneceram até entrarem em equilíbrio com o ambiente e atingirem a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), aproximadamente 12%. Para o cálculo da densidade aparente, a massa foi obtida a partir de uma balança analítica com precisão de 0,0001 gramas e as dimensões (diâmetro e altura) mensuradas com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 4 – Posição de seccionamento dos corpos de prova para determinar a variação do teor de umidade no sentido medula-casca (0-100%) e do disco (TU disco), além das cunhas para determinar a densidade básica (D1 e D2).

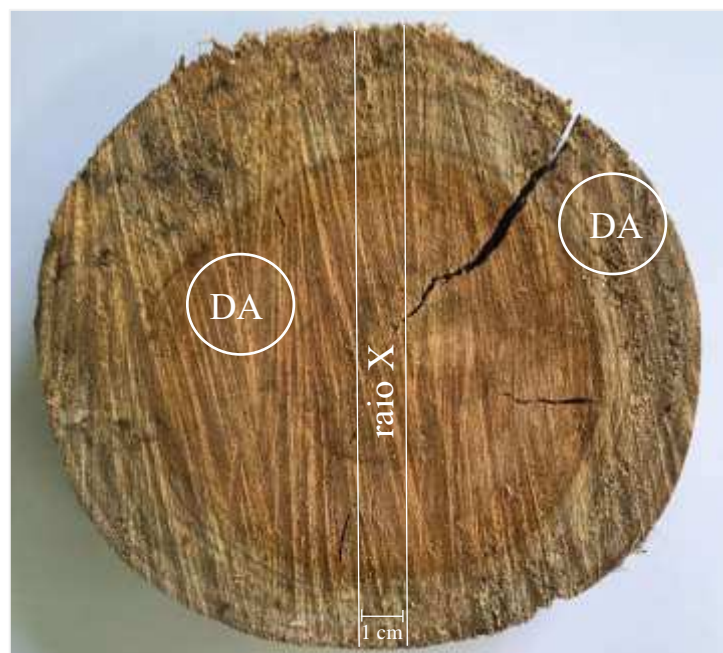


Fonte: Autora.

Em relação à determinação da densidade aparente da madeira por meio de imagens digitais de raios X, os discos foram cortados em seções diametrais (Figura 5), dos quais foram retiradas, radialmente, amostras com espessura de 2 mm, acondicionadas em sala de climatização (20 °C e 60% de umidade relativa do ar). As imagens digitais em escala de cinza geradas a partir do equipamento de raios X (Faxitron modelo LX 60 – Kv de 26 e tempo de

exposição de 19 segundos) foram analisadas no *software ImageJ*, determinando-se os valores de densidade aparente da madeira no sentido radial, e transferidos para planilha eletrônica para que fossem construídos os perfis diametrais de densidade aparente. A conversão das imagens em escala *rainbow* foi realizada com o *software Adobe Photoshop* a partir das imagens digitais em escala de cinza e a plotagem da superfície 3D de variação de densidade foi realizada com auxílio do *software ImageJ*.

Figura 5 – Posição de seccionamento dos corpos de prova para a determinação da densidade aparente (DA) e análises de raio X.



Fonte: Autora.

Após a construção dos perfis radiais de densidade aparente por densitometria de raios X, as amostras foram inseridas na balança determinadora de umidade. Os valores de umidade base seca e densidade aparente encontrados foram utilizados para estimar a densidade básica da madeira por meio da equação 2, descrita por Munhoz (2011).

$$DBest = DA * \frac{(100 - Us)}{100} \quad (2)$$

Onde:

DBest: densidade básica estimada (kg/m³);

DA: densidade aparente por densitometria de raios X (kg/m³);

Us: teor de umidade da amostra em base seca (%).

Para as análises química imediata e termogravimétrica foi utilizada uma cunha de um disco da posição B, tendo as amostras então preparadas conforme estabelecido na norma NBR 14660 (ABNT, 2004). A composição química imediata foi determinada de acordo com a norma D 1762-84 (ASTM, 2007), obtendo os valores de teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo da madeira.

A análise termogravimétrica foi realizada no aparelho TGA-60H (Shimadzu) sob atmosfera de gás nitrogênio a uma vazão constante de 50 ml.min⁻¹, utilizando-se 0,2 g de serragem, a partir de uma cunha de um disco da posição B. A análise foi realizada a partir da temperatura ambiente até a temperatura máxima de 450 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹. Com base na massa inicial de cada amostra, foram calculadas as perdas de massa, expressas em porcentagem, subtraindo-se do valor da massa final obtida nos seguintes intervalos de temperatura: 100-150 °C, 150-200 °C, 200-250 °C, 250-300 °C, 300-350 °C, 350-400 °C e 400-450 °C. Os termogramas foram gerados utilizando-se o programa estatístico e as funções obtidas foram então interpoladas e derivadas. As funções interpoladas originaram as curvas termogravimétricas para a análise do comportamento da resistência térmica da madeira com base na perda de massa sob as referidas faixas de temperatura e as derivadas que, por meio da análise térmica diferencial, indicaram as temperaturas nas quais ocorreram as maiores perdas de massa nos intervalos selecionados visualmente nos gráficos. Os valores da massa residual foram obtidos a partir do somatório dos valores das perdas de massa observados em cada intervalo, decrescido de 50 °C.

A perda de massa foi acompanhada a cada período de coleta até o término do experimento, de acordo com a equação 3, conforme descrito por Santos et al. (2003).

$$PM = 100 - \left(\frac{DBC * 100}{DBi} \right) \quad (3)$$

Onde:

PM: perda de massa (%);

DBC: densidade básica em cada coleta (g/cm³);

DBi: densidade básica inicial aos 0 dias de estocagem (g/cm³).

Para o ensaio de poder calorífico superior também foi utilizada uma cunha de um disco da posição B, tendo as amostras preparadas de acordo com a norma EN 14918 (DIN, 2010), utilizado como base para os cálculos de densidade energética da madeira, estimado em função da equação 4.

$$DE = PCS * DBest \quad (4)$$

DE: densidade energética (Mcal/m³);

DBest: densidade básica estimada (kg/m³);

PCS: poder calorífico superior (kcal/kg).

4.2. Inspeção visual das madeiras

A cada coleta, além das análises laboratoriais, também foi avaliada a presença de anomalias externas na madeira estocada, como rachaduras de topo, presença de rebrota, ataque de fungos e/ou insetos, presença de galerias internas causadas por insetos, bem como mudanças na coloração e textura da madeira. As avaliações foram registradas por meio de fotografias e relatórios de inspeção.

4.3. Delineamento experimental

O experimento seguiu o esquema de fatorial (6 x 3 x 2) levando em consideração tempo de coleta (0, 60, 120, 180, 240 e 365 dias), posição do torete na pilha (superior, intermediária e inferior) e classe diamétrica (6-11 cm e 11,1-14 cm), gerando 36 tratamentos, em três repetições. Para a análise estatística, os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk), no qual foi constatada a não-normalidade dos dados. Com isso, para comparação das medianas, foi aplicado o teste Kruskal-Wallis a 5% de significância por meio do *software Action Stat*, versão 3.7 (EQUIPE ESTATCAMP, 2014).

Para determinar as correlações existentes entre densidades básica e aparente da madeira tanto de acordo com a norma NBR 7190 quanto através de imagens digitais de raios X, foi realizado o teste de correlação simples com auxílio do *software Microsoft Excel* (2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Presença de anomalias

Na Tabela 1 estão listadas as anomalias de acordo com cada coleta realizada no decorrer do período de estocagem.

Tabela 1 – Anomalias verificadas ao longo do período de estocagem

Dias de estocagem	Anomalias verificadas					
	Rebrota	Rachadura de topo	Galerias internas	<i>Spalted wood</i>	Manchas amarelas	Presença de cupim
0	-	-	-	-	-	-
60	S; IF	S; IT; IF	-	IT	S; IT; IF	-
120	-	S; IT; IF	S; IT; IF	S; IT; IF	S; IT; IF	-
180	-	S; IT; IF	S; IT	S; IT; IF	S; IT; IF	IT; IF
240	-	S; IT; IF	IT	S; IT; IF	S; IT; IF	IT; IF
365	-	S; IT; IF	IF	S; IT; IF	S; IT; IF	IF

Onde: S, IT e IF representam as posições superior, intermediária e inferior da pilha de estocagem, respectivamente.

Aos 60 dias de estocagem foi verificada a presença de rebrota com 7,5 e 4 cm de altura, em apenas dois toretes da pilha, localizados nas posições superior e inferior da pilha (Figuras 6.A e 6.B), respectivamente, além da presença de fungos xilófagos com micélio formando pequenos cogumelos (tamanho médio de 0,23 cm) de coloração branca na casca da madeira, nas posições superior e intermediária da pilha (Figuras 6.C e 6.D).

O desprendimento da casca dos toretes começou a ser observado aos 180 dias, se acentuando desde então, principalmente próximo às extremidades, enquanto as rachaduras de topo foram observadas em todas as coletas realizadas durante a estocagem, sendo intensificadas a partir dos 240 dias.

A partir dos 120 dias, na maior parte dos toretes amostrados verificou-se a existência de galerias internas na madeira com diâmetro de 1 mm causadas por insetos identificados pela família Scolytidae, espécie *Xyleborus affinis* (Figuras 6.E a 6.H). Desde os 60 dias de estocagem foi verificada a ocorrência de *spalted wood* (Figuras 6.I a 6.L), além de manchas amarelas na região do cerne dos toretes em todas as posições amostradas da pilha (Figuras 6.L e 7.A). A partir dos 180 dias de estocagem foi verificada a incidência de cupins subterrâneos identificados pelo gênero *Coptotermes*, abrigados sob a casca, principalmente daquelas em contato com o solo (Figura 7.B). Aos 365 dias, alguns toretes continham crostas de coloração alaranjada sobre a casca da madeira (Figura 7.C), enquanto os da região inferior da pilha já estavam em avançado estado de deterioração por fungos de podridão branca (Figuras 6.I a 6.L, 7.D e 7.E) e mole

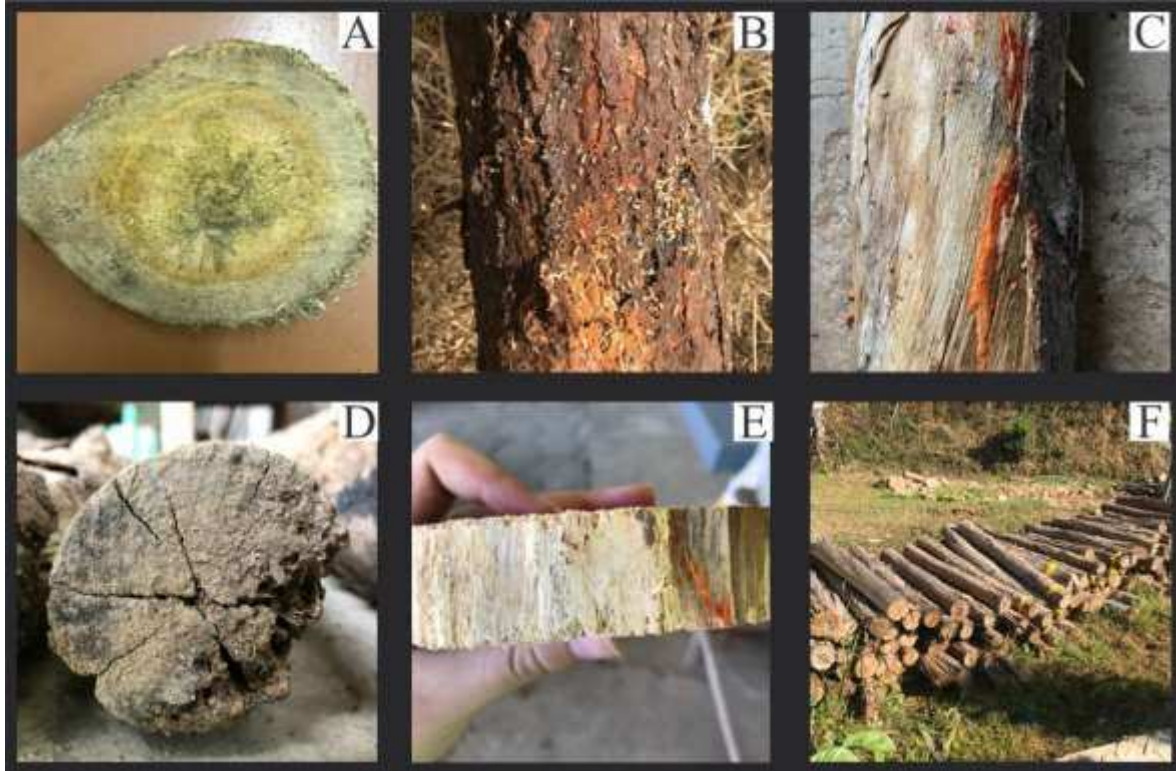
(Figuras 6.K e 6.L). Devido ao longo tempo de estocagem, a madeira adquiriu coloração acinzentada causada pela fotodegradação, evidenciado a partir dos 240 dias (Figura 7.F).

Figura 6 – Rebrotas de 4 e 7,5 cm de altura (6.A e 6.B), pequenos cogumelos de coloração branca (6.C e 6.D), galerias internas causadas por larvas de insetos (6.E e 6.F), inseto responsável pela deposição de larvas na madeira (6.G e 6.H), indícios de podridão branca (6.I e 6.J), discos contendo *spalted wood* (6.I a 6.L) e indícios de podridão mole (6.K e 6.L).



Fonte: Autora.

Figura 7 – Manchas amareladas na região do cerne (7.A), cupins subterrâneos abrigados sob a casca da madeira (7.B), crostas alaranjadas na região periférica dos toretes (7.C), madeira em avançado estado de deterioração (7.D), disco com desfibrilação aparente (7.E) e fotodegradação ocorrida na madeira estocada (7.F).



Fonte: Autora.

Os pequenos cogumelos encontrados na casca da madeira estocada são os primórdios do corpo de frutificação, que consistem em pequenas estruturas arredondadas e de coloração branca, e a partir deles é que se desenvolvem os cogumelos propriamente ditos, considerados o ápice do ciclo de vida de um fungo (PASCHOLATI et al., 2014). Seu desenvolvimento se deve às condições propícias de umidade e temperatura (KRIGSTIN, WETZEL, 2016). A partir do momento que o fungo se instala na madeira, a conversão de constituintes a moléculas mais simples também contribui com o aumento do teor de umidade do material (PALA, 2007), o que foi constatado neste estudo.

O surgimento de defeitos como rachaduras de topo, além do desprendimento da casca, já era esperado, uma vez que podem ocorrer defeitos durante a secagem da madeira, especialmente em se tratando de madeira do gênero *Eucalyptus*, associadas à contração da madeira (NASCIMENTO et al., 2019; YANG, LIU, 2018).

Os insetos encontrados na madeira estocada, conhecidos como besouros ambrosia, não ultrapassam 1 cm de comprimento, são da ordem Coleoptera e têm como característica a relação de simbiose com fungos inoculados na madeira, e na fase adulta, os besouros perfuram o substrato (madeira) para depositar as larvas que se alimentam dos fungos (ZANUNCIO et al., 2002; CAJAIBA et al., 2018). O ataque de cupins xilófagos, considerados pragas agrícolas e de edificações, são os responsáveis pelos maiores volumes de perda de madeira no mundo (PASSOS et al., 2014; LOPES et al., 2017). O ataque dessas térmitas foi facilitado pelo fato de a madeira ter ficado em contato direto com o solo, utilizando-a como fonte de alimento e abrigo.

As manchas pretas e amarelas são típicas da doença conhecida como estroma negro da madeira, causada pelo *Hypoxylon* sp., um fungo de podridão branca que também serve como porta de entrada para outros fungos xilófagos (MAFIA et al., 2012), a exemplo dos de podridão mole, também encontrados na madeira estocada. Eles geralmente afetam a superfície externa da madeira, deixando-a com coloração escura e macia ao toque, podendo apresentar rachaduras quando secas (HATAKKA, HAMMEL, 2010). Quanto às crostas de coloração alaranjada na madeira, sugere-se que sejam características de um líquen do gênero *Caloplaca*, encontrado em rochas de regiões litorâneas, casca, madeira e no solo de florestas (KANTVILAS, 2016), visto que em árvores com superfície lisa, os líquens se apresentam geralmente em formas crustosas, constituindo uma simbiose entre um fungo (micobionte) e uma alga (fotobionte) (MARTINS, MARCELLI, 2011).

Quando exposta às condições ambientais, a madeira fica susceptível ao intemperismo, resultado de uma complexa e combinada ação de agentes climáticos. Como consequência, houve a fotodegradação da madeira, em que a superfície absorveu intensamente a radiação solar, ocorrendo a deterioração fotoquímica causada pela exposição excessiva dos raios ultravioleta (raios UVB e UVC), deixando-a com coloração acinzentada nos maiores tempos de coleta, sendo um indicativo que houve *weathering* (AYADI et al., 2003; COSTA et al., 2011). Em madeiras de três espécies de eucalipto, Cademartori et al. (2015) avaliaram o intemperismo natural e verificaram o escurecimento da madeira a partir dos 120 dias de estocagem. O escurecimento ou coloração acinzentada da madeira é associada à fotodegradação da lignina, pois é o único componente da estrutura química da madeira com alta absorção na região do ultravioleta visível (GEORGE et al., 2005).

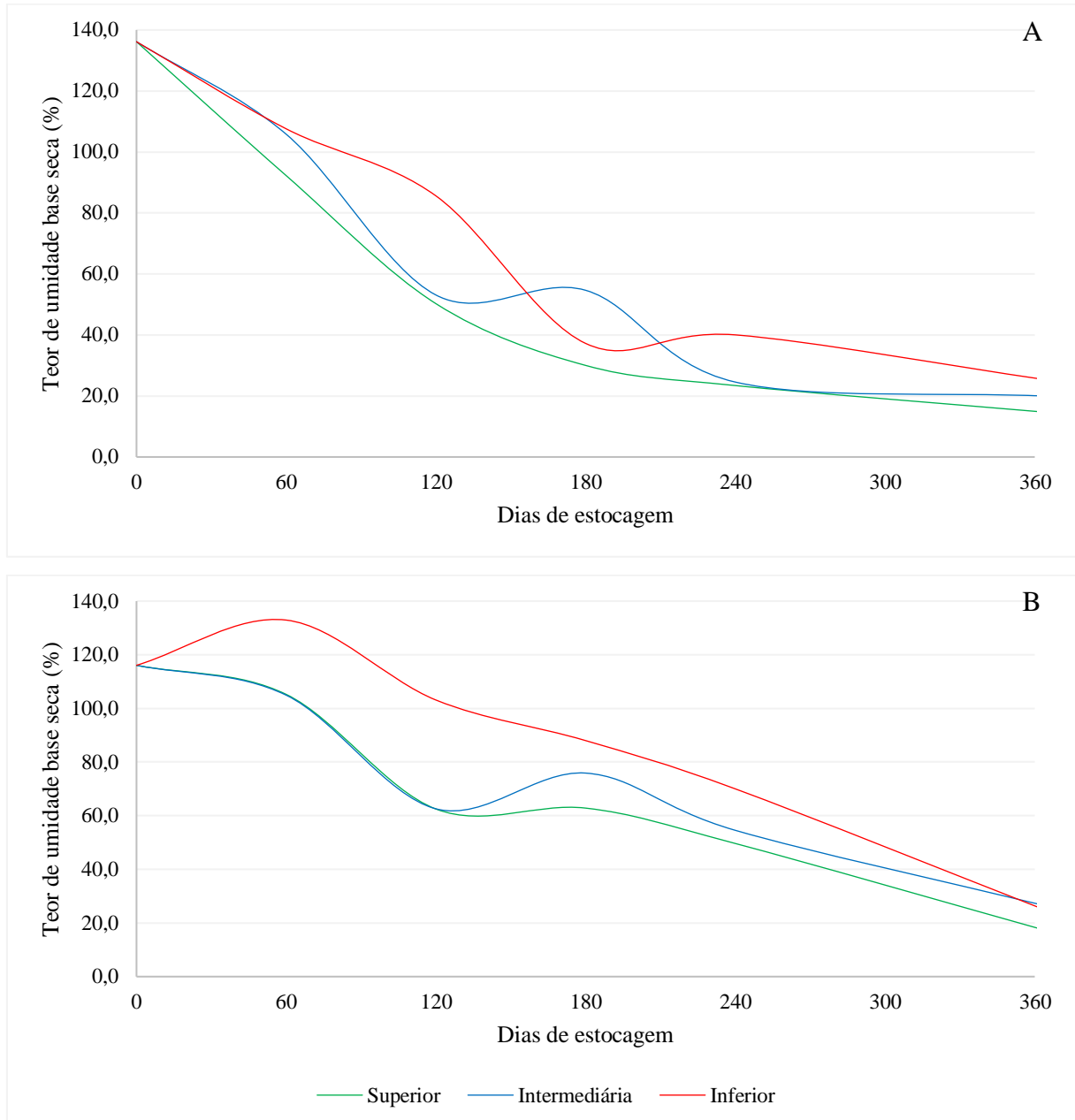
De acordo com as anomalias externas encontradas, tanto fatores bióticos quanto abióticos colaboram de diferentes formas e intensidades, direta e indiretamente nas alterações ocorridas nas propriedades físicas e químicas da biomassa estocada

5.2. Efeito do tempo de estocagem na redução do teor de umidade da madeira

Na Figura 8 estão ilustrados os valores médios de perda de umidade dos toretes de menor (A) e maior (B) classe diamétrica em função da posição na pilha e dias de estocagem. O teor de umidade inicial dos toretes foi de 129,1% e 118,1% para as classes de menor e maior diâmetro, respectivamente. Ao final dos 365 dias, as médias de teor de umidade dos toretes de menor e maior diâmetro foram de 20% e 29,8%, respectivamente, com redução de 84,5% e 74,8% em relação ao teor de umidade inicial, constatando assim a perda de umidade em diferentes proporções em madeiras de diferentes diâmetros. A maior perda de umidade ocorreu nos toretes pertencentes à menor classe diamétrica posicionados na região superior da pilha, com redução de 88,9% em relação ao teor de umidade inicial, enquanto a menor perda foi registrada nos toretes de maior diâmetro posicionados na região inferior, com redução de 66,7%.

A redução na perda de umidade da madeira com o aumento do diâmetro durante a secagem ao ar livre é relatada em literatura (VITAL et al., 1985; REZENDE et al., 2010a, 2010b; ZANUNCIO et al., 2015; DONATO et al., 2018), justificado pela maior distância percorrida pela água desde a região mais interna até as extremidades nas madeiras de maior classe diamétrica e pela relação cerne/alburno (SARALECOS et al., 2014; VISSER et al., 2014; ZANUNCIO et al., 2015). Ainda, madeiras com menor diâmetro possuem menor volume quando comparadas às de maior classe diamétrica, tendo, portanto, menos água livre disponível nos espaços internos, assim, a saída de água será mais rápida. A estrutura anatômica também é determinante na movimentação de água na madeira (MONTEIRO et al., 2017), visto que a deslocação na fase líquida é realizada por capilaridade (JANKOWSKY et al., 2000). A organização das estruturas no sentido longitudinal, principalmente os vasos, favorece o fluxo nessa direção (SIAU, 1971), facilitando a saída de água. Portanto, as diferenças de umidade no tempo de secagem são decorrentes da influência da classe diamétrica sobre a taxa de secagem, que geralmente reduz conforme o diâmetro da tora aumenta (OLIVEIRA et al., 2017), uma vez que, independente da direção, a água sempre busca o caminho mais fácil para se deslocar (MONTEIRO, 2014).

Figura 8 – Medianas de perda de umidade dos toretes de menor (A) e maior (B) classe diamétrica localizados nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha de secagem ao longo dos dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365).



A perda de umidade também foi influenciada pela posição dos toretes na pilha, visto que, independente da classe de diâmetro, os posicionados na região inferior da pilha secaram de forma mais lenta, enquanto os da região superior secaram mais rápido (Figura 8). O teor de umidade final da madeira variou de 14,6% a 17,1% na região superior; 19,9% a 26,2% na região central e de 25,3% a 24,5% na região inferior da pilha. Na Tabela 2 verifica-se que os toretes

de menor diâmetro das regiões superior e intermediária da pilha de secagem atingiram a umidade de saturação das fibras (USF) aos 240 dias (23,4% e 24,6% de teor de umidade em base seca, respectivamente), enquanto os da região inferior, além dos toretes de maior diâmetro posicionados nas regiões superior, intermediária e inferior somente atingiram a USF aos 365 dias (17,1%, 26,2%, 25,3% e 24,5% respectivamente).

Tabela 2 – Medianas de teor de umidade (%) de toretes de eucalipto de menor (CDI) e maior (CDII) classe diamétrica, em relação à posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e aos dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365)

Dias de estocagem	Posição dos toretes na pilha e classe diamétrica						Média geral
	Superior		Intermediária		Inferior		
	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	
0	136,1 Aa	116,1 Aa	136,1 Aa	116,1 Aa	136,1 Aa	116,1 Aa	126,1 Aa
60	92,2 Bb	105,2 Bb	105,8 Bb	104,9 Bb	107,6 Bb	132,9 Aa	108,1 Bb
120	50,3 Dc	62,5 Cbc	53,1 Cc	62,6 Cab	85,6 Cab	103,1 Ba	69,5 Cbc
180	30,0 Cb	62,8 Cab	54,7 Cab	75,9 Db	37,2 Db	74,0 BCa	55,8 Dab
240	23,4 Ec	49,6 Cab	24,6 Dc	54,5 Dab	40,0 Dab	72,1 CDa	44,1 Eb
365	14,6 Fc	17,1 Dbc	19,9 Eabc	26,2 Eab	25,3 Eab	24,5 Dab	21,3 Fab

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

Os valores de teor de umidade da pilha seguiram a tendência relatada por Santos et al. (2012a), na qual os toretes da região inferior têm, em geral, maior teor de umidade em relação aos do topo da pilha para o mesmo período de secagem. A secagem mais lenta dos toretes da região inferior se deve ao contato direto com o solo, em que a umidade do solo reduz a velocidade de perda de água da madeira; além da menor circulação de ar, que é fundamental para a secagem da madeira (REZENDE et al., 2010b; PECENKA et al., 2018). A maior perda de umidade dos toretes localizados na região superior foi devido à maior exposição das peças a condições ambientais favoráveis à secagem natural, como a circulação do ar, que renova a massa de ar que envolve a madeira, facilitando assim a evaporação da água (ZEN et al., 2019). Os toretes de ambas as classes diamétricas posicionados na região intermediária da pilha absorveram umidade após 180 dias de estocagem, podendo estar relacionado à incidência de chuva neste período, causando assim o reumedecimento da madeira estocada (Figura 2), que ocorreu entre os meses de março e abril de 2019. Além da diferença de disposição na altura na pilha e diâmetro dos toretes, outros fatores podem influenciar a velocidade de secagem, como

a escolha do material genético, a relação cerne/alburno, além dos caracteres anatômicos da madeira que influenciam na permeabilidade (DONATO et al., 2018).

De modo geral, somente entre 240 e 365 dias de secagem em campo os toretes alcançaram teor de umidade próximo a 40%, valor ideal para carbonização da madeira de acordo com recomendações da norma COPAM (2018). Toras de *E. grandis* estocadas com casca ao ar livre alcançaram 32% de teor de umidade médio ao fim de 175 dias nos estudos de Vital et al. (1985) e 19% aos 240 dias nos estudos de Rezende et al. (2010a). O maior tempo para a secagem da madeira nas três alturas da pilha e nos dois diâmetros analisados pode estar associado às constantes condições de umedecimento da madeira ocasionado pela incidência de chuvas no local de instalação do experimento até por volta dos 240 dias (Figura 2).

A utilização da madeira com teor de umidade acima do indicado pode trazer prejuízos conforme a indústria para a qual será destinada. Na carbonização da madeira, por exemplo, o processo é comprometido de forma significativa, influenciando no aumento do tempo de ciclo de produção do carvão vegetal, aumento das emissões gasosas, redução do rendimento em carvão vegetal (CANAL et al., 2016a) e do poder calorífico do combustível (GARSTANG et al., 2002; MÜZEL et al., 2014), além de produzir um carvão mais friável e menos resistente, ou seja, que gera maior quantidade de finos durante o manuseio (CARNEIRO et al., 2013b). Ainda, a carbonização da madeira muito úmida retarda a taxa de aquecimento, fazendo com que a temperatura máxima pretendida não seja alcançada devido ao excesso de vapor de água liberado durante o processo (ARRUDA et al., 2011).

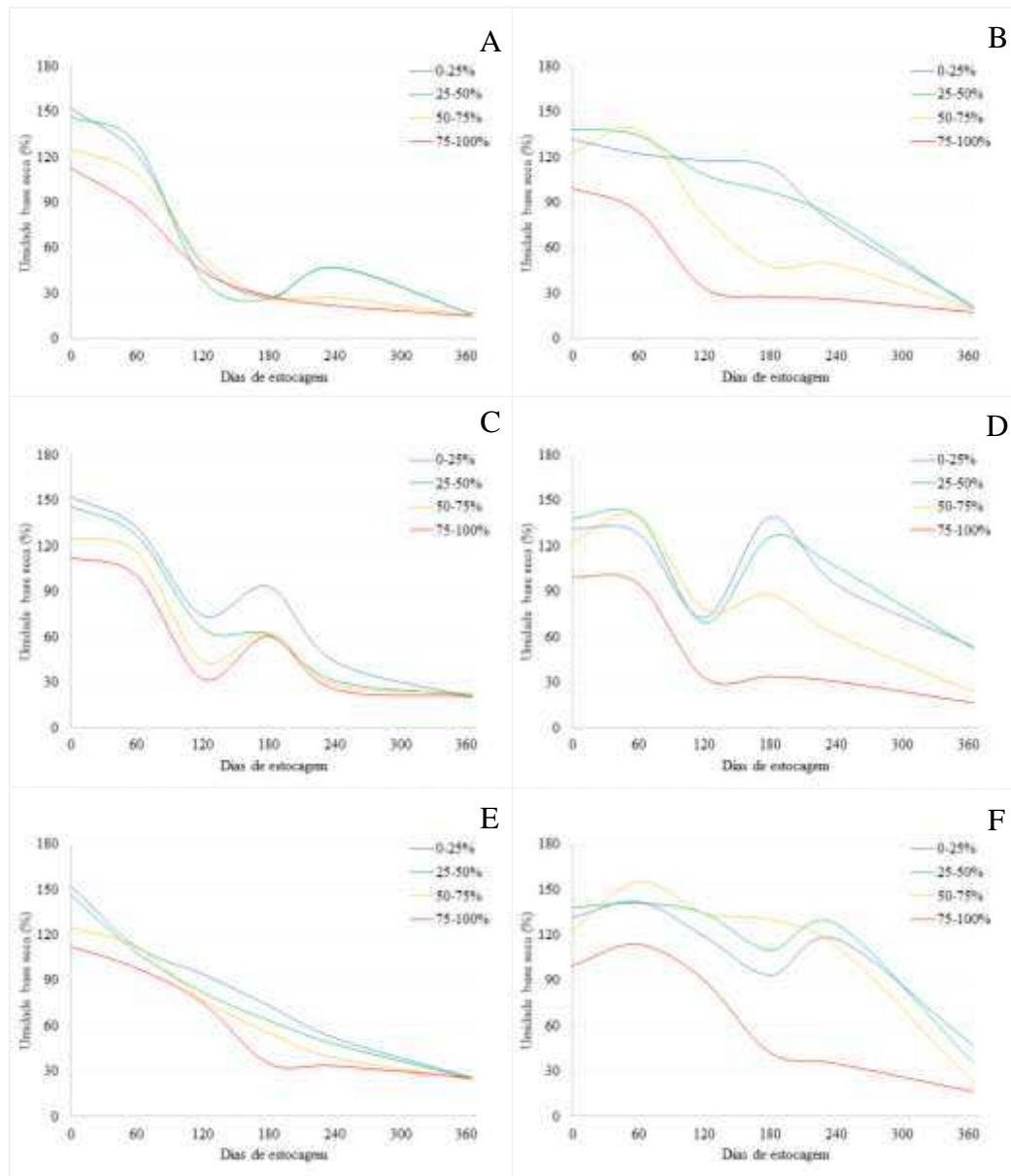
5.2.1. Efeito da posição radial no teor de umidade da madeira durante a secagem

O teor de umidade dos toretes diminuiu no sentido medula-casca ao longo do período de avaliação (Figura 9). No início da estocagem, os maiores teores de umidade foram verificados nas regiões mais internas dos toretes (0-50%), enquanto na região mais externa (75-100%), próxima à casca, foram encontrados os menores teores de umidade. A tendência de decréscimo do teor de umidade no sentido medula-casca observada no início do período de estocagem é citada em literatura (OLIVEIRA et al., 2005a) e está relacionada à maior facilidade de saída da água livre e de adesão na região periférica dos toretes em relação às partes centrais, mais próximas à medula (ZANUNCIO et al., 2015b) devido ao menor percurso radial para a saída de água, associada à menor energia requerida para a movimentação, além da maior proximidade com o meio externo, facilitando a perda de água (ABRAHÃO et al., 2016). Fatores relacionados à anatomia da madeira também influenciam a secagem tendo em vista a variedade de componentes anatômicos que podem facilitar ou dificultar o processo de secagem

(REDMAN et al., 2016), a citar a relação cerne/alburno, em razão da maior impermeabilidade do cerne, além do bloqueio dos vasos por tiloses e deposição de extrativos, que dificultam o fluxo de água, ou seja, a menor permeabilidade nas regiões mais internas da madeira, entre outros (RESENDE et al., 2018). Assim, para uma secagem mais rápida, é desejável que a madeira tenha uma baixa relação cerne/alburno, preferencialmente sem casca, de menor diâmetro, que esteja fora do contato com o solo e que tenha a maior exposição ao sol e a ventos (maior circulação de ar) (TEIXEIRA, 2015).

De madeira geral, as madeiras de menor diâmetro tiveram as maiores perdas de umidade na região central (86,5%) quando comparadas às de maior diâmetro (69,0%), enquanto na região mais externa da madeira houve perda similar para ambas as classes de diâmetro (81,8% e 83,1% para menor e maior classe diamétrica, respectivamente). Logo, é possível constatar, ao final do período de secagem, a inexistência de gradiente de umidade nas madeiras de menor diâmetro (médias de teor de umidade interno e externo de 20,6% e 20,5%, respectivamente), enquanto o gradiente médio de umidade das madeiras de maior diâmetro foi de 23,8%, com médias de teor de umidade interno e externo de 40,7% e 16,9%, respectivamente. Ou seja, a distribuição do teor de umidade no sentido radial das madeiras de menor diâmetro é mais uniforme ao término da secagem frente às de maior diâmetro. Tal comportamento já era esperado, visto que há uma maior dificuldade em se estabelecer um gradiente de umidade nas madeiras de maior classe de diâmetro tendo em vista a presença da água de adesão na região mais próxima à medula, que requer maior gasto de energia para sua remoção por estar ligada à parede celular na forma de vapor por ligações de hidrogênio (ZANUNCIO et al., 2016), bem como o maior percurso que a água precisa percorrer para ser evaporada da madeira.

Figura 9 – Medianas de perda de umidade no sentido radial dos toretes de menor (9.A, 9. C e 9. E) e maior (9.B, 9.D e 9.F) classe diamétrica localizados, respectivamente, nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha de secagem ao longo dos dias de estocagem.

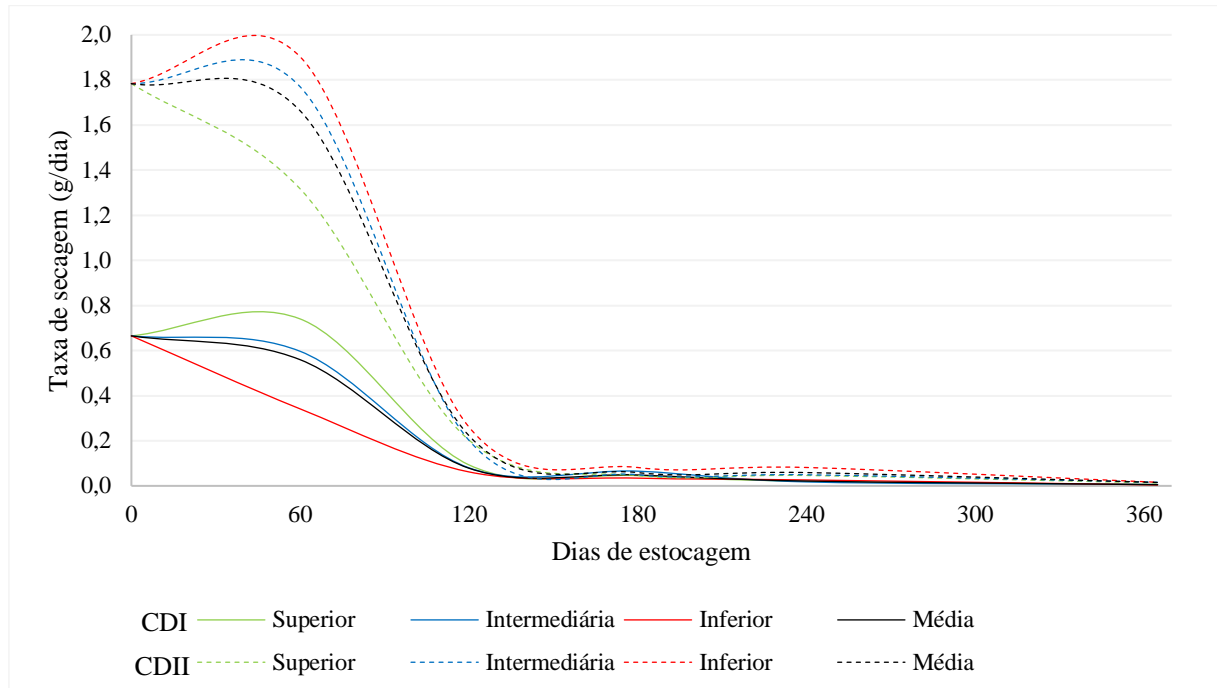


Fonte: Autora.

Ainda, as madeiras de maior diâmetro geralmente possuem maior proporção de madeira de cerne, o que também pode dificultar a perda de umidade devido à impermeabilidade (RESENDE et al., 2018). Portanto, o prosseguimento da secagem da madeira está condicionado tanto às características inerentes ao ambiente quanto à estrutura anatômica (JANKOWSKY et al., 2000).

Na Figura 10 estão indicadas as taxas de secagem das madeiras em função dos tratamentos.

Figura 10 – Taxa de secagem dos toretes de menor (CDI) e maior (CDII) classe diamétrica localizados nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha de secagem ao longo dos dias de estocagem.



Fonte: Autora.

Independente da classe diamétrica, as maiores perdas de água foram observadas nos primeiros 120 dias de secagem. Do 60.º ao 120.º dia de secagem houve redução considerável da taxa de secagem da madeira, com redução de 86% na taxa de secagem das madeiras de menor classe diamétrica e 89,4% nas de maior classe de diâmetro. A maior perda de umidade período inicial da estocagem se deu devido à maior presença de água livre, facilmente removida por conta das fracas forças capilares que a ligam à madeira (SKAAR, 1972), além do maior gradiente de umidade em relação à atmosfera circundante, favorecendo a passagem de água da madeira para o ar com maior eficiência (FREDRIKSSON, 2019). À medida que o teor de umidade da madeira foi diminuindo, aproximando-a da umidade de saturação das fibras, a taxa de remoção foi reduzida drasticamente, independente do diâmetro, seguindo a tendência relatada em literatura (REZENDE et al., 2010a; ZANUNCIO et al., 2015).

A partir dos 120 dias houve redução e início da estabilização das taxas de secagem, indicando que a madeira estocada já tinha perdido boa parte da água livre por capilaridade.

Fatores como maior temperatura e maior circulação do ar são necessários para que a perda de água continue na mesma velocidade, no entanto, a água de adesão remanescente na parede celular da madeira possui a remoção mais lenta e difícil, visto que as moléculas de água estão ligadas à madeira por meio de ligações de hidrogênio nos grupos hidroxila da cadeia celulósica, requerendo assim uma maior quantidade de energia para evaporar a água, uma vez que a atração entre a madeira e a água deve ser vencida (MORESCHI, 2014). A saída ocorre simultaneamente à difusão de vapor através das cavidades celulares e da parede celular e pode seguir caminhos diferentes até superfície da madeira como lúme-pontuação-lúme; parede-parede; e parede-lúme-parede (KLITZKE, 2003).

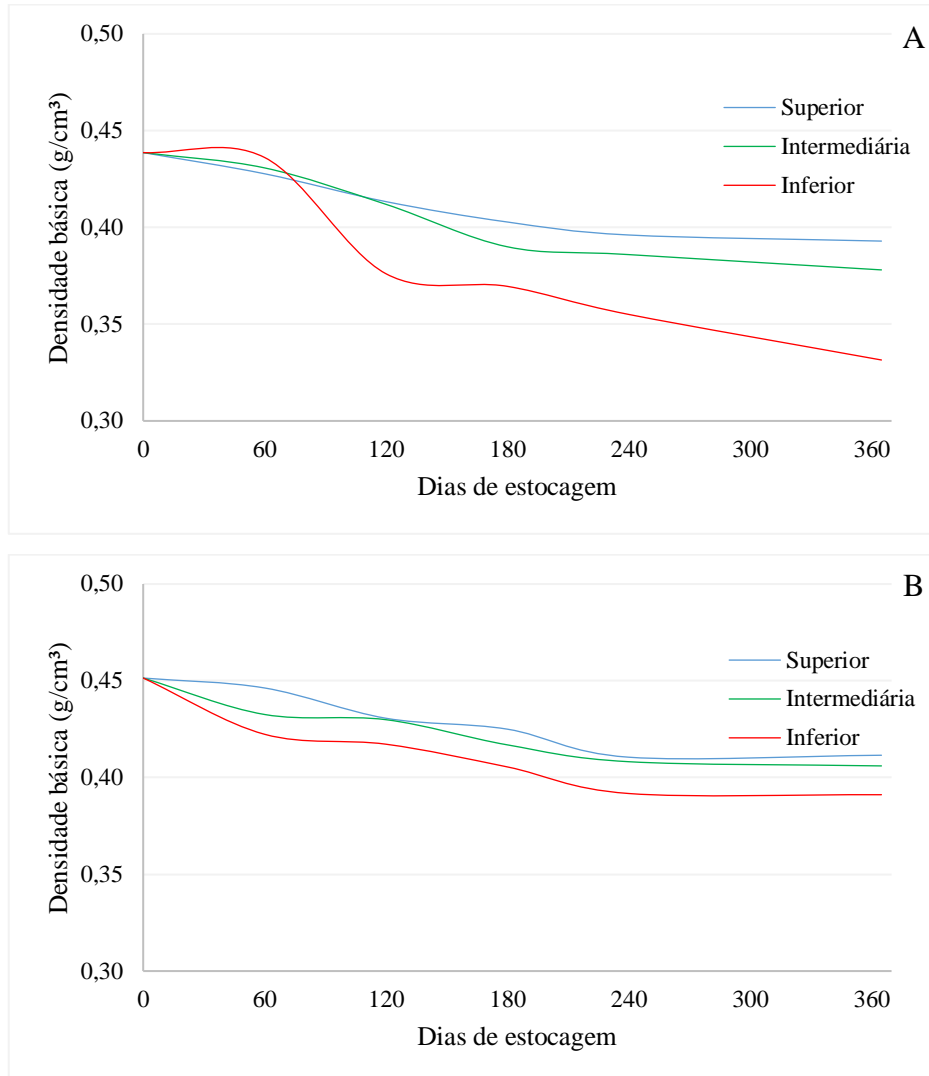
A madeira de menor diâmetro da região inferior da pilha teve a menor taxa de secagem, enquanto a maior taxa foi verificada na madeira de maior diâmetro também localizada na região inferior da pilha. A taxa de secagem foi, em média, três vezes maior nas madeiras de maior diâmetro por terem maior quantidade/volume de água disponível no interior, portanto, perdem mais água. No entanto, ressalta-se que as madeiras de maiores diâmetros, de modo geral, sempre estarão mais úmidas em razão do maior caminho que a água precisa percorrer desde a região interna da madeira até a sua superfície para que consiga ser evaporada (ZANUNCIO et al., 2015). Fato constatado neste estudo e também relatado por Vital et al. (1985), Rezende et al. (2010a) e Abrahão et al. (2016), corroborando com a recomendação de separar a madeira por classe diamétrica para a instalação de pilhas de secagem citada na literatura (OLIVEIRA et al., 2017).

5.3. Densidade

5.3.1. Densidade Básica

A densidade básica média inicial dos toretes de menor e maior diâmetro foi de 0,439 e 0,451 g/cm³, respectivamente (Figura 11). Ao término dos 12 meses de estocagem, os toretes de menor e maior diâmetro da região superior da pilha de estocagem tiveram valores médios de densidade básica de 0,393 e 0,412 g/cm³, respectivamente, representando perda de 10,5% e 8,7% em relação ao valor inicial. Os toretes de menor e maior diâmetro da região intermediária da pilha tiveram perdas de 13,9% e 10,0%, respectivamente (0,378 e 0,406 g/cm³), e os localizados na região inferior tiveram as maiores perdas de densidade básica, com 24,6% e 13,3% na menor e maior classe diamétrica, respectivamente (0,331 e 0,391 g/cm³).

Figura 11 – Medianas de densidade básica da madeira de menor (A) e maior (B) classe diamétrica em relação à posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365).



Fonte: Autora.

Os valores de densidade básica determinados no início do experimento (dia zero de estocagem) estão de acordo com o citado em literatura, que varia entre 0,450 e 0,500 g/cm³ (REZENDE et al., 2010b; CARNEIRO et al., 2014). A perda de densidade básica da madeira estocada está associada a alterações químicas e biológicas, a citar a biodeterioração por bactérias, fungos e insetos xilófagos, que ocorrem no interior da pilha de estocagem a partir das condições ambientais às quais ela foi exposta (BRAND, 2007; LENZ et al., 2015), havendo, portanto, perda de massa, que afeta diretamente a densidade básica da madeira (RODRIGUES, ROUSSET, 2009).

Santos et al. (2015) relataram decréscimo significativo da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. após 360 dias de exposição às condições ambientais, com média de 20,1%. Lenz

et al. (2017) também concluíram que os métodos de armazenamento ao ar livre podem causar perdas de massa de até 26,6%, prejudicando as propriedades mecânicas da madeira (DELUCIS et al., 2016). Os autores associam a diminuição de densidade básica da madeira à exposição ao ar livre, que levou à despolimerização de celulose e a perda de conteúdo de hemiceluloses e lignina devido ao oxigênio e umidade em concentrações ideais para deterioração da madeira, bem como o efeito de luz ultravioleta, que induziu reações fotoquímicas na madeira. Logo, o período de estocagem deve ser suficiente para que a biomassa reduza o teor de umidade sem perder características que influenciem nas demais propriedades (BRAND, 2007).

Houve efeito significativo dos dias de estocagem e posição dos toretes na pilha na densidade básica da madeira (Tabela 3). A redução significativa da densidade básica da madeira pertencente à menor classe diamétrica, localizada nas regiões superior e intermediária, teve início a partir dos 120 dias de estocagem (perdas de 5,9% e 6,1%), enquanto os da região inferior da pilha tiveram perdas significativas a partir de 240 dias (19,1%). Os toretes de maior diâmetro localizados nas regiões superior e intermediária tiveram perda na densidade básica a partir dos 240 dias, enquanto os da região inferior tiveram perdas já a partir dos 60 dias de estocagem, com 8,9%, 9,5% e 6,4%, respectivamente.

Tabela 3 – Medianas de densidade básica (g/cm^3) de toretes de eucalipto em relação à classe diamétrica (CDI e CDII), posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365)

Dias de estocagem	Posição dos toretes na pilha e classes diamétricas						Média geral
	Superior		Intermediária		Inferior		
	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	
0	0,439 Aa	0,451 Aa	0,439 Aa	0,451 Aa	0,439 Aa	0,451 Aa	0,445 Aa
60	0,428 Aab	0,446 ABab	0,431 Aab	0,433 ABab	0,436 ABa	0,422 Bb	0,433 Bab
120	0,413 Bb	0,431 ABCa	0,412 Bb	0,430 ABa	0,376 Abc	0,417 Bab	0,413 Cb
180	0,403 Bbc	0,432 ABCa	0,386 Ccd	0,417 BCab	0,370 BCd	0,405 BCbc	0,402 Dc
240	0,396 Ba	0,411 Ca	0,386 Ca	0,408 Ca	0,355 Cb	0,392 Ca	0,391 Ea
365	0,393 Babc	0,412 BCa	0,378 Dcd	0,406 Cab	0,331 Cd	0,391 Cabc	0,385 Ebc

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

A densidade da madeira pode influenciar na quantidade de material lignocelulósico a ser consumido por organismos xilófagos (SILVA, 2020), estando diretamente relacionada com a perda de massa de madeira para um mesmo volume. Como a pilha ficou completamente exposta a intempéries, houve condições propícias para a deterioração causada por bactérias, fungos e insetos, responsáveis por parte da redução de massa da madeira. A perda de densidade foi mais acentuada nas madeiras de menor classe de diâmetro em razão do menor volume disponível, além de terem maior quantidade de alburno em relação às de maior diâmetro. Além disso, a maior permeabilidade, característica do alburno, o torna mais vulnerável à colonização por fungos, podendo então causar significativa perda de massa da madeira a médio/longo prazo (SILVA et al., 2010; SACCOMAN et al., 2017).

A maior perda de densidade da madeira localizada na região inferior da pilha também foi relatada por Nurmi (1995) e se deu em razão do contato direto com o solo, que perde umidade de forma mais lenta que a madeira, e que possui uma microbiota rica em microrganismos decompositores que podem ter agido de forma mais significativa nas madeiras em contato com o solo, acelerando assim a perda de densidade. Salienta-se que a diminuição da densidade básica pela deterioração da madeira por organismos xilófagos se torna mais significativa sob condições que garantam o contato direto com água, seja por meio de precipitação ou do contato direto com o solo (PALA, 2007).

Sabendo que a madeira com elevado teor de umidade está mais susceptível ao ataque de bactérias e fungos, e que no decorrer dos primeiros 120 dias de estocagem ela ainda estava perdendo água livre, ou seja, o teor de umidade estava acima da USF, a madeira deste referido estudo tinha condições propícias para instalação e proliferação destes organismos xilófagos, o que contribuiu para a perda de densidade mais acentuada no início da estocagem. Após alcançarem teor de umidade próximo à USF, a partir dos 240 dias, a sobrevivência destes organismos xilófagos se tornou mais difícil, reduzindo, conseqüentemente, a taxa de perda de densidade.

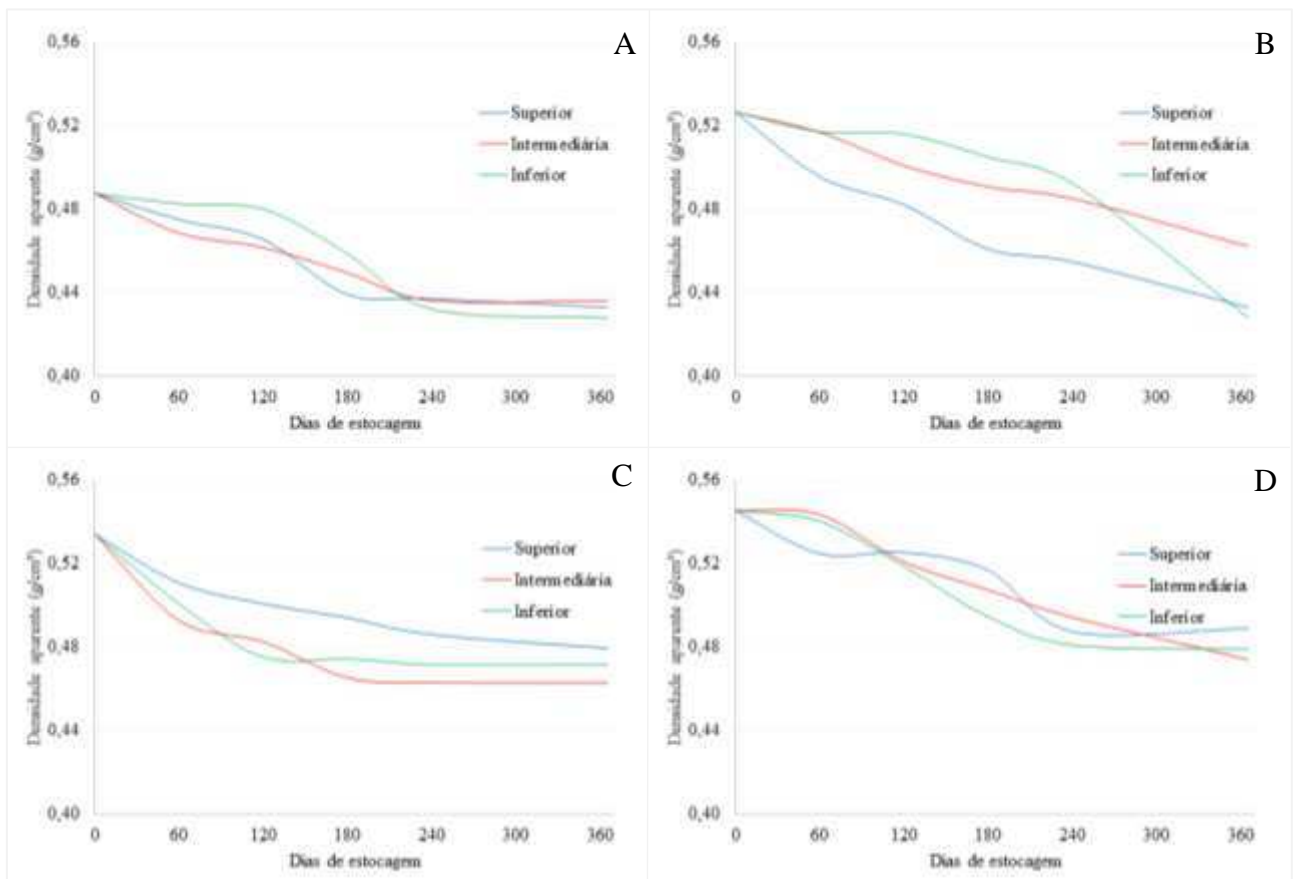
5.3.2. Densidade Aparente

5.3.2.1. De acordo com a norma NBR 7190

As medianas de densidade aparente, a 12% de umidade, base seca, no início do experimento (tempo zero) dos toretes de madeira de menor e maior classe de diâmetro foram de 0,524 e 0,536 g/cm³, respectivamente (Figura 12) e, assim como a densidade básica, a densidade aparente dos toretes também seguiu tendência de decréscimo com o decorrer do tempo.

Ao final do período de estocagem, os toretes de menor e maior classe diamétrica da região superior tiveram médias de 0,439 e 0,477 g/cm³, respectivamente, representando perda de 16,2% e 11,0% em relação ao valor inicial. Os toretes de madeira da região intermediária tiveram redução de 13,6% e 13,3% (0,453 e 0,465 g/cm³, respectivamente na menor e maior classe de diâmetro), e os da região inferior tiveram perdas de 17,8% e 12,1% na menor e maior classe diamétrica, respectivamente (0,431 e 0,471 g/cm³).

Figura 12 – Densidade aparente média de toretes de eucalipto de menor (10.A) e maior diâmetro (10.C) na região do cerne e de menor (10.B) e maior diâmetro (10.D) na região do albarno em relação à posição na pilha e dias de estocagem.



Fonte: Autora.

Houve diferença estatística na densidade aparente da madeira entre os dias de estocagem e entre as posições dos toretes na pilha (Tabela 4). A perda de densidade aparente dos toretes de menor e maior diâmetro localizados na região superior da pilha de estocagem passou a ser significativa somente aos 365 dias (perdas de 16,2% e 11,0%), bem como as madeiras de menor classe de diâmetro das regiões intermediária e inferior (13,6% e 17,8%, respectivamente),

enquanto as de maior classe diamétrica da região intermediária tiveram redução significativa aos 240 dias (12,1%) e da região inferior aos 120 dias (6,9%).

Tabela 4 – Medianas de densidade aparente (g/cm^3) de toretes de eucalipto em relação à classe diamétrica (CDI e CDII), posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365)

Dias de estocagem	Posição dos toretes na pilha e classes diamétricas						Média geral
	Superior		Intermediária		Inferior		
	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	
0	0,524 Aa	0,536 Aa	0,524 Aa	0,536 Aa	0,524 Aa	0,536 Aa	0,530 Aa
60	0,468 ABa	0,519 ABa	0,506 ABa	0,514 ABa	0,501 Aa	0,508 Aa	0,503 Ba
120	0,455 ABa	0,507 ABa	0,485 ABa	0,500 ABCa	0,497 Aa	0,499 Ba	0,490 Ba
180	0,452 BCb	0,496 BCa	0,462 ABab	0,473 BCab	0,482 Aab	0,479 Bab	0,474 Cab
240	0,443 BCa	0,489 BCa	0,457 ABa	0,471 Ca	0,458 Aa	0,479 Ba	0,466 CDa
365	0,439 Ccd	0,477 Ca	0,453 Bbc	0,465 Cab	0,431 Bd	0,471 Ba	0,456 Db

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

Os valores de densidade aparente determinados no início do experimento são próximos ao relatado por Evangelista et al. (2010), com média de $0,550 \text{ g/cm}^3$, e estão dentro da faixa citada em literatura para espécies do gênero, que varia geralmente de $0,400$ a $0,700 \text{ g/cm}^3$ (MUÑIZ, 2002). Como a densidade aparente da madeira é muito influenciada pelo seu teor de umidade, a redução da densidade aparente da madeira no decorrer do período de estocagem é justificada pela perda de umidade da madeira durante esse período.

5.3.2.2. Densidade aparente por imagens digitais de raios X

As médias de densidade aparente observadas a partir do método de densitometria de raios X no início do experimento foram de $0,513$ e $0,500 \text{ g/cm}^3$ para amostras de menor e maior classe diamétrica, respectivamente, na umidade de 12% em base seca.

Aos 365 dias de estocagem, os valores obtidos pela metodologia de raios X indicaram redução de 11,3% e 6,2% nos toretes de menor e maior classe diamétrica localizados na região

superior da pilha de estocagem, enquanto os da região intermediária tiveram redução de 16,2% e 8,8% (menor e maior classe de diâmetro, respectivamente) e os localizados da parte inferior da pilha, 16,2% e 4,6% na menor e maior classe diamétrica, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 – Medianas de densidade aparente (g/cm^3) por densitometria de raios X dos toretes de eucalipto em relação à classe diamétrica (CDI e CDII), posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365)

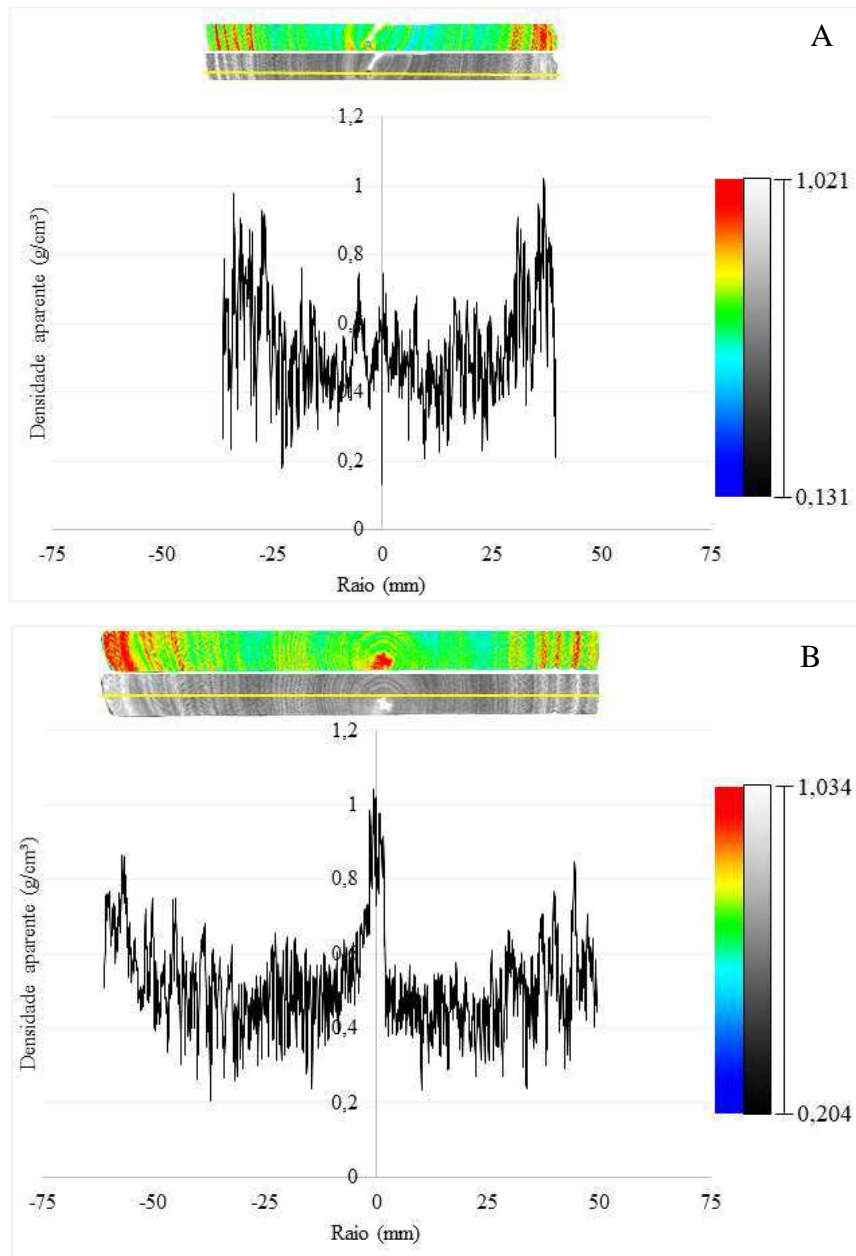
Dias de estocagem	Posição dos toretes na pilha e classes diamétricas					
	Superior		Intermediária		Inferior	
	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII
0	0,513 Aa (0,181)	0,500 Aa (0,136)	0,513 Aa (0,181)	0,500 Aa (0,136)	0,513 Aa (0,181)	0,500 Aa (0,136)
60	0,500 Aa (0,181)	0,495 Aa (0,192)	0,507 ABa (0,161)	0,513 Aa (0,131)	0,475 ABa (0,136)	0,500 Aa (0,228)
120	0,466 Aa (0,196)	0,482 Aa (0,123)	0,453 ABa (0,170)	0,485 ABa (0,148)	0,436 Ba (0,189)	0,484 Aa (0,177)
180	0,455 Aa (0,164)	0,477 Aa (0,168)	0,436 Ba (0,197)	0,481 ABa (0,149)	0,435 Ba (0,176)	0,480 Aa (0,178)
240	0,456 Aab (0,243)	0,478 Aab (0,186)	0,436 Bab (0,174)	0,457 Bab (0,215)	0,435 Bb (0,200)	0,477 Aa (0,174)
365	0,455 Aa (0,182)	0,469 Aa (0,157)	0,430 Ba (0,218)	0,456 Ba (0,141)	0,430 Ba (0,310)	0,477 Aa (0,158)

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade. Os valores entre parêntesis representam o erro padrão.

Observa-se elevada densidade aparente na região da medula da amostra pertencente à maior classe de diâmetro. Nota-se tendência de aumento da densidade aparente no sentido medula-casca nas duas classes diamétricas avaliadas (Figuras 13.A e 13.B).

As imagens digitais de raios X indicam a formação de faixas de crescimento, caracterizadas pela existência de zonas fibrosas distintas, que na escala de cinza são indicadas pelas regiões mais claras, enquanto na escala *rainbow* (colorida) são representadas por tonalidades avermelhadas. Na escala de cinza, as regiões mais claras indicam maior atenuação dos raios X, portanto, maior densidade aparente, enquanto as regiões mais escuras indicam menor densidade aparente da madeira. A escala *rainbow* possui uma paleta com maior variabilidade de cores indo do azul (menor densidade) até o vermelho (maior densidade), facilitando a interpretação e a localização de regiões com diferenças de densidade ao longo do perfil radial do lenho. A diferenciação de densidade por cores na escala *rainbow* permitiu maior contraste de cores em comparação à escala de cinza e ainda não havia sido estudada, sugerindo assim a proposta de metodologia alternativa para a determinação da densidade da madeira.

Figura 13 – Perfil da densidade aparente das amostras de menor (A) e maior classe diamétrica (B) aos 0 dias de estocagem.



Fonte: Autora.

Os valores de densidade aparente média a 12% de umidade por densitometria de raios X da madeira de eucalipto foram similares aos relatados por Arantes et al. (2016), com mesma idade e utilizando a mesma metodologia. O alto valor de densidade aparente registrada na região da medula da amostra de maior classe diamétrica está associado à presença de substância de reserva (cristais de amido) nas células do parênquima axial (CASTRO et al., 2020). Regiões mais claras (na escala de cinza) ou com tonalidade avermelhada (na escala *rainbow*), indicam

a existência de camadas de fibras de parede celular espessa e vasos de menor frequência e diâmetro, possibilitando a demarcação e mensuração da largura dos anéis de crescimento a partir de imagens digitais do lenho das árvores por irradiação de raios X (CASTRO et al., 2017).

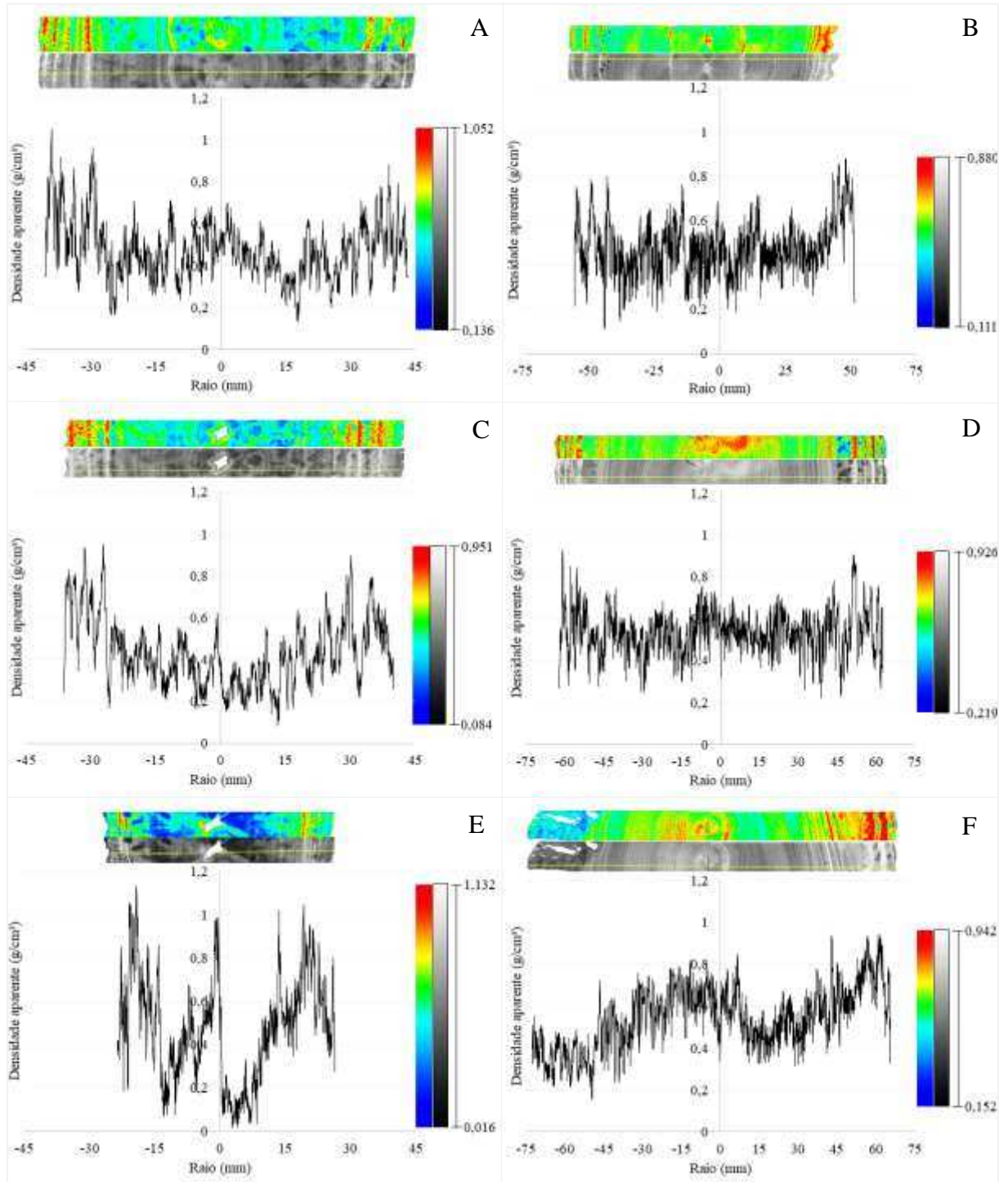
A tendência de incremento da densidade aparente no sentido medula-casca em árvores do mesmo gênero em madeiras juvenis é relatada por Arantes et al. (2016) e Castro et al. (2017, 2020) e associada a variações ocasionadas por alternâncias de diâmetro e frequência de elementos de vaso e faixas de fibras com paredes mais espessas (SETTE JÚNIOR et al., 2014). Estes autores sugerem que o modelo de variação da densidade aparente do lenho de árvores de eucalipto, com idade próxima à do presente estudo, seja caracterizado pela presença de madeira juvenil e surgimento da madeira de transição, visto que foi verificada uma similaridade destas com resultados registrados para árvores de eucalipto com idades mais avançadas, entre 10 e 30 anos.

Ao término dos 12 meses de estocagem, as médias de densidade aparente observadas a partir do método de densitometria de raios X das amostras pertencentes à menor classe de diâmetro foram de 0,455, 0,430 e 0,430 g/cm³ nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha de estocagem, respectivamente, enquanto as de maior diâmetro das mesmas regiões da pilha foram de 0,469, 0,456 e 0,477 g/cm³ (Figura 14).

É possível notar a heterogeneidade da densidade aparente da madeira ao término da estocagem (365 dias) ao longo do sentido radial devido ao estado avançado de deterioração da madeira, provavelmente por fungos, em todas as amostras, indicados pelas regiões/manchas mais escuras (escala de cinza) e tonalidade variando do ciano ao azul (escala *rainbow*), que representam a menor atenuação dos raios X, portanto, menor densidade aparente.

Nas madeiras de menor diâmetro, o ataque pode ser observado ao longo do sentido radial (Figuras 14.A, 14.C e 14.E), enquanto nas de maior diâmetro, verifica-se maior deterioração na região do alburno e cerne-periférico (Figuras 14.B, 14.D e 14.F). Vale salientar que foram observadas manchas brancas e pretas, visíveis a “*olho nu*” nas madeiras de ambas as classes diamétricas durante a inspeção visual, sendo mais acentuado nas madeiras localizadas na região inferior da pilha de estocagem, ou seja, que ficaram em contato direto com o solo, tendo alguns toretes a liberação de material particulado quando friccionado (Figura 14.F), o que foi associado ao ataque de fungos de podridão branca e mole.

Figura 14 – Perfil da densidade aparente no lenho de amostras aos 365 dias de estocagem nos quais 14.A, 14.C e 14.E representam amostras de menor classe diamétrica nas regiões superior, intermediária e inferior, respectivamente, e 14.B, 14.D e 14.F representam amostras de maior classe diamétrica nas regiões superior, intermediária e inferior, respectivamente.



Fonte: Autora.

Os fungos de podridão branca que atacaram a madeira degradaram os constituintes da parede celular, tanto lignina quanto carboidratos, resultando na perda de densidade, a qual também foi reportada por outros autores (TOMAZELLO et al., 2008; BRAZOLIN et al., 2014; HERVÉ et al., 2014; SANTINI JUNIOR et al., 2019), tornando a madeira mais permeável e higroscópica, além de afetar de forma significativa as propriedades mecânicas, tornando-a mais susceptível à ruptura por tração simples (BRAZOLIN et al., 2014).

Geralmente há uma grande diferença de resistência à deterioração biológica entre as regiões do cerne e do alburno, sendo a madeira do alburno normalmente a mais susceptível ao ataque (SILVA et al., 2014; COSTA et al., 2017). A natureza heterogênea da madeira reflete também na deterioração, que não é distribuída uniformemente (FACKLER et al., 2010), portanto, a colonização a partir de fungos de podridão branca é altamente variável, implicando na maior variação da densidade aparente da madeira (HERVÉ et al., 2014). A coexistência de dois ou mais fungos de podridão branca na madeira ocasionam a chamada *spalted wood*, que consiste em manchas pigmentadas delimitadas por linhas escuras denominadas como *zone lines* ou linhas de zona compostas por melanina (GUTIERREZ, ROBINSON, 2019). Os fungos de podridão branca, principalmente o *Trametes versicolor*, erguem tais linhas de zona ao detectarem na madeira a presença de outro fungo de força equivalente (ROBINSON, 2014).

Os fungos de podridão mole se desenvolvem em condições de excessiva umidade e causam uma deterioração mais lenta da madeira em comparação aos de podridão branca e marrom (KARUNASEKERA et al., 2017), cujo mecanismo de ataque gera extensa deterioração dos polissacarídeos, permanecendo ainda regiões com “resíduos” de lignina (SINGH, 2012).

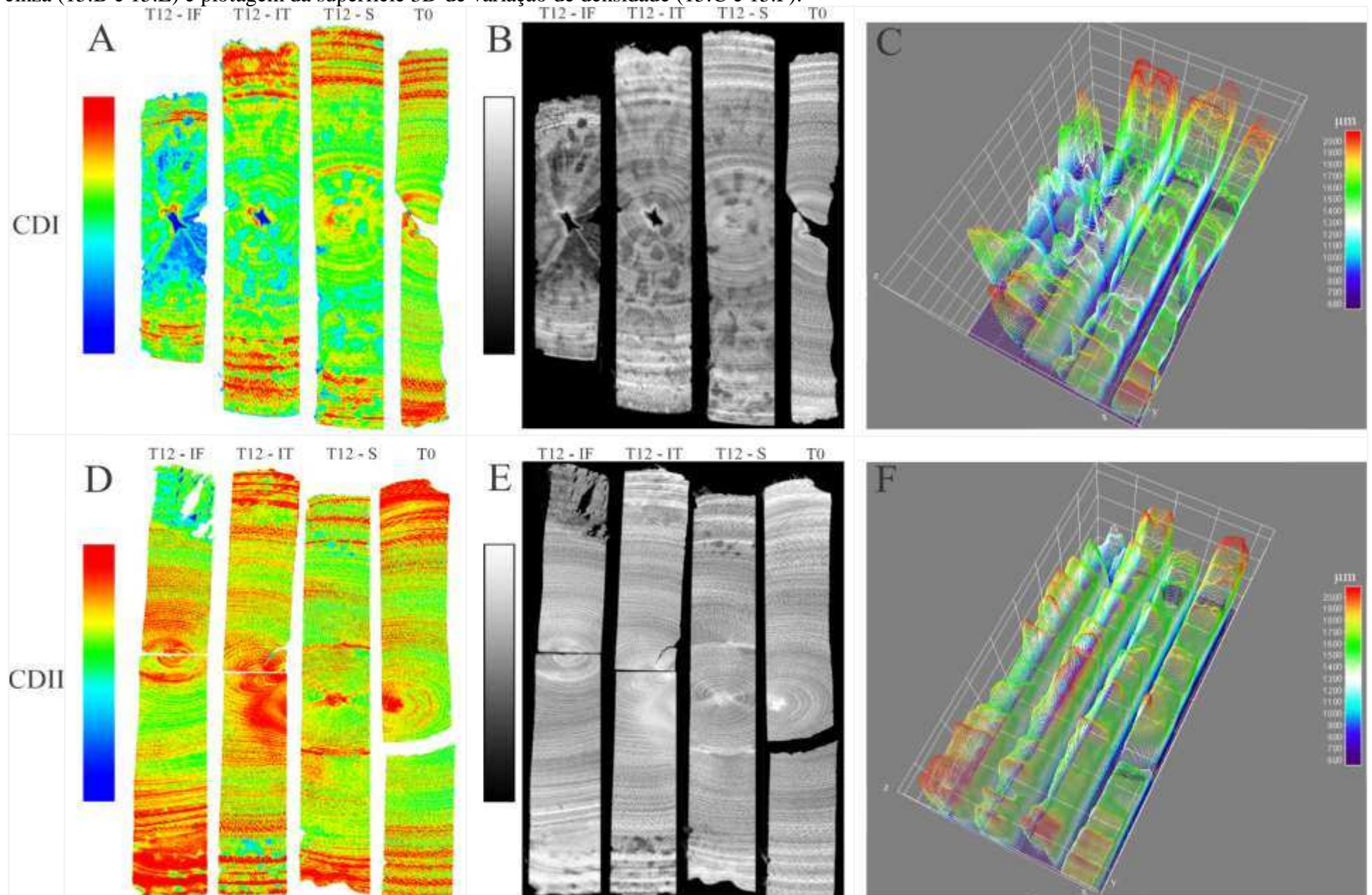
Na maioria dos casos, o ataque de fungos na madeira pode estar associado à presença de cupins de solo, além de alta umidade, que podem acelerar o processo de deterioração da madeira (SANTINI JUNIOR et al., 2019).

A plotagem da superfície em 3D ilustra estreitas linhas, paralelas entre si e perpendiculares ao comprimento das amostras, que estão diretamente relacionadas com a variação da densidade aparente da madeira no corpo de prova avaliado (Figura 15). Quanto menor a variação de picos e vales dentro de uma mesma linha, mais homogênea será a densidade da madeira naquela região da amostra. Por consequência, quanto maior a variação delas ao longo da amostra, maior a flutuação da densidade da madeira, o que é um grande problema, devido à influência que a densidade exerce em diversas propriedades da madeira. Além da variação das linhas, é possível observar a variação das cores, sendo as linhas azuis indicativo de menor densidade e vermelho de maior densidade. A plotagem da superfície em 3D

proporciona uma melhor visualização e interpretação da variação da densidade aparente ao longo da amostra tendo como base as imagens de raios X digital.

Nas amostras de madeira testemunha, ou seja, analisadas no primeiro dia de estocagem, observou-se maior homogeneidade da distribuição de picos e vales ao longo de todo o lenho, enquanto as coletadas aos 365 dias tiveram maior variação, sobretudo as amostradas na região inferior da pilha de estocagem. A plotagem da superfície em 3D de densidade por cores e linhas na escala *rainbow* permitiu maior contraste de cores e variação da densidade em escala 3D em comparação à escala de cinza, indicando melhor metodologia para interpretação dos resultados.

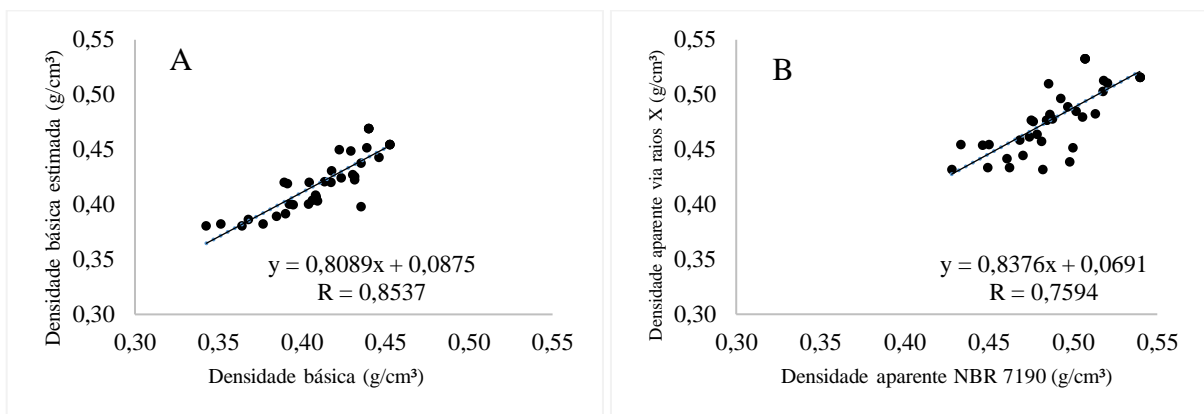
Figura 15 – Amostras aos 0 (T0) e 365 (T12) dias de estocagem de menor (CDI) e maior (CDII) classes de diâmetro em escala *rainbow* (15.A e 15.D), escala de cinza (15.B e 15.E) e plotagem da superfície 3D de variação de densidade (15.C e 15.F).

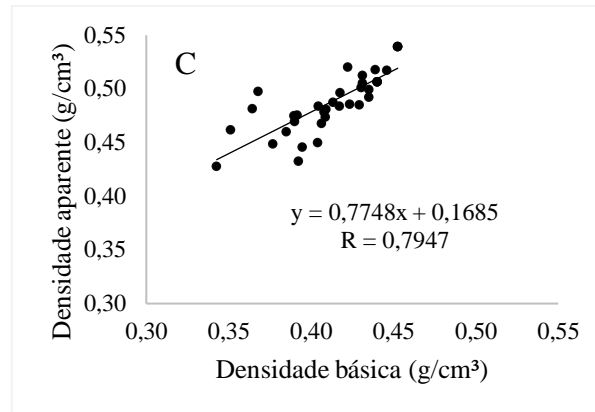


Destaca-se que foi verificada correlação positiva entre as médias de densidade básica da madeira de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e a densidade básica estimada ($R = 0,85$) (Figura 16.A), que foi maior que a correlação entre as médias de densidade aparente por densitometria de raios X e a densidade aparente obtida de acordo com a norma supracitada ($R = 0,76$) (Figura 16.B), e que foi menor que a encontrada entre as médias de densidade aparente e densidade básica, ambas de acordo com a norma supracitada ($R = 0,79$) (Figura 16.C). As correlações positivas obtidas entre os resultados apontam o alto grau de associação entre as variáveis, bem como a confiabilidade da metodologia de densitometria por raios X para estimar a densidade da madeira.

A alta correlação entre os dados obtidos a partir de imagens digitais de raios X e densidades básica e aparente pode ser devido à metodologia de obtenção dos resultados, tendo em vista a maior quantidade de pontos amostrados (em média, 4 mil pontos por amostra), gerando assim uma maior variação entre os valores. Tal resultado permitirá relacionar a densidade básica ao perfil densitométrico tradicionalmente conhecido, além de ampliar estudos da madeira para celulose e para carvão vegetal, em que o parâmetro densidade básica é mais utilizado que a densidade aparente.

Figura 16 – Regressão equivalente às correlações entre densidade básica da madeira e densidade básica estimada por raios X (16.A), densidade aparente da madeira por densitometria de raios X e de acordo com a norma NBR 7190 (16.B) e densidades básica e aparente da madeira, ambas de acordo com a norma NBR 7190 (16.C).





Fonte: Autora.

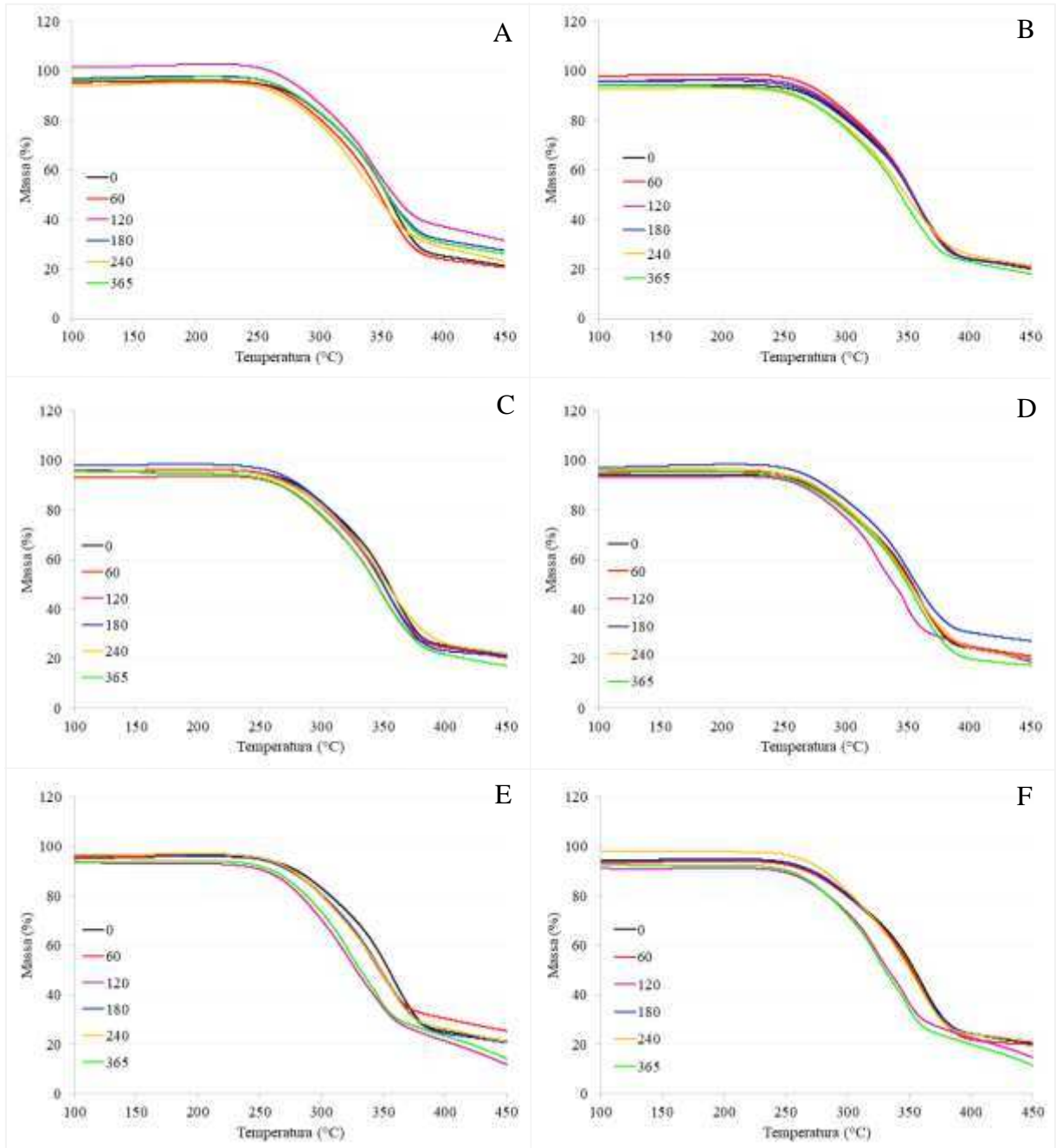
Logsdon (2003), visando estabelecer estimativas para resultados do ensaio de estabilidade dimensional em função da densidade básica, encontrou uma correlação muito forte e positiva entre densidades básica e aparente da madeira, tanto anidra ($R^2 = 0,9842$) quanto a 12% de umidade ($R^2 = 0,9856$). Entretanto é importante ressaltar a escassez de trabalhos na literatura que corroborem com a correlação encontrada entre os parâmetros avaliados.

5.4. Análise termogravimétrica e composição química imediata da madeira estocada

Os termogramas referentes às análises de TGA dos toretes avaliados, que correspondem à perda de massa da madeira, em porcentagem, em função da temperatura, estão dispostos na Figura 17.

As amostras possuem, em geral, curvas similares em relação à degradação térmica e consequente perda de massa. As madeiras pertencentes à menor classe diamétrica, estocadas na região superior da pilha durante 120 dias, foram as mais resistentes termicamente, enquanto as mais suscetíveis à degradação foram as estocadas durante 60 dias (Figura 17.A); as de maior classe diamétrica armazenadas durante 365 dias mostram tendência à menor resistência à degradação térmica (Figura 17.B), mesmo comportamento verificado para as madeiras das duas classes de diâmetro estocadas na região intermediária da pilha (Figuras 17.C e 17.D), nas quais as de maior diâmetro armazenadas durante 180 dias tiveram maior resistência à degradação. As madeiras de menor diâmetro que ficaram em contato direto com o solo durante 60 dias tiveram maior resistência à degradação térmica, ao passo que as mais suscetíveis foram as que ficaram estocadas durante 120 e 365 dias em ambas as classes diamétricas (Figuras 17.E e 17.F).

Figura 17 – Curvas de TG de toretes de eucalipto nos quais 17.A, 17.C e 17.E representam amostras de menor classe diamétrica localizadas nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha, respectivamente, e 17.B, 17.D e 17.F representam amostras de maior classe diamétrica nas mesmas regiões citadas.



Fonte: Autora.

Nas curvas de perda de massa, a faixa de degradação inicial da madeira, que se dá entre 100 e 200 °C, é chamada de zona de estabilidade térmica, onde, desde que a madeira não fique exposta por longos períodos, os componentes são termicamente estáveis (FIALHO et al., 2019), fato comum a todas as amostras analisadas. Na Tabela 6 é possível observar o percentual de

perda de massa por decomposição térmica da madeira de acordo com as faixas de temperatura, nas quais as médias gerais de perda de massa entre 250-300 °C, faixa na qual ocorre o início da decomposição das hemiceluloses, foram de 14,7% e 14,6% para as madeiras de menor e maior classe de diâmetro, respectivamente, podendo, portanto, inferir que boa parte da massa perdida se dá por conta da degradação das hemiceluloses. Tais médias foram menores do que as citadas por Freitas et al. (2017) (18,6%) e similares à relatada por Silva et al. (2019b) (14,9%) para a madeira de *Eucalyptus* na mesma faixa de temperatura.

A perda de massa inicial verificada por volta dos 250 °C, se dá por conta da degradação térmica das hemiceluloses (PEREIRA et al., 2013b). Verifica-se que a perda de massa mais acentuada ocorre na faixa de temperatura entre 300-350 °C e 350-400 °C, com médias de 32,8% e 23,9% para as madeiras de menor classe de diâmetro e 31,7% e 26,8% para as madeiras da maior classe diamétrica, respectivamente, totalizando 56,7% e 58,5% (Tabela 6). A maior perda nessas temperaturas se dá em razão da maior quantidade de energia requerida para a despolimerização das cadeias de celulose, composto mais abundante da madeira (YANG et al., 2007; PEREIRA et al., 2013b), no qual a degradação se dá, em sua maioria, nesta faixa de temperatura.

Na faixa de 400-450 °C há perda de massa de forma menos intensa visto que, nesta faixa de temperatura, quase todas as hemiceluloses e celulose já foram degradadas, havendo, portanto, mais lignina, apesar da sua degradação térmica ocorrer em uma ampla faixa de temperatura (YANG et al., 2007; PEREIRA et al., 2013b; DIAS JÚNIOR et al., 2019). Logo, a maior massa residual a partir de 400 °C é devido principalmente às ligninas, que são os compostos orgânicos mais estáveis nessa temperatura, além de constituintes inorgânicos, como as cinzas (YANG et al., 2007; SILVA et al., 2019a). Dessa forma, menores valores de massa residual indicam menores teores de lignina, além de evidenciar menor resistência da biomassa à degradação térmica.

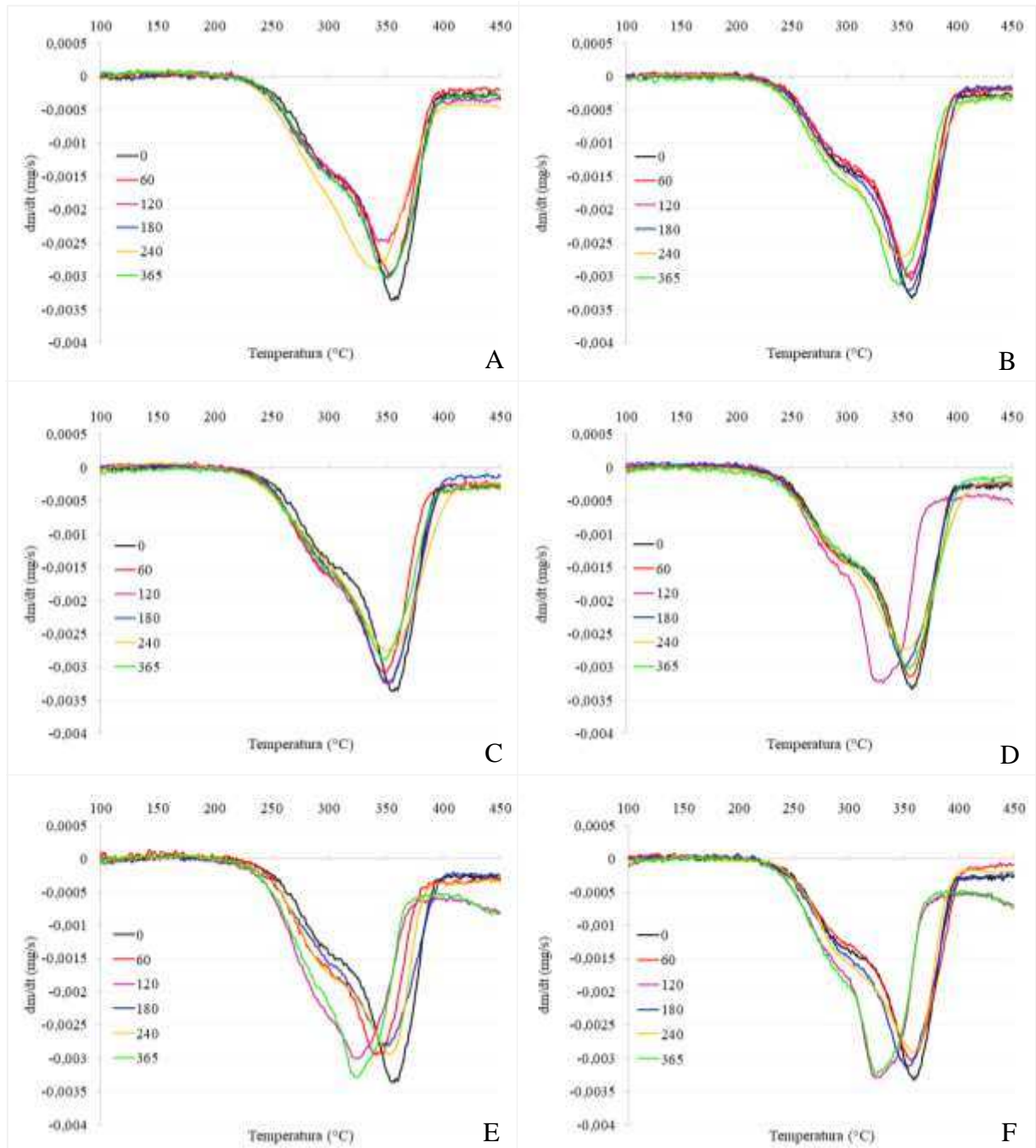
Ao término do período de estocagem, as madeiras que tiveram a maior média de massa residual foram as de menor diâmetro, posicionadas na região superior da pilha (25,5%), enquanto as de maior diâmetro localizadas na região inferior da pilha tiveram a menor média de massa residual (19%). De maneira geral, quanto mais estável e resistente termicamente é a madeira, melhor será o rendimento em carvão vegetal (SANTOS et al., 2012b; VIEIRA et al., 2019), portanto, levando em consideração as análises realizadas ao final dos 365 dias de estocagem, as mais indicadas para tal seriam as localizadas na região superior da pilha. Em contrapartida, as menos indicadas seriam as que ficaram em contato direto com o solo devido ao avançado estado de deterioração das madeiras nessa posição.

Tabela 6 – Perda de massa (%) por decomposição térmica de toretes de menor (CDI) e maior (CDII) classe diamétrica da madeira de eucalipto aos 0, 60, 120, 180, 240 e 365 dias de estocagem nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha de acordo com as faixas de temperatura

Posição dos toretes na pilha	Dias de estocagem	Perda de massa (%)														Massa residual (%)	
		100-150 (°C)		150-200 (°C)		200-250 (°C)		250-300 (°C)		300-350 (°C)		350-400 (°C)		400-450 (°C)		CDI	CDII
		CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII		
-	0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	12,5	13,5	30,2	28,6	29,7	30,7	4,7	4,7	21,9	21,4
Superior	60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	14,7	13,6	33,3	30,1	26,0	30,7	4,0	4,0	21,5	21,0
	120	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	12,7	13,4	30,2	29,6	19,6	31,2	5,8	3,2	31,7	22,0
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5	13,3	13,4	30,3	29,7	23,2	30,7	4,3	2,5	28,4	22,3
	240	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	14,0	14,4	31,0	30,7	28,0	25,2	4,0	5,0	22,0	22,8
	365	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	2,0	13,6	16,0	30,6	33,0	24,3	23,5	4,4	5,5	27,2	19,0
Intermediária	60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	15,9	14,1	34,9	29,2	22,2	29,7	4,8	3,6	21,7	22,4
	120	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	1,1	11,3	16,3	33,0	38,9	26,3	16,8	3,3	6,8	22,0	20,0
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	14,1	13,4	34,2	28,7	27,1	26,2	2,0	4,0	21,6	27,7
	240	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	13,8	14,1	30,5	30,3	27,1	28,3	4,4	4,0	23,2	21,2
	365	0,5	0,5	0,5	0,5	2,1	2,7	15,5	13,9	34,2	30,5	24,6	31,0	4,8	3,2	17,6	17,6
Inferior	60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	15,6	13,6	34,4	29,9	17,7	32,1	5,7	2,2	26,6	21,2
	120	0,5	0,0	0,0	0,0	2,5	2,0	22,0	17,9	37,5	39,8	14,5	15,3	10,5	9,2	12,5	15,8
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	1,0	14,7	14,0	33,2	31,0	24,7	28,0	3,7	4,0	21,6	22,0
	240	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,6	16,1	15,2	33,2	31,9	22,3	26,7	5,7	3,1	21,8	21,5
	365	0,0	0,5	0,0	0,0	2,0	2,1	19,9	19,3	39,8	41,2	13,4	15,5	10,0	9,1	14,9	12,3

Na Figura 18 são exibidas as curvas de DTG, que correspondem à derivada das curvas de TG e mostram a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura. Observa-se que os perfis de degradação térmica dos toretes de ambas as classes de diâmetro são, no geral, semelhantes, havendo apenas pequenas variações nas temperaturas correspondentes aos picos máximos de degradação das hemiceluloses e, principalmente, da celulose, ocorridos por conta das mudanças causadas na composição da biomassa no decorrer do período de estocagem.

Figura 18 – Curvas de DTG de toretes de eucalipto nos quais 18.A, 18.C e 18.E representam amostras de menor classe diamétrica localizadas nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha, respectivamente, e 18.B, 18.D e 18.F representam amostras de maior classe diamétrica nas mesmas regiões citadas.



Fonte: Autora.

O pico observado em temperaturas entre cerca de 220 e 310 °C corresponde à degradação das hemiceluloses, os polissacarídeos de menor estabilidade térmica em biomassas lignocelulósicas (CARNEIRO et al., 2013a; CANAL et al., 2016b). É possível notar a quase

inexistência na madeira de menor diâmetro localizada na região superior da pilha aos 240 dias de estocagem (Figura 18.A), indicativo de um considerável decréscimo no teor de hemiceluloses dessa biomassa durante o período de estocagem. O maior pico é atribuído à degradação da celulose, cuja faixa de temperatura normalmente se deu entre 340 a 375 °C, com exceção das madeiras de maior diâmetro armazenada durante 120 dias na posição intermediária da pilha (Figura 18.D) e de ambas classes de diâmetro armazenadas durante 120 e 365 dias em contato direto com o solo (Figuras 18.E e 18.F), nas quais o pico de degradação da celulose foi observado em temperaturas ligeiramente mais baixas, entre 310 e 330 °C, o que sugere redução no teor de celulose da madeira dessa região ou provável aumento nas suas regiões amorfas, causando uma menor resistência da celulose à degradação térmica (SILVA et al., 2019a), uma vez que suas regiões cristalinas e amorfas possuem temperaturas distintas de degradação (ZULKIFLI et al., 2015), sendo a região cristalina a mais resistente.

Quanto à composição química da madeira estocada, aos 0 dias de estocagem as de menor classe de diâmetro tiveram medianas de 89,6%, 10,6% e 0,5% para teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, respectivamente, enquanto as de maior classe diamétrica tiveram 86,5%, 13,2% e 0,3% (Tabela 7).

Tabela 7 – Composição química imediata de toretes de eucalipto em relação à classe diamétrica (CDI e CDII), posição na pilha (superior, intermediária e inferior) e dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365)

Posição dos toretes na pilha	Dias de estocagem	Materiais voláteis (%)		Carbono fixo (%)		Cinzas (%)	
		CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII
Superior	0	89,60 A	86,49 A	10,58 A	13,19 A	0,45 A	0,32 A
	60	86,01 A	86,20 A	13,50 A	13,46 A	0,49 A	0,34 A
	120	86,08 A	86,59 A	13,35 A	13,04 A	0,56 A	0,37 A
	180	86,27 A	86,36 A	13,35 A	13,46 A	0,39 A	0,18 A
	240	86,29 A	86,44 A	13,24 A	13,26 A	0,47 A	0,30 A
	365	86,77 A	84,80 A	12,95 A	14,82 A	0,28 A	0,38 A
Intermediária	0	89,60 A	86,49 A	10,58 A	13,19 A	0,45 A	0,32 A
	60	87,98 A	88,47 A	11,66 A	11,26 A	0,35 A	0,27 A
	120	86,64 A	86,54 A	12,93 A	13,20 A	0,43 A	0,26 A
	180	86,42 A	86,58 A	13,25 A	13,15 A	0,33 A	0,26 A
	240	86,74 A	85,59 A	12,91 A	14,10 A	0,35 A	0,31 A
	365	88,96 A	85,96 A	10,32 A	13,61 A	0,43 A	0,43 A
Inferior	0	89,60 A	86,49 A	10,58 A	13,19 A	0,45 B	0,32 A
	60	86,46 A	88,10 A	13,09 A	11,61 A	0,45 B	0,29 A
	120	84,82 A	86,36 A	14,37 A	13,30 A	0,82 A	0,33 A

180	86,81 A	87,07 A	12,53 A	12,50 A	0,66 AB	0,42 A
240	86,93 A	85,14 A	12,51 A	14,33 A	0,56 AB	0,53 A
365	87,37 A	88,39 A	12,01 A	11,23 A	0,61 AB	0,38 A

Onde: CDI e CDII representam as madeiras de menor e maior classe diamétrica, respectivamente. Medianas seguidas da mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

Não foi verificada diferença estatística significativa entre as classes diamétricas para nenhuma das variáveis avaliadas. Em relação aos dias de estocagem, houve diferença estatística significativa somente para o teor de cinzas entre as madeiras de menor classe diamétrica que ficaram em contato direto com o solo, as quais, aos 120 dias de estocagem, tiveram o maior teor de cinzas entre todas as coletas realizadas (0,82%). É esperado que o teor de cinzas varie em função da espécie utilizada bem como da posição na qual a amostra foi retirada da árvore (BRAND, 2013), porém atribui-se o alto valor encontrado a uma possível contaminação da madeira por meio da adição de partículas de solo durante sua remoção da pilha, bem como pode ter acontecido um carreamento de solo pelo vento e a ação das chuvas durante a estocagem (EUFRADE JUNIOR et al., 2018). Ainda, madeiras mais jovens, por terem maior quantidade de alburno, geram maior teor de cinzas, visto que as atividades metabólicas no alburno são maiores em relação ao cerne (PEREIRA et al., 2013c; COLDEBELLA et al., 2018).

O teor de cinzas está dentro dos padrões comuns a espécies de eucalipto, geralmente abaixo de 1% (CHAVES et al., 2013), fator positivo visto que um alto teor de cinzas pode implicar em danos nos equipamentos que utilizam a madeira como fonte de energia, além de requerer limpezas mais assíduas nestes sistemas (PEREIRA et al., 2013a) podendo também comprometer o poder calorífico do combustível por conta da elevada quantidade de minerais (DIAS JÚNIOR et al., 2018). Embora tenha sido verificada uma pequena variação entre os valores obtidos a cada coleta, os dados não apresentaram uma tendência clara de comportamento do teor de cinzas da madeira estocada.

Os valores encontrados para materiais voláteis e carbono fixo também estão dentro do preconizado em literatura para a biomassa de folhosas, de 75% a 85% para materiais voláteis e 15% a 25% para carbono fixo (BRITO, BARRICHELO, 1982; CHAVES et al., 2013). As médias para materiais voláteis foram superiores às relatadas por Juizo et al. (2017) (82,7%) e Nones et al. (2015) (82,1%), ambos ao caracterizar a madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal, e similares à citada por Ferreira (2015) verificando o potencial energético de clones de *Eucalyptus* em função da idade e material genético (86,1%); ao passo que as médias de carbono fixo foram inferiores às citadas por Eufrade Junior et al. (2018) avaliando a qualidade energética de toras de eucalipto após 100 dias em campo (15,6%). Mesmo não

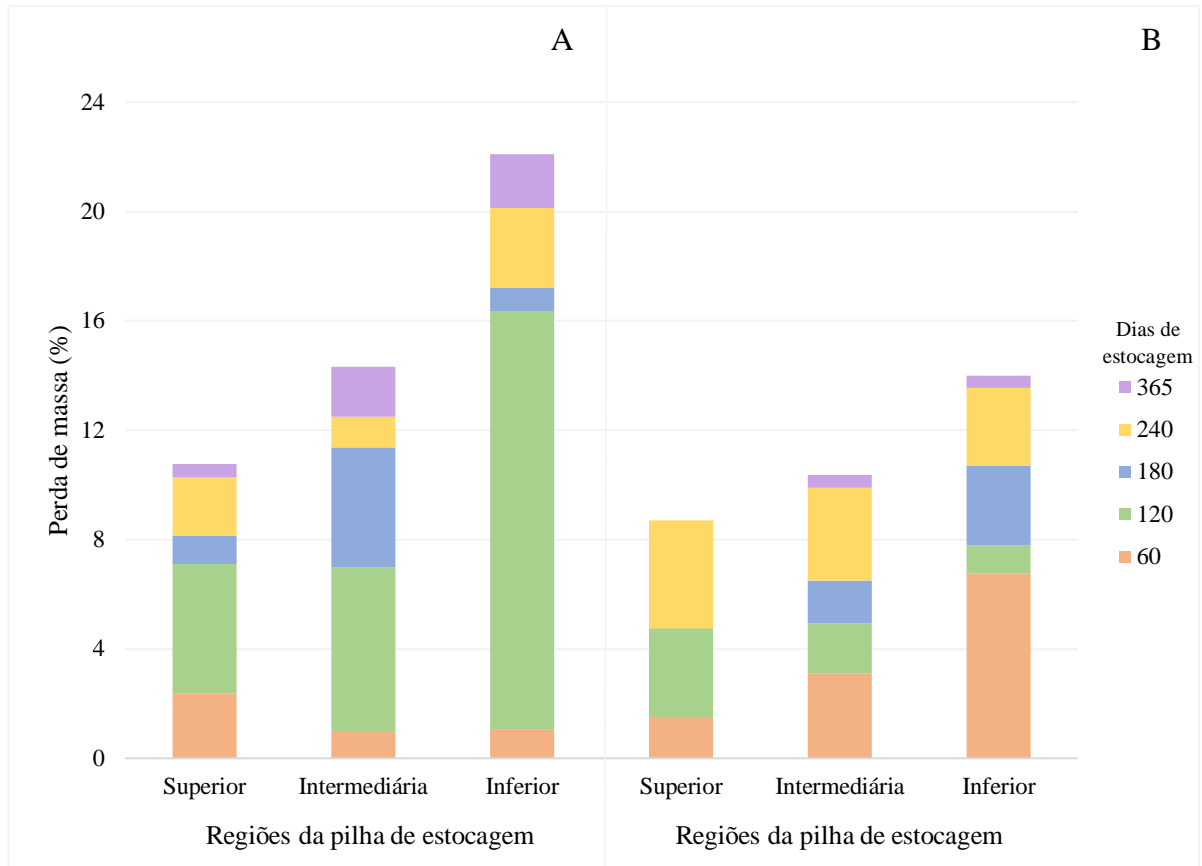
havendo diferença significativa, as madeiras de maior diâmetro tiveram maior teor de carbono fixo, o que se deve à sua maior quantidade de cerne, que é a região na qual se tem mais extrativos, que são geralmente de origem fenólica, além da deposição de outras substâncias no cerne como cálcio, potássio e magnésio (FONTE et al., 2017).

Em geral, ao término do período de estocagem, o teor de carbono fixo da madeira de ambas as classes diamétricas seguiu tendência de incremento, enquanto o teor de materiais voláteis, por consequência, demonstrou tendência de decréscimo, o que provavelmente ocorreu devido à degradação em maior parte dos carboidratos da madeira, restando maior quantidade de lignina, rica em carbono. A madeira pertencente à maior classe diamétrica que ficou em contato direto com o solo foi a única que teve o comportamento inverso, teve perda de 14,9% no carbono fixo (11,2%) e incremento de 2,2% nos materiais voláteis (88,4%) em relação ao valor registrado no início da estocagem. Eufraide Junior et al. (2018) relatam tendência similar à do presente trabalho ao avaliar a madeira de *Eucalyptus* após 100 dias de estocagem ao ar livre e relatam que isso ocorre devido a redução dos materiais voláteis da madeira devido à ação das intempéries climáticas, a exemplo do aumento de temperatura do ar. Além disso, os diferentes tipos de microrganismos que atacaram a madeira podem ter sido responsáveis por grande parte das mudanças na composição química da madeira, principalmente os fungos de podridão branca, visto que são um dos mais eficientes agentes degradadores da fibra vegetal e causam uma série de mudanças durante o processo de deterioração da madeira, a citar redução da massa lenhosa e resistência da madeira (NGUYEN et al., 2018).

5.5. Perda de massa lenhosa e densidade energética da madeira no sentido radial

Na Figura 19 está apresentada a perda de massa da madeira estocada ao ar livre durante 365 dias. Independente do diâmetro, as madeiras que ficaram expostas na região superior da pilha tiveram os menores percentuais de perda de massa (10,8% e 8,7% para as madeiras de menor e maior classe diamétrica, respectivamente), enquanto as que ficaram em contato direto com o solo foram as que tiveram as maiores perdas (22,1% e 14% para as de menor e maior classe de diâmetro, respectivamente).

Figura 19 – Perda de massa lenhosa (%) dos toretes de menor (19.A) e maior (19.B) classe diamétrica localizados nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha ao longo dos dias de estocagem (0, 60, 120, 180, 240 e 365).



Fonte: Autora.

De modo geral, a perda de massa em função do tempo de secagem foi menor para as madeiras de menor diâmetro, independente da posição na pilha de estocagem.

Aos 120 dias de armazenamento verifica-se a maior perda de massa das madeiras de menor diâmetro (4,7%, 6,0% e 15,3% nas regiões superior, intermediária e inferior, respectivamente), coincidindo com o período de maior perda de umidade dessa classe de diâmetro. As madeiras de maior diâmetro alocadas nas partes superior e intermediária da pilha de estocagem tiveram as maiores perdas aos 240 dias (3,9% e 3,4%, respectivamente), ao passo que na região inferior da pilha a perda de massa foi mais intensa logo aos 60 dias (6,8%). Não houve registros de perdas de massa nas madeiras de maior diâmetro da região superior da pilha aos 365 dias. Whittaker et al. (2016) relataram até 27% de perda de massa durante o período de estocagem.

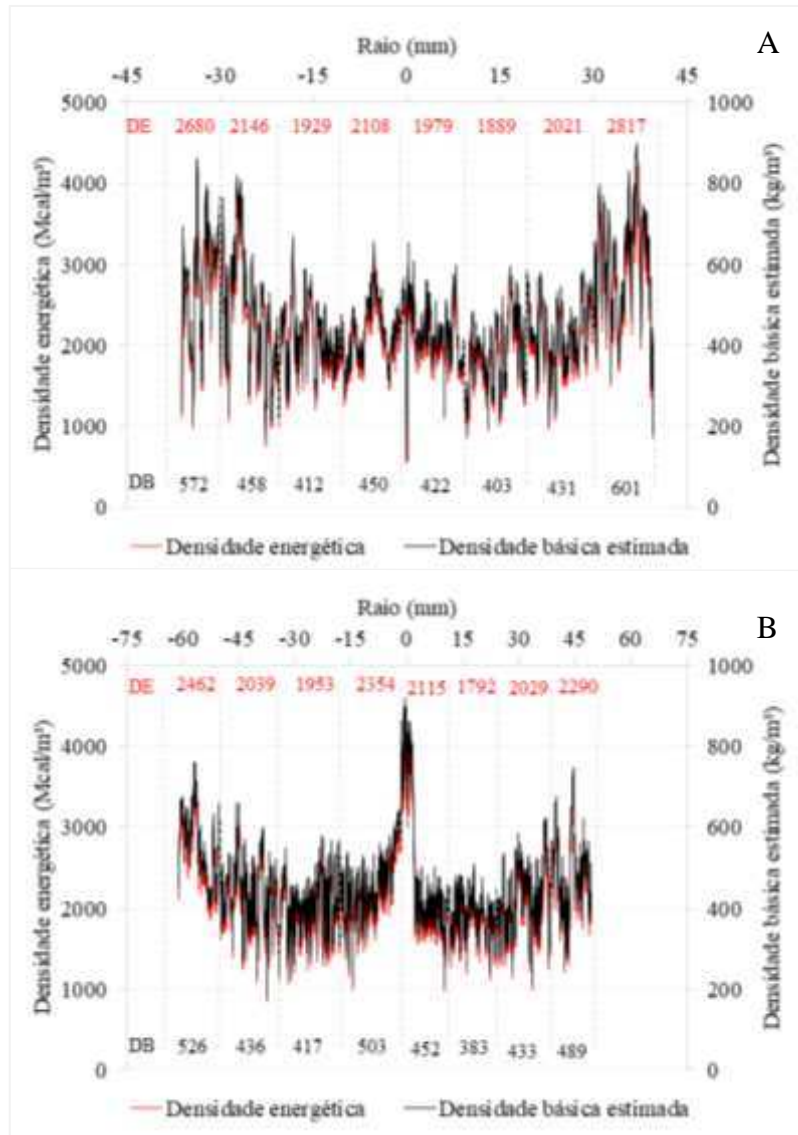
A perda de massa lenhosa da madeira estocada ocorreu como consequência da despolimerização da estrutura primária da parede celular (celulose, hemiceluloses e lignina), além das condições ambientais às quais a madeira estava exposta (KRIGSTIN, WETZEL, 2016). Essa despolimerização é decorrente da deterioração biológica verificada visualmente na

madeira durante o monitoramento do experimento em campo, visto que os fungos utilizam os compostos de carbono como nutrientes e os respiram na forma de CO₂, a exemplo dos pertencentes à classe Basidiomicetos, capazes de degradar de forma eficiente a biomassa vegetal (KYMÄLÄINEN et al., 2015). A perda de massa por fungos de podridão branca está associada à maior quantidade de enzimas oxidoreductase secretadas, em que as MnPs (peroxidases de manganês) e lacases podem degradar a lignina e compostos fenólicos (KONG et al., 2016). Além disso, podem, também, oxidar aminas aromáticas e outros compostos, usando o oxigênio do ar e liberando água como o único subproduto (ALCALDE, 2015).

Brand et al. (2014) verificaram variações significativas nas proporções de lignina, celulose e polioses para a madeira em tora de *E. dunni* estocada durante 16 meses, com maiores perdas de massa nos primeiros 180 dias de estocagem, tendo como consequência a redução da massa específica (densidade) básica, aumento da permeabilidade da madeira devido ao ataque de fungos e bactérias, aumento da higroscopicidade, maior variação do teor de umidade da madeira ao longo do tempo de estocagem, bem como a perda mais rápida dos extrativos.

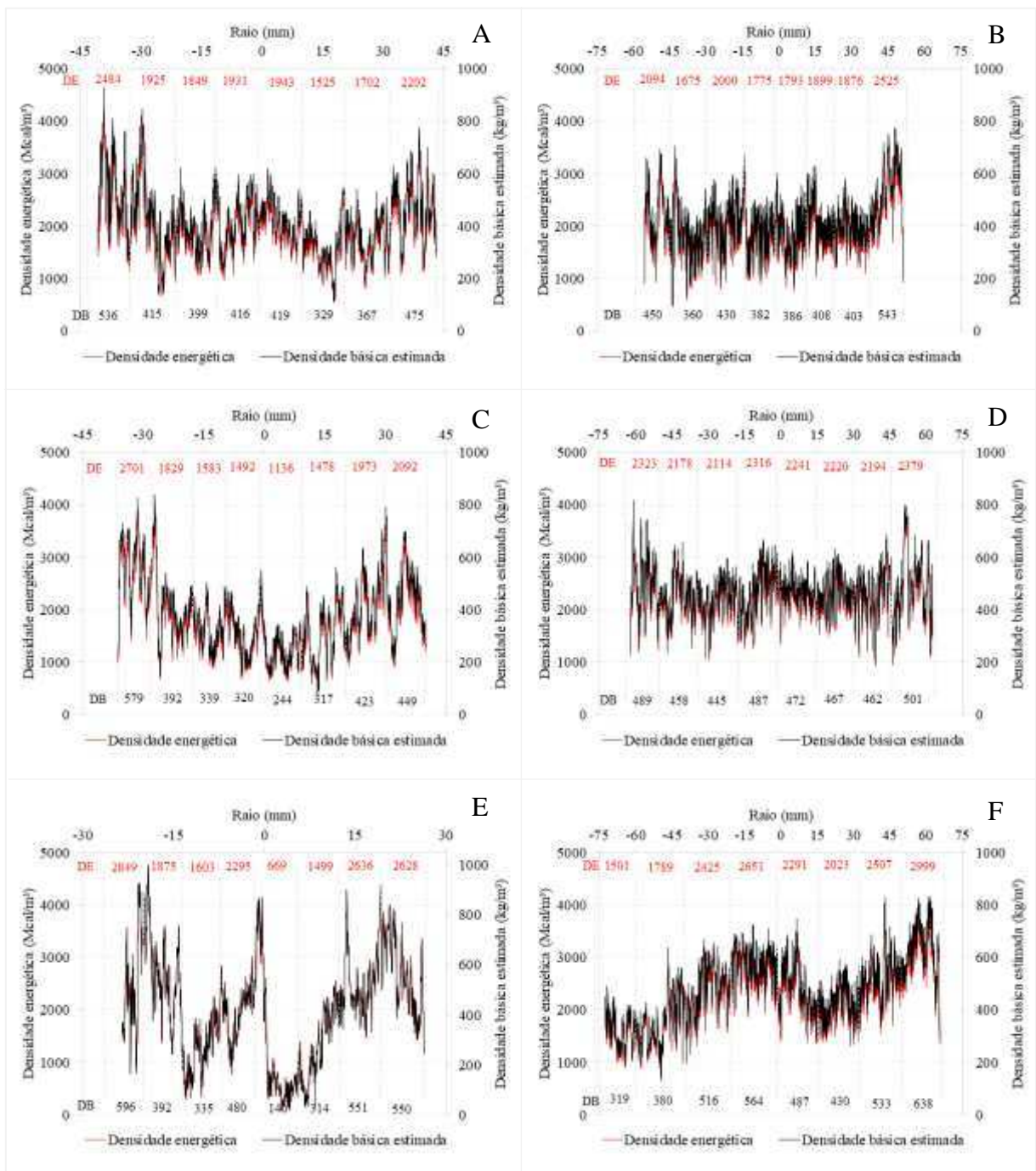
Nas Figuras 20 e 21 estão os perfis de densidade energética e densidade básica estimada das madeiras de menor (Figura 20.A) e maior (Figura 20.B) classe de diâmetro no início do período de estocagem (0 dias) e de ambas classes de diâmetro aos 365 dias de estocagem (Figura 21.A a 21.F).

Figura 20 – Perfil de densidade energética (Mcal/m^3) e densidade básica estimada (kg/m^3) das amostras de menor (20.A) e maior classe diamétrica (20.B) das madeiras testemunhas na umidade de 12% base seca. Valores escritos em vermelho e preto nas regiões superior e inferior dos gráficos representam, respectivamente, as médias de densidade energética e densidade básica estimada a cada 25% da amostra.



Fonte: Autora.

Figura 21 – Perfil de densidade energética (Mcal/m^3) e densidade básica estimada (kg/m^3) das amostras aos 365 dias de estocagem nos quais 21.A, 21.C e 21.E representam amostras de menor classe diamétrica nas regiões superior, intermediária e inferior, respectivamente, e 21.B, 21.D e 21.F representam amostras de maior classe diamétrica nas regiões superior, intermediária e inferior, respectivamente. Valores escritos em vermelho e preto nas regiões superior e inferior dos gráficos representam, respectivamente, as médias de densidade energética e densidade básica estimada a cada 25% do raio da amostra.



Fonte: Autora.

A densidade energética e densidade básica estimada tiveram perfis semelhantes, o que era esperado, já que quanto maior a densidade da madeira, maior a quantidade de energia estocada por unidade de volume, sendo, portanto, variáveis dependentes entre si (CARNEIRO et al., 2017; SILVA et al., 2018). É possível notar que densidade energética e densidade básica estimada seguem, em geral, tendência de decréscimo no sentido casca-medula, mesma tendência identificada no teor de umidade da madeira no sentido radial, comprovando que, como citado em literatura, o teor de umidade da madeira exerce influência sobre o conteúdo de energia disponível (KRIGSTIN, WETZEL, 2016).

Nas Tabelas 8 e 9 é possível acompanhar as perdas e incrementos de densidade energética das madeiras de menor e maior classe diamétrica, bem como perdas de umidade e densidade básica estimada ocorridas entre 0 e 365 dias de estocagem. As madeiras com maior perda de densidade energética foram as de menor diâmetro localizadas na região intermediária da pilha (18,7% em média), enquanto as de maior diâmetro localizadas nas regiões intermediária e inferior tiveram pequenos incrementos de densidade energética (7,9% e 9,2%, respectivamente).

Tabela 8 – Relação de perdas e incrementos de densidade energética (D.E.), teor de umidade e densidade básica estimada (D.B.E.) no sentido radial da madeira de menor classe de diâmetro localizada nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha entre 0 e 365 dias de estocagem

Parâmetro	Superior				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m ³)	2043 → 1937 (-5,2%)	1909 → 1687 (-11,7%)	2083 → 1814 (-13,0%)	2749 → 2343 (-14,8%)	2196 → 1945 (-11,2%)
Umidade (%)	155,5 → 16,1 (-89,6%)	140,8 → 16,0 (-88,6%)	129,3 → 16,2 (-87,5%)	109,7 → 15,1 (-86,2%)	133,8 → 15,9 (-88,1%)
D.B.E. (kg/m ³)	436 → 418 (-4,2%)	408 → 364 (-10,7%)	445 → 391 (-12,0%)	587 → 505 (-13,9%)	440 ¹ → 393 ¹ (-10,8%)
Parâmetro	Intermediária				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m ³)	2043 → 1314 (-35,7%)	1909 → 1530 (-19,9%)	2083 → 1901 (-8,8%)	2749 → 2396 (-12,8%)	2196 → 1785 (-18,7%)
Umidade (%)	155,5 → 21,1 (-86,5%)	140,8 → 20,3 (-85,6%)	129,3 → 22,2 (-82,9%)	109,7 → 20,3 (-81,5%)	133,8 → 21,0 (-84,3%)
D.B.E. (kg/m ³)	436 → 282 (-35,4%)	408 → 328 (-19,5%)	445 → 408 (-8,3%)	587 → 514 (-12,4%)	440 ¹ → 377 ¹ (-14,3%)
Parâmetro	Inferior				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m ³)	2043 → 1482 (-27,5%)	1909 → 1551 (-18,8%)	2083 → 2256 (-8,3%)	2749 → 2738 (-0,4%)	2196 → 2007 (-8,6%)

Umidade (%)	155,5 → 21,9 (-85,9%)	140,8 → 24,3 (-82,7%)	129,3 → 23,2 (-82,1%)	109,7 → 24,5 (-77,6%)	133,8 → 23,5 (-82,4%)
D.B.E. (kg/m³)	436 → 310 (-28,9%)	408 → 325 (-20,4%)	445 → 413 (-7,2%)	587 → 573 (-2,3%)	440 ¹ → 343 ¹ (-22,1%)

Onde: valores antes e após a seta representam os resultados obtidos aos 0 e 365 dias, respectivamente. Valores entre parêntesis representam se houveram perdas (-) ou ganhos (+) entre as coletas; seguidos de ¹ representam as médias de densidade básica da madeira obtidas por meio da normativa NBR 7190.

Tabela 9 – Relação de perdas e incrementos de densidade energética (D.E.), teor de umidade e densidade básica estimada (D.B.E.) no sentido radial da madeira de maior classe de diâmetro localizada nas regiões superior, intermediária e inferior da pilha entre 0 e 365 dias de estocagem

Parâmetro	Superior				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m³)	2043 → 1784 (-12,7%)	1873 → 1949 (-4,1%)	2034 → 1775 (-12,7%)	2376 → 2309 (-2,8%)	2081 → 1955 (-6,0%)
Umidade (%)	130,7 → 20,3 (-84,4%)	136,9 → 19,4 (-85,9%)	126,9 → 19,4 (-85,9%)	102,8 → 16,1 (-84,4%)	124,3 → 18,8 (-84,9%)
D.B.E. (kg/m³)	477 → 384 (-19,6%)	400 → 394 (-1,6%)	435 → 382 (-12,1%)	508 → 497 (-2,2%)	453 ¹ → 417 ¹ (-7,9%)
Parâmetro	Intermediária				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m³)	2043 → 2278 (+11,5%)	1873 → 2167 (+15,7%)	2034 → 2186 (+7,5%)	2376 → 2351 (-1,1%)	2081 → 2246 (+7,9%)
Umidade (%)	130,7 → 68,3 (-47,7%)	136,9 → 52,7 (-61,5%)	126,9 → 28,8 (-77,3%)	102,8 → 18,1 (-82,4%)	124,3 → 42,0 (-66,2%)
D.B.E. (kg/m³)	477 → 430 (-9,8%)	400 → 392 (-2,0%)	435 → 406 (-6,5%)	508 → 495 (-2,5%)	453 ¹ → 406 ¹ (-10,4%)
Parâmetro	Inferior				
	0-25 (%)	25-50 (%)	50-75 (%)	75-100 (%)	Média
D.E. (Mcal/m³)	2043 → 2471 (+20,9%)	1873 → 2224 (+18,8%)	2034 → 2148 (+5,6%)	2376 → 2250 (-5,3%)	2081 → 2273 (+9,2%)
Umidade (%)	130,7 → 56,1 (-57,0%)	136,9 → 54,8 (-60,0%)	126,9 → 49,5 (-61,0%)	102,8 → 30,7 (-70,1%)	124,3 → 47,8 (-61,5%)
D.B.E. (kg/m³)	477 → 433 (-9,4%)	400 → 389 (-2,7%)	435 → 404 (-7,0%)	508 → 478 (-5,8%)	453 ¹ → 390 ¹ (-14,0%)

Onde: valores antes e após a seta representam os resultados obtidos aos 0 e 365 dias, respectivamente. Valores entre parêntesis representam se houveram perdas (-) ou ganhos (+) entre as coletas; seguidos de ¹ representam as médias de densidade básica da madeira obtidas por meio da normativa NBR 7190.

As médias de densidade energética das madeiras de menor e maior diâmetro no início da estocagem foram de 2196 Mcal/m³ e 2081 Mcal/m³, respectivamente. Ao final, quando a biomassa estava mais seca, houve ligeira perda de densidade energética nas madeiras de menor diâmetro alocadas nas três regiões da pilha (1945 Mcal/m³, 1785 Mcal/m³ e 2007 Mcal/m³ nas regiões superior, intermediária e inferior), bem como as de maior diâmetro da região superior (1955 Mcal/m³). Em contrapartida, verificou-se incremento na densidade energética das madeiras de maior diâmetro das regiões intermediária (2246 Mcal/m³) e inferior (2273

Mcal/m³). Os valores encontrados neste estudo foram semelhantes aos valores relatados por Silva et al. (2015) e Lima et al. (2011) para madeiras de *Eucalyptus* (2207 Mcal/m³ e 2222 Mcal/m³).

A densidade energética está diretamente relacionada com a quantidade de energia contida em determinado volume de madeira e é muito influenciada pelo seu teor de umidade. Quando considerado o uso energético de combustíveis oriundos de biomassa, a densidade pode então ser considerada o principal índice de qualidade da madeira, uma vez que influencia diretamente a densidade energética (PROTÁSIO et al., 2015), logo, biomassas com maior quantidade de energia por unidade de volume viabilizam a redução de custos com transporte (STELTE et al., 2011).

6. CONCLUSÕES

A pilha de madeira estocada contou com anomalias externas desde os 60 dias de estocagem, havendo grande incidência de organismos xilófagos.

A perda de umidade ocorreu em diferentes intensidades ao longo do tempo e da posição da madeira na pilha de estocagem em função da classe de diâmetro dos toretes, nos quais os de menor diâmetro alcançaram mais rápido a USF (240 dias) do que os maiores (365 dias). De modo geral, os toretes da região superior da pilha secaram mais rápido, atingindo teor de umidade abaixo da USF aos 365 dias de estocagem, enquanto os da região inferior ainda estavam com umidade acima da USF.

Os toretes de ambas as classes diamétricas tiveram maiores taxas de perda de água no decorrer dos primeiros 120 dias de estocagem, quando houve redução e estabilização nas taxas de secagem até o final dos 365 dias.

O período de estocagem causou redução significativa nas densidades básica e aparente da madeira. Houve correlação positiva entre as médias de densidade da madeira, apontando alto grau de associação entre as variáveis e a confiabilidade da metodologia de densitometria por raios X para a determinação da densidade da madeira.

O uso da escala *rainbow* facilitou tanto a visualização quanto a interpretação da variação da densidade aparente da madeira por conta da maior variabilidade de cores e pela disposição de linhas diretamente relacionadas com a variação da densidade da madeira em escala 3D.

A madeira teve perfis de degradação térmica semelhantes, com pequenas variações nas temperaturas correspondentes aos picos de degradação das hemiceluloses e celulose.

Não houve alteração significativa na maior parte da composição química imediata da madeira no decorrer do tempo de estocagem, exceto para o teor de cinzas da madeira localizada na região inferior da pilha aos 120 dias.

Ao término do período de estocagem, independente da classe de diâmetro, as madeiras localizadas na região superior da pilha tiveram os menores percentuais de perda de massa, enquanto as que ficaram em contato direto com o solo tiveram as maiores perdas.

Foram identificados perfis semelhantes para densidade energética e densidade básica estimada, contendo tendência de decréscimo no sentido casca-medula. Houve redução na densidade energética das madeiras de menor diâmetro das três regiões amostradas na pilha, bem como nas de maior diâmetro da região superior, além de ligeiro incremento nas madeiras de maior diâmetro das regiões intermediária e inferior.

7. RECOMENDAÇÕES

- Separar a madeira por classe de diâmetro, além de empilhá-las sem casca para que a secagem seja mais rápida e eficaz, visto que a presença da casca atua como barreira para a saída de água, além de servir como abrigo para insetos xilófagos.
- Ao escolher o terreno para o instalar o pátio de estocagem, preferir locais bem ventilados, com máxima incidência solar e levemente inclinados (5 °).
- Utilizar substratos como cascalho ou brita, para facilitar a drenagem da água, além de realizar manutenções periódicas para impedir a propagação de insetos e proliferação de fungos, bem como ser manter limpo, livre de serragem ou plantas daninhas, cavacos ou outros pedaços de madeira.
- Evitar que a madeira estocada fique em contato direto com o solo. Usar suportes para apoiá-la, preferencialmente que estes sejam de concreto ou de madeira tratada com solução preservativa adequada, para que sejam resistentes à umidade, garantindo a sanidade e durabilidade. A distância entre o chão e a madeira deve ser de, pelo menos, 20-30cm para que garanta um fluxo de ar adequado.
- Tratamento do solo com fungicida ou corretivo do solo (calcário) para que evite a proliferação de fungos/térmitas nos toretes que, porventura, necessitem ficar em contato direto com o solo.
- Uma boa gestão para diminuir o tempo entre a colheita, tempo de secagem e o uso da madeira.

8. REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, C. P.; ROCHA, L. C. S.; PAULA, H.; TRINDADE, E. G. B.; ANDRADE, H. B.; SANTANA, R. C. Efeito do diâmetro e do comprimento das toras na secagem de lenha de um clone de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 85-93, mar. 2016.
- ALCALDE, M. Engineering the ligninolytic enzyme consortium. **Trends in Biotechnology**, Cambridge, v. 33, n. 3, p. 155-162, mar. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 1762-84**: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. West Conshohocken: ASTM, 2007.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; LIMA, J. T.; VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios X na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 155-162, jan./fev. 2016.
- ARIZAPANA-ALMONACID, M. A. **Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla*, de 8 anos, de teste de progênies, visando a produção de carvão vegetal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.
- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, jul./ago. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941**: Madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14660**: Madeira – amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16143**: Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berna, v. 61, p. 221-226, 2003.
- BARONTINI, M.; SCARFONE, A.; SPINELLI, R.; GALLUCCI, F., SANTANGELO, E.; ACAMPORA, A.; JIRJIS, R.; CIVITARESE, V.; PARI, L. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 62, p. 17-25, mar. 2014.

- BORGES, A. C. P.; SILVA, M. S.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **Revista Rede**, Fortaleza, v. 10, n. 2, p. 23-36, jul./dez. 2016.
- BRAND, M. A. Influência da espécie na qualidade da biomassa florestal sob estocagem, para geração de energia. **Ambiência**, Guarapuava, v. 9, n. 3, p. 461-474, set./dez. 2013.
- BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.
- BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 2, p. 132-140, abr./jun. 2017.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita e da estocagem na composição química da biomassa floresta. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 1, p. 66-78, jan./mar. 2012.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 175-183, jan./fev. 2014.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Influence of storage time on the quality of biomass for energy production in humid subtropical regions. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 531-537, oct./dec. 2010.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, jul. 2011.
- BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. T.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 117-123, jan./mar. 2015.
- BRAZOLIN, S.; TOMAZELLO FILHO, M.; YOJO, T.; OLIVEIRA NETO, M. A.; ALBUQUERQUE, A. R.; SETTE JÚNIOR, C. R. Propriedades físico-mecânicas do lenho deteriorado por fungos apodrecedores de árvores de *Tipuana tipu*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 183-190, abr./jun. 2014.
- BRISCHKE, C.; ALFREDSSEN, G. Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Frankfurt, p. 1-15, mar. 2020.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo, **Anais...** São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982, p.101-137.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretrificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, abr./jun. 2006.

CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Natural weathering performance of three fast-growing eucalypt woods. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 17, n. 4, p. 799-808, oct. 2015.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; DONATO, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 831-840, dez. 2016a.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; MAGALHÃES, M. A.; CÂNDIDO, W. L.; FIALHO, L. F. Comportamento térmico e emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 261-267, jul./set. 2016b.

CAJAIBA, R. L.; SILVA, W. B.; PÉRICO, E. Diversidade de Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) em diferentes paisagens no norte do Brasil. **Neotropical Biology and Conservation**, São Leopoldo, v. 13, n. 1, p. 10-16, jan./mar. 2018.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 375-381, mar./abr. 2014.

CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CASTRO, A. F. N. M.; PIMENTA, A. S.; PINTO, E. M.; ALVES, I. C. N. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do Seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, dez. 2013a.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 8, n. 3, p. 127-135, ago. 2017.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para a produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: Super Gráfica e Editora Ltda, 2013b. p. 355-378.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 473-480, out./dez. 2016.

CARVALHO, D. E.; BROCHINI, G. G.; ROCHA, M. P.; LOIOLA, P. L.; DIAS, P. C.; GUIMARÃES, P. P.; CASTRO, V. G. Agentes com capacidade limitada de degradação da

- lignina. In: CASTRO, V. G.; GUIMARÃES, P. P. **Deterioração e preservação da madeira**. Mossoró: Editora Universitária, 2018. p. 41-54.
- CARVALHO, D. E.; JUIZO, C. G. F.; FRANÇA, M. C.; LOIOLA, P. L.; ROCHA, M. P. Effect of thermal modification in the natural resistance of *Eucalyptus grandis* and *Pinus taeda* woods. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 14, n. 1, e5606, sep. 2019.
- CASTRO, V. G.; GUIMARÃES, P. P. Agentes deterioradores abióticos. In: CASTRO, V. G.; GUIMARÃES, P. P. **Deterioração e Preservação da Madeira**. Mossoró: Editora Universitária, 2018. p. 7-20.
- CASTRO, V. R.; CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMMASIELLO FILHO, M.; SURDI, P. G.; ZANUNCIO, J. C.; ZANUNCIO, A. J. V. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, London, v. 10, 2530, feb. 2020.
- CASTRO, V. R.; SURDI, P. G.; SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAIX, G.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 1017-1027, jul./set. 2017.
- CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.
- COLDEBELLA, R.; GIESBRECHT, B. M.; SACCOL, A. F. O.; GENTIL, M.; PEDRAZZI, C. Propriedades físicas e químicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don ex Steud. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 9, n. 1, p. 54-61, 2018.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). Deliberação Normativa n° 227, de 29 de agosto de 2018. **Diário Oficial do Estado de Minas Gerais**: Belo Horizonte, 31 ago. 2018.
- CORASSA, J. N.; PIRES, E. M.; ANDRADE NETO, V. R.; TARIGA, T. C. Térmitas associados à degradação de cinco espécies florestais em campo de apodrecimento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 1, p. 78-84, jan./mar. 2014.
- COSTA, A. L. S.; CABRAL, C. P. T. Madeiras nativas atacadas por agentes xilófagos durante o processo de secagem no Estado do Amapá. In: OLIVEIRA, R. J. **Engenharia florestal: desafios, limites e potencialidade**. Guarujá: Editora Científica Digital, 2020. p. 594-603.
- COSTA, L. G.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; BROCCO, V. F.; FURTADO, E. L. Potential of selected fungi for biological stump removal of *Eucalyptus* spp. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 402, p. 265-271, oct. 2017.
- COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari obongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 133-139, jan./mar. 2011.

DELUCIS, R. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A. Decay resistance of four fast-growing *Eucalyptus* wood exposed to three types of fields. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 18, n. 1, p. 33-42, jan. 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 14918**: Determination of calorific value. Belim: CEN, 2010.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, M. P.; DAMBROZ, G. B. V. Thermal profile of wood species from the Brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. **Cerne**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 44-53, mar. 2019.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F. Pyrolysis and wood by-products of specimens from the Brazilian semi-arid region. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 117, p. 65-75, mar. 2018.

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; CÂNDIDO, W. L.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S. Secagem e perfil de umidade da tora em função do diâmetro e comprimento. **Agroforestalis News**, São Cristóvão, v. 3, n. 1, p. 1-8, 2018.

EQUIPE ESTATCAMP. **Software Action**. ESTATCAMP – Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos – SP, Brasil, 2014.

ERBER, G.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v. 31, n. 3, p. 294-301, aug. 2015.

ERBER, G.; KÜHMAIER, M. Research trends in European forest fuel supply chains: a review of the last ten years (2007-2017) – part one: harvesting and storage. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zagreb, v. 38, p. 269-278, sep. 2017.

ERBER, G.; ROUTA, J.; KOLSTRÖM, M.; KANZIAN, C.; SIKANEN, L.; STAMPFER, K. Comparing two different approaches in modeling small diameter energy wood drying in logwood piles. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zagreb, v. 35, p. 15-22, mar. 2014.

EUFRADE JUNIOR, H. J.; COSTA, A. C. L. A.; LEONELLO, E. C.; ARRUDA, N. L. F. V.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Qualidade energética de toras de *Eucalyptus* após 100 dias de estocagem no campo. In: XVI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2018, **Anais...** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2018, p. 1-11.

EUFRADE JUNIOR, H. J.; OGURI, G.; MELO, R. X.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P. S. Storage of whole-tree chips from high-density energy plantations of *Eucalyptus* in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 93, p. 279-283, 2016.

EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D.; LOBO, L. M.; SOUZA, M. O. A. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no sentido radial e longitudinal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 1-19, nov. 2010.

- FACKLER, K.; STEVANIC, J. S.; TERS, T.; HINTERSTOISSER, B.; SCHWANNINGER, M.; SALMÉN, L. Localisation and characterisation of incipient brown-rot decay within spruce wood cell walls using FT-IR imaging microscopy. **Enzyme and Microbial Technology**, Amsterdam, v. 47, n. 6, p. 257-267, nov. 2010.
- FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; PAULA, T. R.; COUTINHO, R. P.; SILVA, R. L. Crescimento e produção de eucalipto na região do Médio Paraíba do Sul, RJ. **Floresta & Ambiente**, Seropédica, n. 24, p. 1-9, 2017.
- FERREIRA, M. C. **Propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e projeção de biomassa e energia em plantios de curta rotação localizados no município de Macaíba-RN**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, RN, 2015.
- FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 14, n. 3, p. e6363, 2019.
- FILBAKK, T.; HØIBØ, O.; NURMI, J. Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use. **Biomass & Bioenergy**, London, n. 35, p. 454-463, 2011.
- FOELKEL, C. Secagem na Floresta e ao ar livre de toras e biomassa de eucalipto. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, n. 51, p. 1-22, jul. 2016.
- FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANJOS, R. A. M. Propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 3, p. 277-285, 2017.
- FREDRIKSSON, M. On wood-water interactions in the over-hygroscopic moisture range – mechanisms, methods, and influence of wood modification. **Forests**, Berna, v. 10, n. 9, p. 779, sep. 2019.
- FREITAS, F. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; GOUVÊA, A. F. G.; CARVALHO, A. G.; PEREIRA, M. P. C. F. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando o aproveitamento para fins energéticos. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 29-35, abr. 2017.
- GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. **Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices**. London: Department of Trade and Industry, 2002.
- GEORGE, B.; SUTTIE, E.; MERLIN, A.; DEGLSIE, X. Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art. **Polymer Degradation and Stability**, Amsterdam, v. 88, p. 268-274, may 2005.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. *In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook – wood as an engineering material*. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 80-100.

GONÇALVES, A. F.; CAVALCANTE, E. M. D.; PIMENTA, L. R.; MATTIAZZO, F. B.; SEGURA, T. E. S. A gestão sistêmica do transporte e estocagem da madeira como fator diferencial na produtividade e qualidade da celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 77, n. 10, p. 72-82, out. 2016.

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

GUTIERREZ, P. T. V.; ROBINSON, S. Understanding the demographics of U.S. woodturners and their knowledge of spalted wood. **International Wood Products Journal**, London, v. 10, n. 2, p. 39-48, jun. 2019.

HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: North Carolina Agriculture Extension Service, 1966.

HATAKKA, A.; HAMMEL, K. E. Fungal biodegradation of lignocelluloses. *In: ESSER, K.; HOFRICHTER, M. The mycota: a comprehensive treatise on fungi as experimental systems for basic and applied research*. Heidelberg: Springer, 2010. p. 319-340.

HERVÉ, V.; MOTHE, F.; FREYBURGUER, C.; GELHAYE, E.; FREY-KLETT, P. Density mapping of decaying wood using X-ray computed tomography. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Amsterdam, v. 86, p. 358-363, jan. 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2020**. [Brasília, DF], 2020. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 09 out. 2020.

JANKOWSKY, I. P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada**. ESALQ/USP. Circular técnica do IPEF, n.191, 2000.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **XV Jornadas Forestales de Entre Rios**, Concordia, out. 2000.

JANKOWSKY, I. P. Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de *Pinus*. **IPEF**, Piracicaba, n. 31, p. 41-46, dez. 1985.

JANOSELLI, H. R. D.; HARBS, R.; MENDES, F. L. Viabilidade econômica da produção de eucalipto no interior de São Paulo. **Revista iPecege**, Piracicaba, n. 2, v. 2, p. 25-45, abr./jun. 2016.

JESUS, A. G.; MODES, K. S.; SANTOS, L. M. H.; BENTO, A. R.; GUSMÃO, M. Comportamento das madeiras de três espécies amazônicas submetidas à secagem ao ar. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 1, p. 31-35, jan./fev. 2016.

JIRJIS, S. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 28, n. 2, p. 193-201, feb. 2005.

JIRJIS, R. Storage and drying of wood fuel. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 9, n.1-5, p. 181-190, 1995.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 12, n. 3, p. 386-390, set. 2017.

KANTVILAS, G. A synopsis and key for the lichen genus *Caloplaca* (Teloschistaceae) on Kangaroo Island, with the description of two new species. **Journal of the Adelaide Botanic Garden**, Adelaide, v. 29, p. 53-69, 2016.

KARUNASEKERA, H.; TERZIEV, N.; DANIEL, G. Does copper tolerance provide a competitive advantage for degrading copper treated wood by soft rot fungi? **International Biodeterioration & Biodegradation**, Amsterdam, v. 117, p. 105-114, feb. 2017.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Curitiba: UFPR, 2003.

KOFMAN, P. D.; KENT, T. **Long term storage and seasoning of conifer energy wood**. Coford Connects Harvesting/Transportation, n. 20, 4p., 2009.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood sciences and technology**. Berlim: Springer Verlag, 1968.

KONG, W., CHEN, H., LYU, S., MA, F., YU, H., ZHANG, X. Characterization of a novel manganese peroxidase from white-rot fungus *Echinodontium taxodii* 2538, and its use for the degradation of lignin-related compounds. **Process Biochemistry**, London, v. 51, n. 11, p. 1776-1783, nov. 2016.

KRIGSTIN, S.; WETZEL, S. A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. **Fuel**, London, v. 175, p. 75-86, jul. 2016.

KYMÄLÄINEN, M.; MÄKELÄ, M. R.; HILDÉN, K.; KUKKONEN, J. Fungal colonisation and moisture uptake of torrefied wood, charcoal, and thermally treated pellets during storage. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berna, v. 73, p. 709-717, jul. 2015.

LENZ, H.; IDLER, C.; HARTUNG, E.; PECENKA, R. Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 83, p. 269-277, dec. 2015.

LENZ, H.; PECENKA, R.; IDLER, C.; DUMFORT, S.; WHITTAKER, C.; AMMON, C.; HARTUNG, E. Continuous weighing of a pile of poplar wood chips – a comparison of methods to determine the dry matter losses during storage. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 96, p. 119-129, jan. 2017.

LIEBL, O. A.; LOIOLA, P. L.; ZEN, L. R.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Influência dos parâmetros dimensionais da pilha na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. submetida à secagem ao ar. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.

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

LOGSDON, N. B. Estabilidade dimensional: estimativas a partir da densidade básica. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 4, n. 10, p. 1-23, jan./abr. 2003.

LOPES, D. J. V.; PAES, J. B.; JANKOWSKY, I. P.; VIDAURRE, G. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Resistência biológica da madeira de eucalipto tratada com CCA-C a cupins subterrâneos em laboratório. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 467-479, set. 2017.

MAFIA, R. G.; SANOTS, P. C.; DEMUNER, B. J.; MASSOQUETE, A.; SARTÓRIO, R. C. Eucalyptus wood decay: effects on productivity and quality of cellulose. **Forest Pathology**, v. 42, n. 4, p. 321-329, jan. 2012.

MARTINS, S. M. A.; MARCELLI, M. P. Specific distributions of lichens on *Dodonaea viscosa* L. in the restinga area of Itapuã State Park in Southern Brazil. **Hoehnea**, São Paulo, v. 38, n. 3, p. 397-411, sep. 2011.

MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B.; GOUVEIA, F. N. Programa de secagem para a madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1469-1477, jul./set. 2019.

MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A. Colour changes of Brazilian eucalypts wood by natural weathering. **International Wood Products Journal**, v. 5, n. 1, p. 33-38, dec. 2013.

MELO, R. R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 2, p. 152-175, nov. 2013.

MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia***. 2014. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; ANDRADE, H. B. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 493-505, set. 2017.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. **Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha**. EMBRAPA. Comunicado Técnico 293, jul. 2012.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira**. 4 ed. Curitiba: UFPR, 2013.

MORESCHI, J. C. **Relação água-madeira e sua secagem**. 2 ed. Curitiba: UFPR, 2014.

MUNHOZ, J. S. B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011.

Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP. 2011.

MUÑIZ, G. I. B. Fatores que limitam a utilização da madeira de *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO SÓLIDOS DE EUCALIPTO: AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS, 2002, Lavras, **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, 2002, p. 30-63.

MÜZEL, S. D.; OLIVEIRA, K. A.; HANSTED, F. A. S.; PRATES, G. A.; GOVEIA, D. Poder calorífico da madeira de *Eucalyptus grandis* e da *Hevea brasiliensis*. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 8, n. 2, p. 166-172, jan. 2014.

NASCIMENTO, T. M.; MONTEIRO, T. C.; BARAÚNA, E. E. P.; MOULIN, J. C.; AZEVEDO, A. M. Drying influence of the development of cracks in *Eucalyptus* logs. **BioResources**, Raleigh, v. 14, n. 1, p. 220-233, nov. 2019.

NGUYEN, T. D.; NISHIMURA, H.; IMAI, T.; WATANABE, T.; KOHDZUMA, Y.; SUGIYAMA, J. Natural durability of the culturally and historically important timber: *Erythrophleum fordii* wood against white-rot fungi. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 64, p. 301-310, feb. 2018.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 57-67, jan./mar. 2015.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix* crops. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 8, n. 4, p. 245-249, 1995.

NURMI, J. The storage of logging residue for fuel. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 17, p. 41-47, 1999.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A. Eucalyptus logs drying at high temperatures. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 2, p. 1-9, jun. 2017.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, jan./fev. 2005a.

OLIVEIRA, J. T. S.; SOUZA, L. C.; LUCIA, R. M. D.; SOUZA JÚNIOR, W. P. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 819-826, set./out. 2005b.

PALA, H. Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira. **Construção Magazine**, Porto, n. 20, p. 54-62, 2007.

PASCHOLATI, S. F.; MARASSATTO, C. M.; STANGARLIN, J. R.; BRAND, S. C.
Produção de Shiitake em toras de eucalipto. Piracicaba: Casa do Produtor Rural, 2014.

PASSOS, E. M.; ALBUQUERQUE, A. C.; MARQUES, E. J.; TEIXEIRA, V. W.; SILVA, C. C. M.; OLIVEIRA, M. A. P. Efeitos isolados do fungo *Isaria* (Persoon) sobre o cupim subterrâneo *Coptotermes gestoi* (Wasmann) (Isoptera: Rhinotermitidae). **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 81, n. 3, p. 232-237, jul./set. 2014.

PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C. Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 116, p. 140-150, sep. 2018.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013a.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 567-576, mai./jun. 2013b.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, jun. 2013c.

PERTUZZATTI, A.; TREVISAN, R.; FIORESI, T.; RABUSKE, J. E.; TRAUTENMÜLLER, V.; MOTTA, C. I.; CARELLI NETTO, C. 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, nov. 2013.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira.** Brasília: STI/IPT, 1985.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F.; MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Caracterização energética de *pellets in natura* e torrificados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, out./dez. 2015.

REDMAN, A. L.; BAILLERES, H.; TURNER, I.; PERRÉ, P. Characterization of wood-water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 50, n. 4, p. 739-757, mar. 2016.

RESENDE, R. T.; CARNEIRO, A. C. O.; FERREIRA, R. A. D. C.; KUKI, K. N.; TEIXEIRA, R. U.; ZAIDAN, U. R.; SANTOS, R. D.; LEITE, H. G.; RESENDE, M. D. V. Air-drying of eucalypts logs: genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 124, p. 316-324, nov. 2018.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 41-47, jul. 2010a.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; SILVA, J. R. M. Efeito da vaporização na secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1, p. 37-43, jan./mar. 2015.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ANDRADE, H. B.; FARIA, A. L. R. Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 565-572, oct./dec. 2010b.

ROBINSON, S. C. The fine art of decay. **American Scientist**, Durham, v. 102, p. 206-213, may/jun. 2014.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* wood. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 446-452, 2009.

RÖSER, D.; MOLA-YUDEGO, B.; SIKANEN, L.; PRINZ, R.; GRITTEN, D.; EMER, B.; VÄÄTÄINEN, K.; ERKKILÄ, A. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. **Biomass & Bioenergy**, London, v. 35, n. 10, p. 4238-4247, oct. 2011.

SACCOMAN, N. A. F.; TEIXEIRA, S. O.; DAVID, G. Q.; PERES, W. M.; YAMASHITA, O. M.; KOGA, P. S. Resistência da madeira serrada de jatobá ao ataque de *Rhizoctonia solani* em diferentes teores de umidade. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 16, n. 3, p. 360-365, jul./set. 2017.

SANTINI JUNIOR, L.; RODRIGUEZ, D. R. O.; QUINTILHAN, M. T.; BRAZOLIN, S.; TOMMASIELLO FILHO, M. Evidence to Wood biodeterioration of tropical species revealed by non-destructive techniques. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 672, n.1, p. 357-369, jul. 2019.

SANTOS, G. R. V.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 214-220, jun. 2003.

SANTOS, J. R. S.; ROCHA, L. C. S.; FONSECA, A. C. L.; ANDRADE, H. B. Estudo do efeito do empilhamento na secagem natural da madeira. In: FÓRUM BRASIL SOBRE BIOMASSA E ENERGIA, 2012, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2012a.

SANTOS, P. S. B.; SILVA, S. H. F.; CADEMARTORI, P. H. G.; PEREIRA, R. L.; ANDRADE, F. R. VARGAS, F.; GATTO, D. A.; LABIDI, J. Changes on color and wave velocity by ultrasound Eucalyptus decayed woods. In: 19TH INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: USDA, 2015.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, jan./mar. 2012b.

SARALECOS, J. D.; KEEFE, R. F.; TINKHAM, W. T.; BROOKS, R. H.; SMITH, A. M. S.; JOHNSON, L. R. Effects of harvesting systems and bole moisture loss on weight scaling of

Douglas-Fir sawlogs (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* Franco). **Forests**, Berna, v. 5, n. 9, p. 2289-2306, sep. 2014.

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

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. New York: Springer-Verlag, 1984.

SILVA, A. K. S. **Identificação da biodegradação de quatro espécies de madeiras tropicais por cupins subterrâneos e sua relação com as características tecnológicas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Pará, Belém, PA. 2020.

SILVA, C. M. S.; VITAL, B. R.; RODRIGUES, F. A.; ALMEIDA, E. W.; CARNEIRO, A. C. O.; CÂNDIDO, W. L. Hydrothermal and organic-chemical treatments of eucalyptus biomass for industrial purposes. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 289, 121731, 2019a.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 481-485, out./dez. 2015.

SILVA, E. J.; CREMONEZ, V. G.; NISGOSKI, S. Color change and thermogravimetric analysis of thermally treated *Eucalyptus grandis* wood. **Ciência de Madeira**, Pelotas, v. 10, n. 1, p. 39-47, 2019b.

SILVA, L. F.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FURTADO, E. L.; ALVES, F. R. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 393-400, jul./set. 2014.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, p. e20160350, jul. 2018.

SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; DEINER, J.; CALIL JUNIOR, C. Permeability measurements of Brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**, São Carlos, v. 13, n. 3, p. 281-286, jul./sep. 2010.

SINGH, A. P. A review of microbial decay types found in wooden objects of cultural heritage recovered from buries and waterlogged environments. **Journal of Cultural Heritage**, Amsterdam, v. 13, n. 3, p. S16-S20, sep. 2012.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972.

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

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GARLET, A.; PASTORE, T. C. M. Resistência natural da madeira de três espécies amazônicas submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 15-32, mai. 2013.

STEIN, F. R. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. 2003. Monografia (Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. **Fuel**, London, v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011.

TEIXEIRA, R. U. **Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de *Eucalyptus spp.* na velocidade de secagem**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2015.

THÖRNQVIST, T. Energy change due to storage of logging residues. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOENERGY, 1984, Göteborg. **Proceedings...**Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, 1984. Research notes n° 152.

THÖRNQVIST, T. Drying and storage of forest residues for energy production. **Biomass**, London, v. 7, n. 2, p. 125-134, 1985.

THÖRNQVIST, T. Wood fuel storage in large piles; Mechanisms and risks of self-ignition. *In*: IEA/BE CONFERENCE TASK III/ACTIVITY 6 AND 7, 1988, Sweden. **Proceedings...**Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, 1988, p. 193-198.

TOMAZELLO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIN, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-149, dec. 2008.

TREVISAN, H.; MARQUES, F. M.; CARVALHO, A. G. Degradação natural de toras de cinco espécies florestais em dois ambientes. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 33-41, jan./mar. 2008.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B.; Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, abr./jun. 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. Departamento de Engenharia Agrícola. Estação Climatológica Principal de Viçosa. Boletim meteorológico 2019. Viçosa, 2019. Disponível em: http://www.posmet.ufv.br/?page_id=1253. Acesso em: 11 dez. 2019.

- VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, jan./mar. 2015.
- VIEIRA, T. A. S.; CARABINEIRO, S. A. C.; TRUGILHO, P. F. Forestry biomass as energy source in Brazil. **International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources**, v. 19, n. 3, p. 1-9, may 2019.
- VISSER, R.; BERKETT, H.; SPINELLI, R. Determining the effect of storage conditions on the natural drying of ratia pine logs for energy use. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Springfield, v. 44, n. 3, p. 1-8, jan. 2014.
- VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 10-27, 1985.
- VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; ITAKO, A. T.; CRUZ, P. C. P.; GROSSKOPF, E. J.; NUNES, G. C. Durabilidade natural das madeiras de *Apuleia leiocarpa*, *Astronium lecointei* e *Enterolobium schomburgkii* ao fungo apodrecedor *Trametes versicolor*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-5, dez. 2018.
- WHITTAKER, C.; MACALPINE, W.; YATES, N. E.; SHIELD, I. Dry matter losses and methane emissions during wood chip storage: the impact on full life cycle greenhouse gas savings of short rotation coppice willow for heat. **Bioenergy Research**, Berna, v. 9, p. 820-835, apr. 2016.
- WILLIAMS, R. S. Weathering of wood. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York: CRC Press, 2005. p. 139-185.
- YANG, L.; LIU, H. A review of Eucalyptus wood collapse and its control during drying. **BioResources**, Raleigh, v. 13, n. 1, p. 2171-2181, jun. 2018.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, p. 1781-1788, aug. 2007.
- ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, B. S.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 4, p. 723-729, jul./aug. 2016.
- ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, L. F.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 17, n. 2, p. 335-344, jul. 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**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353-360, set. 2013.

ZANUNCIO, J. C.; SOSSAI, M. F.; COUTO, L.; PINTO, R. Occurrence of *Euplatypus parallelus*, *Euplatyplus* sp. (Col.: Euplatypodidae) and *Xyleborus affinis* (Col.: Scolytidae) in *Pinus* sp. in Ribas do Rio Pardo, Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 387-389, may/jun. 2002.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 7, n. 2, p. 291-298, jul. 2019.

ŽLAHTIČ, M.; HUMAR, M. Influence of artificial and natural weathering on the moisture dynamic of wood. **BioResources**, Raleigh, v. 12, n. 1, p. 117-142, 2017.

ZULKIFLI, N. I.; SAMAT, N.; ANUAR, H.; ZAINUDDIN, N. Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. **Materials & Design**, Berna, v. 69, p. 114-123, mar. 2015.

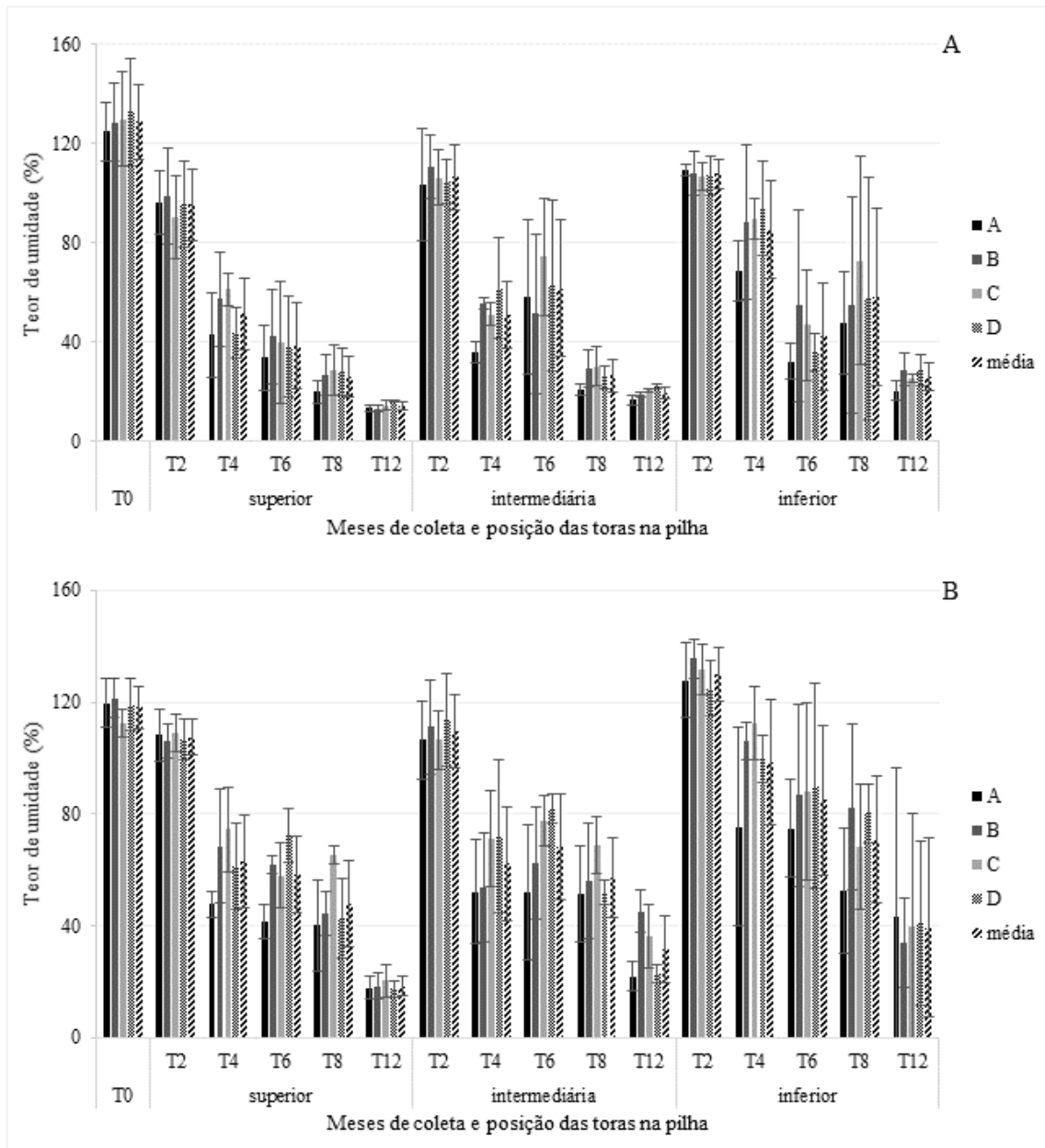
ANEXOS

ANEXO A – Resumo dos resultados das variáveis em relação à classe diamétrica, posição dos toretes na pilha e dias de estocagem

Posição dos toretes na pilha	Dias de estocagem	Teor de umidade		Densidade básica		Densidade aparente NBR 7190		Densidade aparente via raios X		Anomalias	
		CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII	CDI	CDII
Superior	60	↓	↓	-	-	-	-	-	-	P	P
	120	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	P	P
	180	↓	-	-	-	-	-	-	-	P	P
	240	↓	-	-	↓	-	-	-	-	P	P
	365	↓	↓	-	-	↓	↓	-	-	P	P
Intermediária	60	↓	↓	-	-	-	-	-	-	P	P
	120	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	P	P
	180	-	↓	↓	-	-	-	↓	-	P	P
	240	↓	-	-	↓	-	↓	-	↓	P	P
	365	↓	↓	↓	-	↓	-	-	-	P	P
Inferior	60	↓	-	-	↓	-	-	-	-	P	P
	120	↓	↓	-	-	-	↓	↓	-	P	P
	180	↓	-	-	-	-	-	-	-	P	P
	240	-	↓	↓	↓	-	-	-	-	P	P
	365	↓	-	-	-	↓	-	-	-	P	P

Onde: CDI e CDII representam as madeiras de menor e maior classe de diâmetro, respectivamente; “-” indica que não houve diferença estatística; P: presente; “↓” indica que houve redução em relação à coleta anterior.

ANEXO B – Teores de umidade de toretes de eucalipto de menor (B.A) e maior (B.B) classe de diâmetro em relação à posição na pilha, sentido longitudinal e tempo de coleta.



Fonte: Autora.

ANEXO C – Teores de umidade dos toretes da menor classe diamétrica em relação à posição na pilha, ao sentido longitudinal e ao tempo de coleta

Posição nos toretes	Posição dos toretes na pilha e tempos de coleta																	
	Superior						Intermediária						Inferior					
	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12
A	124,9 Aa	96,5 Abc	42,9 Aab	33,9 Acd	20,0 Ade	13,5 Ae	124,9 Aa	103,6 Aab	36,0 Acd	58,3 Abc	21,0 Ade	16,7 Be	124,9 Aa	109,3 Aab	68,8 Abc	32,2 Ade	47,6 Acd	20,4 Ae
B	128,7 Aa	98,9 Aab	57,3 Abc	42,4 Acd	27,1 Ade	13,1 Ae	128,7 Aa	110,9 Aab	55,8 Abc	51,6 Acd	29,3 Ade	18,8 ABe	128,7 Aa	108,2 Aab	88,4 Aab	54,7 Aab	55,1 Aab	29,0 Ab
C	130,0 Aa	90,2 Aab	61,4 Abc	40,0 Acd	28,9 Acd	14,6 Ad	130,0 Aa	106,4 Ab	51,3 Ad	74,5 Ac	30,4 Ae	20,6 ABf	130,0 Aa	107,0 Aab	89,8 Aabc	46,8 Abc	73,0 Abc	25,7 Ac
D	132,7 Aa	95,7 Aab	44,0 Abc	38,2 Acd	28,0 Acd	16,3 Ad	132,7 Aa	105,1 Aab	61,8 Ab	62,7 Ab	25,9 Ae	22,2 Ac	132,7 Aa	107,2 Aab	94,1 Aab	36,0 Aab	57,6 Aab	28,7 Ab
Média	129,1 Aa	95,3 Ab	51,4 Ad	38,6 Ac	26,0 Ae	14,4 Af	129,1 Aa	106,5 Ab	51,2 Ac	61,8 Ac	26,6 Ad	19,6 ABe	129,1 Aa	107,9 Ab	85,2 Ac	42,5 Ad	58,3 Ad	26,0 Ae
Desvio padrão	15,1	14,7	14,6	17,2	8,1	1,8	15,1	13,0	13,5	27,5	6,4	2,4	15,1	5,8	19,6	21,6	35,6	5,6

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

ANEXO D – Teores de umidade dos toretes da maior classe diamétrica em relação à posição na pilha, ao sentido longitudinal e ao tempo de coleta

Posição nos toretes	Posição dos toretes na pilha e tempos de coleta																	
	Superior						Intermediária						Inferior					
	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12
A	119,6 Aa	108,2 Aab	47,6 Abc	41,5 Bbc	40,2 Ac	17,8 Ac	119,6 Aa	106,5 Aab	52,3 Abc	52,0 Abc	51,5 Ac	22,0 Ac	119,6 Aab	127,9 Aa	75,5 Aab	74,9 Aab	52,5 Ab	43,2 Ab
B	121,3 Aa	106,1 Aa	68,4 Ab	61,9 ABbc	44,2 Acd	18,4 Ae	121,3 Aa	111,1 Aab	53,9 Aab	62,6 Aab	56,0 Aab	45,3 Ab	121,3 Aab	135,5 Aa	106,1 Aabc	86,6 Abc	82,5 Abc	33,7 Ac
C	112,7 Aa	109,0 Aab	74,5 Abc	57,8 ABcd	65,3 Ac	20,5 Ad	112,7 Aa	106,4 Aab	71,2 Acd	77,6 Abc	68,7 Acd	36,2 Ad	112,7 Aab	131,7 Aa	112,4 Aab	88,0 Aab	68,2 Ab	39,6 Ab
D	119,0 Aa	106,8 Aab	61,2 Acd	72,4 Abc	42,6 Ade	17,4 Ae	119,0 Aa	113,8 Aab	71,9 Ac	81,9 Abc	52,1 Acd	22,7 Ad	119,0 Aa	124,9 Aa	99,7 Aab	89,9 Aab	80,2 Aab	40,9 Ab
Média	118,1 Aa	107,5 Ab	62,9 Ac	58,4 ABc	48,1 Ac	18,5 Ad	118,1 Aa	109,4 Ab	62,3 Ac	68,5 Ac	57,1 Ad	31,6 Ae	118,1 Aa	130,0 Aa	98,4 Ab	84,9 Abc	70,9 Acd	39,4 Ad
Desvio padrão	7,4	6,4	16,5	13,6	15,5	3,2	7,4	13,0	20,4	18,9	14,4	12,0	7,4	9,5	22,3	26,7	22,8	32,0

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

ANEXO E – Teores de umidade dos toretes da menor classe diamétrica em relação à posição na pilha, ao sentido radial e ao tempo de coleta

Posição radial	Posição dos toretes na pilha e tempos de coleta																	
	Superior						Intermediária						Inferior					
	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12
0-25%	155,5	115,2	53,09	47,6	39,4	16,1	155,5	133,2	80,4	81,52	42,1	21,1	155,5	121,9	91,3	66,6	72,1	21,9
	Aa	Ab	Ac	Ac	ABc	Ad	Aa	Ab	Ac	Ac	Ad	Ae	Aa	Ab	Ac	Ac	Ac	Ad
25-50%	140,8	119,3	46,7	48,1	41,2	15,9	140,8	127,1	64,5	69,7	39,1	20,3	140,8	108,0	79,7	61,5	61,7	24,3
	ABa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ac	ABa	Aa	ABb	Ab	Ac	Ad	ABa	ABb	Ac	Ac	ABc	Ad
50-75%	129,3	103,7	53,7	37,4	30,2	16,2	129,3	115,5	46,2	65,4	30,5	22,2	129,3	117,0	79,9	52,6	60,9	23,2
	BCa	ABa	Ac	Ac	ABc	Ad	BCa	ABa	ABb	Ab	ABc	Ad	BCa	ABa	Ab	Ac	ABbc	Ad
75-100%	109,7	84,6	41,6	28,5	21,5	15,1	109,7	102,0	36,1	52,9	25,6	20,3	109,7	96,9	75,7	43,7	43,1	24,5
	Ca	Bb	Ad	Ad	Be	Af	Ca	Ba	Bc	Ab	Bd	Ae	Ca	Bab	Ab	Ac	Bc	Ad
Média	133,8	105,7	48,8	40,4	33,1	15,8	133,8	119,4	56,8	67,4	34,3	20,9	133,8	111,0	81,7	56,1	59,4	23,5
	Ba	ABb	Ad	Ad	ABe	Af	Ba	Ab	ABd	Ac	Ae	Af	Ba	ABb	Ac	Ad	ABd	Ae
Desvio padrão	25,2	30,5	22,4	26,6	16,7	1,8	25,2	13,8	19,7	11,8	7,6	0,9	25,2	11,0	6,7	10,1	12,0	1,2

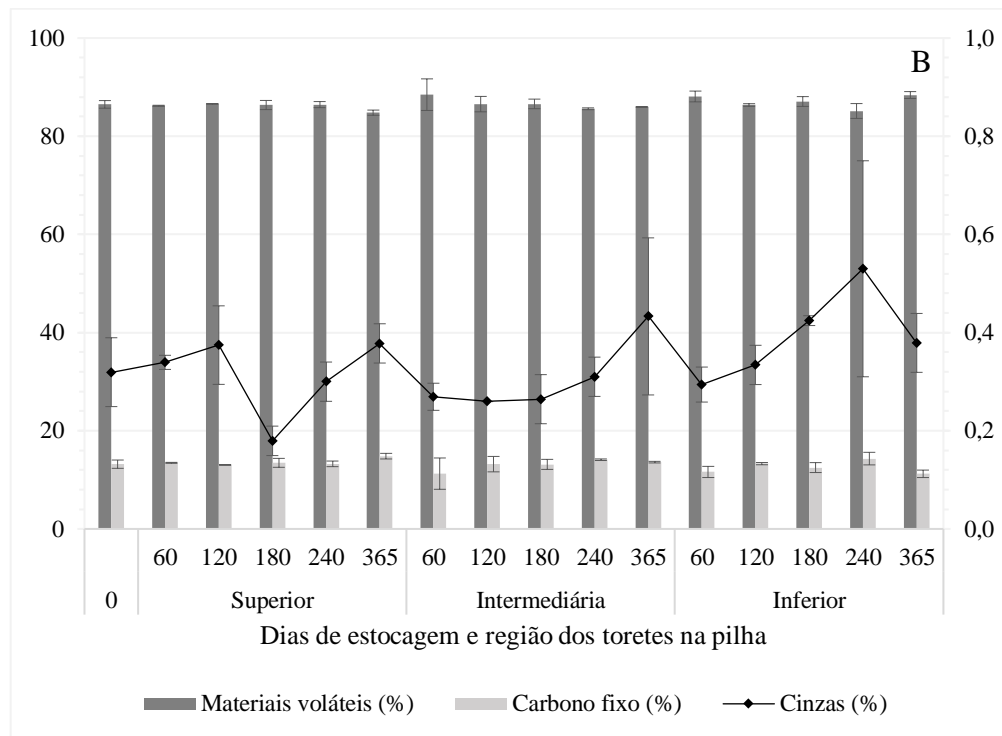
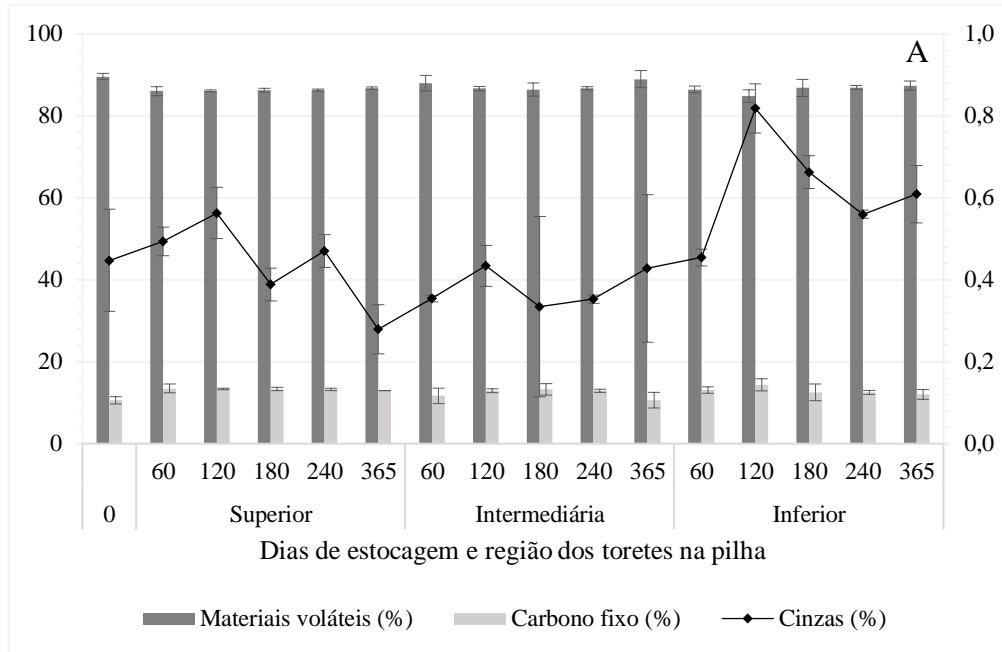
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

ANEXO F – Teores de umidade dos toretes da maior classe diamétrica em relação à posição na pilha, ao sentido radial e ao tempo de coleta

Posição radial	Posição dos toretes na pilha e tempos de coleta																	
	Superior						Intermediária						Inferior					
	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12	T0	T2	T4	T6	T8	T12
0-25%	130,7	113,1	101,3	101,5	77,9	20,3	130,7	123,2	83,3	118,5	96,1	68,3	130,7	139,4	123,1	100,3	114,3	56,14
	Aa	Aab	Abc	Ac	Ac	Ad	Aa	Aab	Ac	Aab	Abc	Ac	Aa	Aa	Aab	ABbc	Aab	Ac
25-50%	136,9	127,2	95,7	99,9	82,9	19,4	136,9	124,0	86,1	114,0	102,4	52,7	136,9	142,3	132,0	117,6	112,0	54,8
	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ac	Aa	Aab	Acd	Aabc	Abc	ABd	Aa	Aa	Aa	Aab	Aab	Ab
50-75%	126,9	134,0	78,8	54,9	59,3	18,2	126,9	124,7	89,1	88,0	81,4	28,8	126,9	157,6	131,7	119,6	101,8	49,5
	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ac	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	BCc	Aa	Aa	Aab	Abc	ABab	Ac
75-100%	102,8	84,2	35,9	28,9	29,5	16,1	102,8	98,6	43,6	35,5	34,9	18,1	102,8	105,9	83,0	62,6	59,2	30,7
	Ba	Bb	Bc	Bd	Bd	Ae	Ba	Ba	Bb	Bb	Bb	Cc	Ba	Ba	Ba	Bab	Bab	Ab
Média	124,3	114,6	77,9	71,3	62,4	18,5	124,3	117,6	75,5	89,0	78,7	42,0	124,3	136,3	117,4	100,0	96,8	47,8
	Aa	Aa	Ab	Ac	Ac	Ad	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Bc	Aab	Aa	Abc	Ac	ABc	Ad
Desvio padrão	18,4	28,1	34,6	38,6	32,7	4,3	18,4	23,8	39,2	43,0	34,5	36,1	18,4	29,3	26,2	37,0	45,2	42,2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, sendo maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade.

ANEXO G – Composição química imediata de toretes de eucalipto de menor (G.A) e maior (G.B) classe diamétrica em relação à posição na pilha e dias de estocagem.



Fonte: Autora.