

**AMANDA LADEIRA CARVALHO**

**EFEITO DA ESTOCAGEM NA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE  
HÍBRIDO DE *CORYMBIA***

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*.

Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Coorientadores: Vinícius Resende de Castro  
Marcos Oliveira de Paula

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

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

T

C331e  
2022  
Carvalho, Amanda Ladeira, 1994-  
Efeito da estocagem na qualidade do carvão vegetal de  
híbrido de *Corymbia* / Amanda Ladeira Carvalho. – Viçosa, MG,  
2022.

1 dissertação eletrônica (39 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.118>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Carvão vegetal - Armazenamento. 2. Umidade.  
3. Siderurgia. I. Carneiro, Angélica de Cássia Oliveira, 1974-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.  
III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.98675

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

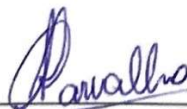
**AMANDA LADEIRA CARVALHO**

**EFEITO DA ESTOCAGEM NA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE  
HÍBRIDO DE *CORYMBIA***

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*.

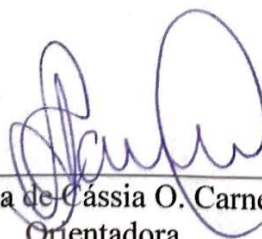
APROVADA: 13 de dezembro de 2022.

Assentimento:



---

Amanda Ladeira Carvalho  
Autora



---

Angélica de Cássia O. Carneiro  
Orientadora

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar muitas alegrias e me guiar meus passos até aqui.

Aos meus pais, José Mauro Oliveira Carvalho e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pelo amor incondicional, compreensão, ensinamentos e pelo apoio.

Às minhas avós, Maria Aparecida Oliveira Carvalho (*in memoriam*) e Maria José Macedo Ladeira (*in memoriam*), que agora oram por mim lá de cima e ao meu avô, José Ladeira de Carvalho.

Aos meus amigos e familiares por todo incentivo e ajuda, em especial meu primo Arthur Santiago Carvalho, que me ajudou nos trabalhos pesados, principalmente durante a pandemia.

A minha orientadora, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, e aos meus coorientadores Vinícius Resende de Castro e Marcos Oliveira de Paula pela orientação, ensinamentos e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de pós-graduação em Ciência Florestal (PPGCF) pela formação.

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pela concessão da minha bolsa e financiamento do projeto.

À empresa ArcelorMittal Brasil S.A. pelo fornecimento da madeira de *Corymbia* para a realização do estudo.

À equipe que trabalhou diretamente na execução do experimento.

A todos os demais professores, funcionários e amigos do laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) por toda ajuda ao longo da realização do experimento.

Obrigada!

## RESUMO GERAL

CARVALHO, Amanda Ladeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2022, **Efeito da estocagem na qualidade do carvão vegetal de híbrido de *Corymbia***. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Vinícius Resende de Castro e Marcos Oliveira de Paula.

A estocagem do carvão vegetal consiste em armazená-lo em silos, containers, galpões ou até mesmo em pátios, podendo esses serem abertos ou cobertos, para ser utilizado em época de maior demanda e/ou estratégicas de preço e abastecimento. Acredita-se que o carvão vegetal durante o período de estocagem possa vir a modificar suas propriedades físicas e energéticas, em virtude da friabilidade e variações de umidade no ambiente. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do tempo e das condições de estocagem na qualidade do carvão vegetal. Foi analisado carvões vegetais de clone híbrido de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*, produzidos em sistema fornos-fornalha. O trabalho foi dividido em dois experimentos, a saber: I) carvões vegetais armazenados em dois ambientes, fechado e semiaberto. Em ambos os ambientes foram instaladas pilhas com carvão vegetal na condição seca, ou seja, no teor de umidade de equilíbrio ( $\approx 5\%$ ), e outra em condição úmida ( $\approx 10\%$ ), ou seja, adicionou-se água para simular alteração do teor de umidade quando da necessidade de adição de água para apagar foco de fogo durante abertura dos fornos. II) O segundo experimento consistiu em armazenar o carvão vegetal embalado em sacos de ráfia e sacos de papel, além do armazenamento em pilhas (sem embalagem). Para ambos os experimentos, o período de avaliação da estocagem foi de aproximadamente 120 dias (4 meses). Determinou-se o teor de umidade, friabilidade, densidade a granel, composição química imediata e poder calorífico. De acordo com os resultados, no experimento I, durante o período de baixa pluviosidade, o local de estocagem não teve efeito significativo nas propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, somente na friabilidade, que aumentou 40%, em média, ao longo do tempo. Durante o período chuvoso, o ambiente de estocagem semiaberto não ofereceu proteção suficiente, resultando no aumento do teor de umidade do carvão vegetal estocado, promovendo redução de 16% no poder calorífico útil e aumento da densidade a granel devido ao aumento da quantidade de água por mesma unidade de volume. Quanto ao tipo de embalagem para estocagem do carvão vegetal (experimento II), verificou-se diferença entre as formas de armazenamento, porém pouco expressivas, o carvão vegetal estocado em sacos de papel teve menor impacto na sua qualidade, principalmente na geração de finos. Conclui-se que a estocagem do carvão vegetal em local fechado e embalado

em sacos de papel confere maior proteção ao carvão vegetal quanto a sua qualidade, quando há necessidade de armazenamento por longos períodos.

Palavras-chave: Friabilidade. Siderurgia. Armazenamento. Cocção. Teor de umidade

## ABSTRACT

CARVALHO, Amanda Ladeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2022, **Effects of the storage on the quality of the charcoal from *Corymbia* hybrids** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisers: Vinícius Resende de Castro and Marcos Oliveira de Paula.

The storage of charcoal is consisted in storing it in silos, containers, warehouses or even in yards which may be open or covered, to be used in times of greater demand and/or for price strategies. It is believed that the charcoal during the storage period might modify its physical and energetic properties due to its friability and variations of the environment humidity. The objective of this study was to evaluate the effects of time and storage conditions on charcoal's quality. It was analyzed charcoals from a hybrid clone of *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* produced in kilns-furnace system. This work was divided into two experiments: I) Charcoals were stored in two environments, closed and semi-open. In both environments, two piles were installed with charcoal with 5% of moisture content, and two piles were installed with charcoal with 10% of moisture content. II) The second experiment consisted in storing the charcoal packed in raffia bags and paper bags, besides of the piles (no package). For both experiments, the evaluation period of storage was approximately four months. Moisture content, friability, bulk density, immediate chemical composition and calorific power were determined. According to the results, in experiment I, during the low rainfall period, the storage location had no significant effect on the physical and chemical properties of charcoal, only on the friability, which increased 40% on average over time. During the rainy season, the semi-open storage environment did not offer enough protection, increasing the moisture content of the stored charcoal, promoting a 16% reduction on net calorific value and increased bulk density due to the high amount of water per same unit volume. As for the type of packaging for storage of charcoal (experiment II), there was a difference between the types of storage, but not expressive, the charcoal stored in paper bags had less impact on its quality, especially in the generation of fines. It is concluded that the storage of charcoal in a closed place and packed in paper bags provides greater protection to the charcoal regarding its quality, when there is need for storage for long periods.

Keywords: Friability. Steelmaking. Stocking. Cooking. Moisture content.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. OBJETIVOS.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	12
3.1 Caracterização da madeira .....	12
3.2 Produção do carvão vegetal .....	12
3.3 Estocagem do carvão vegetal.....	13
3.4 Propriedades do carvão vegetal .....	15
3.5 Delineamento experimental .....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
4.1. EXPERIMENTO I.....	18
4.1.1 <i>Teor de umidade dos carvões vegetais empilhados função do tempo de estocagem</i> .....	18
4.1.2 <i>Friabilidade dos carvões vegetais empilhados em função do tempo de estocagem</i> .....	20
4.1.3 <i>Densidade a granel dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem</i> .....	22
4.1.4 <i>Composição Química imediata dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem</i> .....	23
4.1.5 <i>Poder calorífico dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem</i> .....	25
4.2 EXPERIMENTO II.....	27
4.2.1 <i>Teor de umidade dos carvões vegetais em função do tipo de embalagem e tempo de estocagem</i> .....	27
4.2.2 <i>Friabilidade e densidade a granel dos carvões vegetais em função do tipo de embalagem e tempo de estocagem</i> .....	28
4.2.4 <i>Propriedades dos carvões vegetais em função do tipo de armazenamento e tempo de estocagem</i> .....	30
5. CONCLUSÕES.....	35
EXPERIMENTO I.....	35
EXPERIMENTO II.....	35
REFERÊNCIAS .....	36

## 1. INTRODUÇÃO

O efeito das mudanças climáticas no planeta é um tema que está cada vez mais em destaque nas discussões diplomáticas. O termo ESG (*sigla em inglês para Ambiental, Social e Governança*) está em alta e empresas e instituições de todo o mundo estão se adaptando à nova realidade e buscando a mitigação do avanço do efeito estufa.

Dentre as alternativas adotadas está a utilização de fontes renováveis de energia em substituição às fontes não-renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021 44,7% da matriz energética brasileira é proveniente de fontes renováveis, com destaque para as biomassas, que corresponde a 25,1% da matriz energética nacional (BEN, 2022).

A biomassa é uma fonte de energia renovável que captura o CO<sub>2</sub> da atmosfera e dentre os seus diversos usos, destaca-se a conversão da madeira em carvão vegetal, sendo o Brasil o único país que o produz em larga escala para utilização na indústria (CARNEIRO et al., 2013).

No ano de 2021, o Brasil produziu 6,1 milhões de toneladas de carvão vegetal (BEN, 2022), sendo 94% produzidos a partir de madeira oriunda de árvores plantadas, logo, para suprir esta demanda, 12% dos 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas de eucalipto no Brasil são destinados a produção de carvão vegetal para siderurgia (IBÁ, 2022).

O *Eucalyptus* é o gênero mais plantado na indústria florestal devido ao seu rápido crescimento e boa adaptabilidade ao clima brasileiro, porém este gênero ainda apresenta alguns entraves que prejudicam sua produtividade em certas regiões, como baixa resistência ao déficit hídrica e susceptibilidade a doenças (BOOTH, 2013). Portanto, é necessário que novos materiais genéticos sejam desenvolvidos para garantir a continuidade dessa produtividade, como os híbridos de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*.

Quase a totalidade do carvão vegetal produzido no Brasil é consumido internamente, sendo 13% consumidos em residências e comércios, 12% pela indústria de ferroligas e, a maior demanda pelo carvão vegetal está no setor de ferro-gusa e aço, responsáveis por 71% do consumo (BEN, 2022).

Atualmente, 22% da produção nacional de ferro-gusa é oriunda da rota do carvão vegetal, em 2021 esta parcela correspondeu a 7,6 milhões de toneladas de ferro gusa produzido no Brasil. A maior parte dessa produção é oriunda de usinas independentes, responsáveis por 15% da produção, as usinas integradas representam os 7% restantes (SINDIFER, 2022).

Mais da metade do ferro-gusa produzido através da rota do carvão vegetal é voltado para o mercado externo, que, nos últimos três anos dobrou a demanda. Em 2018 a exportação de ferro-gusa à carvão vegetal foi de 1,9 milhões de toneladas, já em 2021 a exportação foi de

3,2 milhões de toneladas. Com destaque para 2020, que foi a maior exportação de ferro gusa à carvão vegetal nos últimos anos, com 3,7 milhões de toneladas. Este aumento se deve principalmente à China, que aumentou em 600% a importação do ferro gusa brasileiro, sendo o segundo maior importador do produto (SINDIFER, 2022).

Neste contexto, o aumento na demanda de ferro gusa no mercado internacional influencia diretamente na cadeia produtiva do carvão vegetal, pois aumentando a demanda, conseqüentemente aumenta os preços no mercado e a qualidade tende a cair, devido às altas taxas de aquecimento dos fornos para produção mais rápida, também pela abertura antecipada dos fornos, ocasionando a necessidade de adição de água para conter os focos de fogo dentro forno ou até mesmo nas pilhas de estocagem.

Além disso, outro grande problema é a produção desse insumo em época de chuvas, pois há redução da oferta devido à queda de produtividade das unidades de produção (UPC), devido ao alto teor de umidade da madeira, perda de calor pelas paredes dos fornos e dificuldade de escoamento de madeira até as UPC's.

Numa tentativa de amenizar esse quadro de oferta, demanda e aumento do preço do carvão vegetal numa sazonalidade, uma das alternativas é a estocagem do carvão vegetal. Existem diversas formas de estocagem de acordo com os objetivos dos produtores e escala de produção, sendo mais comum e de menor custo a estocagem do carvão vegetal em pilhas, dispostos à céu aberto, nos pátios das unidades de produção, visando estabilização da temperatura antes do transporte para evitar combustão da carga também para atender a demanda do cliente. Também há estoques estratégicos dos produtores, onde o carvão vegetal é armazenado por tempo indefinido para atender alguma demanda caso haja problema de abastecimento, seja por produção insuficiente, dificuldades na logística, preço, períodos de chuva, dentre outros.

Por outro lado, tem-se o armazenamento do carvão vegetal, principalmente, para atender ao mercado de empacotamento, pois esse setor também é muito dependente da demanda do carvão vegetal pelo setor de ferro gusa e aço, visto que a boa parte dos produtores não tem produção própria e ficam vulneráveis as oscilações do mercado, logo, uma estratégia para eles também seria o armazenamento. No entanto, não se sabe até o momento se o melhor modo de se armazenar o produto seria via as pilhas em galpões abertos ou semiabertos, em sacos de papel tradicionais ou em sacos de rafia.

Na busca para esse entendimento e melhor atendimento as boas práticas quanto a necessidade de estocagem e conseqüentemente o armazenamento do carvão vegetal, verifica-

se poucos estudos que avaliam esse impacto na qualidade do carvão vegetal, tendo, portanto essa lacuna para os produtores na tomada de decisão, visto que acredita-se que ao longo do tempo o carvão vegetal pode perder a resistência mecânica, aumentar o teor de finos devido ao aumento do teor de umidade, bem como aumentar o teor de cinzas e conseqüentemente reduzir o teor de carbono fixo. Logo, faz-se necessário buscar tais respostas e os reais impactos da estocagem na qualidade do carvão vegetal para auxiliar os produtores na tomada de decisão.

## 2. OBJETIVOS

**Principal:** Avaliar o efeito da estocagem na qualidade do carvão vegetal de híbrido de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* ao longo do tempo e diferentes condições de armazenamento.

**Objetivos específicos:**

- Avaliar o efeito do ambiente e do teor de umidade inicial nas propriedades do carvão vegetal ao longo do tempo;
- Avaliar o efeito do tipo de embalagem nas propriedades do carvão vegetal ao longo do tempo de estocagem;

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da madeira

Para a realização da carbonização foi utilizado madeira de *Corymbia citriodora x Corymbia torelliana*, aos 7 anos, provenientes de Bom Despacho, Minas Gerais, espaçamento 4 x 1,87 m, incremento médio anual de 35 m<sup>3</sup>/ha/ano, com casca, diâmetro variando de 9 a 13 cm. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das propriedades da madeira de *Corymbia* utilizada no experimento.

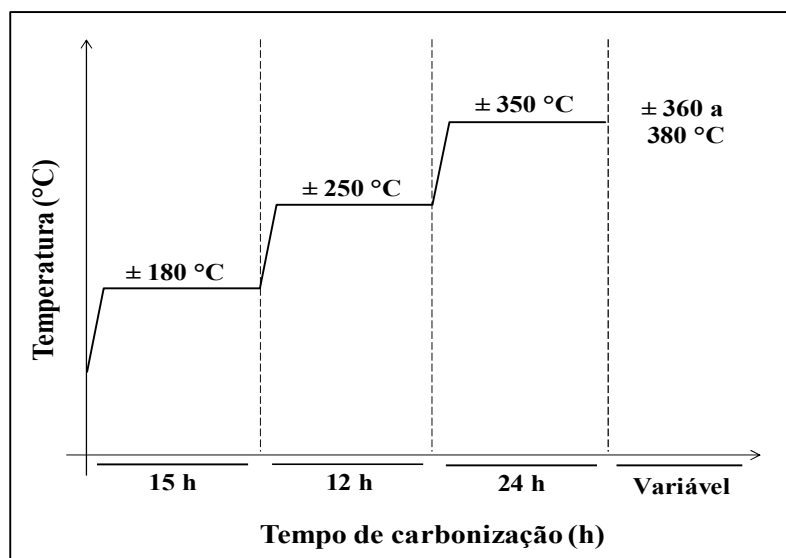
**Tabela 1** – Valores médios das propriedades da madeira de híbrido de *Corymbia citriodora x Corymbia torelliana*

Propriedades	Norma de referência	Valor médio
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)	621,44 kg.m <sup>-3</sup>
Teor de extrativos totais	TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996)	5,18 %
Teor de lignina total	Gomide e Demuner (1986); Goldschimid (1971)	24,38 %
Teor de holoceluloses	TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996)	69,93 %
Teor de cinzas	ASTM D 1102-84 (2013)	0,51 %
Relação cerne/alburno	Evangelista (2007)	0,18

#### 3.2 Produção do carvão vegetal

O carvão vegetal utilizado neste estudo foi proveniente de carbonizações realizadas em sistema fornos-fornalha, instalados no sítio de pesquisa do LAPEM. As toras foram enfiadas manualmente, dispostas na posição vertical, e completando a parte superior do forno com toretes de menores comprimentos, na posição horizontal.

O controle da carbonização foi realizado pelo monitoramento da temperatura, baseando nas faixas teóricas de temperatura obtidas na copa do forno, conforme testes e validações dos fornos de carbonização (Figura 1), pelo controle da entrada de oxigênio para o interior do forno a partir da abertura ou do fechamento dos controladores de ar.



**Figura 1** - Curva teórica de carbonização utilizada para obtenção dos carvões vegetais.





Depois de produzidos, os carvões vegetais foram retirados dos fornos, dispostos em uma lona e misturados, cuidadosamente, para melhor homogeneização. Foram realizadas duas carbonizações para obtenção dos carvões vegetais para o experimento. Assim, após a produção e homogeneização, os carvões foram dispostos novamente na lona, misturados e quarteados, retirando-se amostras dos quadrantes opostos para serem utilizadas no experimento de estocagem.

### 3.3 Estocagem do carvão vegetal

A avaliação da estocagem do carvão vegetal foi dividida em dois experimentos: Experimento I consistiu em avaliar o local de estocagem e o teor de umidade inicial do carvão vegetal nas suas propriedades ao longo do período de tempo. O Experimento II avaliou o efeito do tipo de embalagem na qualidade do carvão vegetal ao longo do período de estocagem.

No Experimento I, os carvões vegetais foram dispostos em pilhas de aproximadamente 45 quilos, em dois ambientes, sendo um galpão de alvenaria, dimensão de 4,5 x 6,0 m coberto por telhas galvanizadas e outro galpão, dimensão 9,5 x 6,0 m, também de alvenaria, coberto com telhas galvanizadas, porém semiaberto, ou seja, tendo duas de suas laterais abertas (Figura 2).

Em ambos os ambientes foram instaladas duas pilhas com carvão vegetal com dois teores de umidades distintos,  $\pm 5$  e  $\pm 10\%$ , em base seca, totalizando quatro pilhas de estocagem.

	Identificação	Descrição
	Semiaberto/CV 10% U	Carvão vegetal estocado em pilhas em ambiente semiaberto, com teor de umidade inicial de 10%
	Semiaberto/CV 5% U	Carvão vegetal estocado em pilhas em ambiente semiaberto, com teor de umidade inicial de 5%
	Fechado/CV 10% U	Carvão vegetal estocado em pilhas em ambiente fechado, com teor de umidade inicial de 10%
	Fechado/CV 5% U	Carvão vegetal estocado em pilhas em ambiente fechado, com teor de umidade inicial de 5%

**Figura 2** – Ilustração, identificação e descrição das condições do carvão vegetal em função dos tratamentos.

No Experimento II, utilizou-se carvões vegetais com teores de umidade médio, inicial, de 5%, estocados em três condições de armazenamento, a saber: Pilhas (sem embalagens), sacos de ráfia e sacos de papel, ao longo do tempo. As embalagens de ráfia e papel são as mais utilizadas para transporte, estocagem e comercialização do carvão vegetal. Os sacos de ráfia são comumente usados para transportar o carvão vegetal, em caminhões, para o abastecimento siderúrgico, normalmente embalados em sacos de 20kg. Já os sacos de papel são utilizados para comercialização do carvão vegetal para uso doméstico (cocção). Geralmente o carvão vegetal é embalado em sacos de 3kg.

Os carvões vegetais, sem embalagem, foram estocados em pilhas com aproximadamente 45 quilos cada, também em sacos de ráfia convencional e de papel, sendo 4 e 6 unidades amostrais, por tipo de embalagem, respectivamente. A massa média de carvão vegetal dos sacos de ráfia foi de 20 quilos e os de saco de papel de 3 quilos. A diferença de massa entre as embalagens avaliadas é devido ao que atualmente é praticado comercialmente, após ensacados, os sacos foram fechados e dispostos no galpão fechado, próximo às pilhas (Figura 3).

	Embalagem	Quantidade
	Pilha (Sem embalagem)	Duas pilhas com aproximadamente 45 kg cada
	Saco de rafia	Quatro sacos com aproximadamente 20 kg cada
	Saco de papel	Seis sacos com aproximadamente 3kg cada

**Figura 3** – Disposição dos carvões vegetais em função dos tratamentos em local fechado

O tempo de avaliação da estocagem dos carvões foi de aproximadamente quatro meses, sendo amostrado carvões a cada 30 dias visando avaliar o efeito do tempo de estocagem em suas propriedades. Cada unidade amostral retirada para avaliação tinha massa de aproximadamente 3 kg de carvão vegetal.

### 3.4 Propriedades do carvão vegetal

Para a determinação do teor de umidade, base seca, foram coletadas amostras de carvões de diversas granulometrias em partes aleatórias das pilhas. Para o material estocado em saco, os materiais eram misturados a fim de homogeneizar o conteúdo e as amostras foram retiradas aleatoriamente. Após a coleta do material, as amostras foram pesadas e levadas à estufa com circulação forçada de ar, a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante.

A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981) adaptada, alterando-se as dimensões da caixa em função do volume de amostras proveniente dos tratamentos.

A composição química imediata do carvão vegetal, que corresponde aos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca, foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

Para a determinação da friabilidade foi utilizada a metodologia compressão, conforme descrita por Soares et al. (2021).

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), em duplicatas, utilizando-se bomba calorimétrica adiabática IKA300.

O poder calorífico útil foi calculado utilizando a Equação 1, de acordo com Oliveira et al. (2019).

$$PCU = [PCS - (600 \times 9 \times 3)/100] \times [(100 - U) \div 100] - (6 \times 3) \quad (1)$$

Onde:

**PCU** = Poder calorífico útil em kg/kcal;

**PCS** = Poder calorífico superior do material, em kg/kcal;

**3 (%)** = Teor médio de hidrogênio no material;

**600 (kcal)** = Valor médio energia absorvida/kg de água para atingir temperatura de evaporação;

**9** = Múltiplo do peso do H<sub>2</sub>, contido no material, que fornece o peso da água formada durante a combustão;

**U (%)** = Umidade do material, base peso úmido;

**6** = Fator de conversão referente a energia para a evaporação da água de formação.

### 3.5 Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado dividido em 2 etapas:

Experimento I: Foram analisados dois locais de estocagem (ambiente fechado e semiaberto) com dois teores de umidade inicial (5 e 10%), tendo duas repetições cada tratamento. Totalizando 8 unidades amostrais.

Experimento II: Foram analisados três tipos de embalagem do carvão vegetal (pilha, saco de rafia e saco de papel), com duas repetições cada, totalizando 6 unidades amostrais.

Para ambas as etapas, os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk, para testar a normalidade e em seguida, submetidos à análise de variância (ANOVA). Observando-se diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey a 5% de significância.

Também para as Etapas I e II, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito do tempo sobre a qualidade do carvão vegetal, caso de efeito significativo, aplicou-se o teste de Tukey para determinar a diferença entre os tratamentos a 95% de significância.

Na Figura 4 segue fluxograma simplificado do delineamento experimental realizado.



**Figura 4** – Fluxograma simplificado do delineamento experimental

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. EXPERIMENTO I

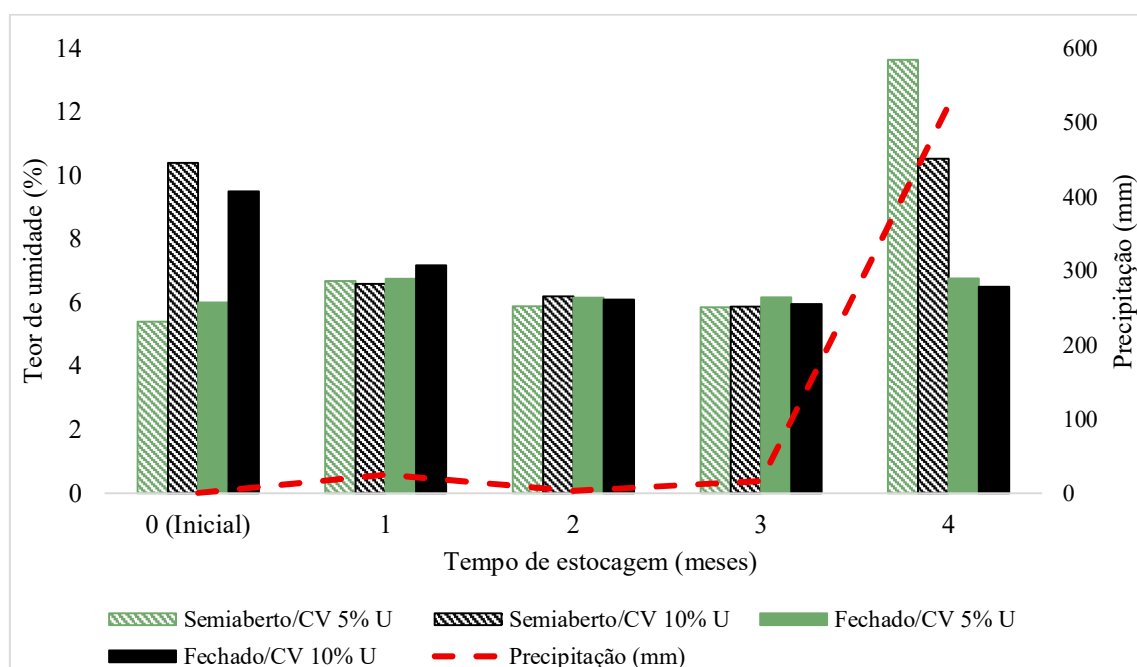
#### 4.1.1 Teor de umidade dos carvões vegetais empilhados função do tempo de estocagem

Os valores médios do teor de umidade do carvão vegetal, em base seca, em função do tempo de estocagem para os diferentes tratamentos estão apresentados na Tabela 2 e Figura 5.

**Tabela 2.** Valores médios do teor de umidade base seca, do carvão vegetal (%) em função do tempo de estocagem.

Condição de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Semiaberto/CV 5% U	5,4	6,7	5,9	5,9	13,6	7,5 a
Semiaberto/CV 10% U	10,4	6,6	6,2	5,9	10,5	7,9 a
Fechado/CV 5% U	6,0	6,8	6,2	6,2	6,8	6,4 b
Fechado/CV 10% U	9,5	7,2	6,1	6,0	6,5	7,0 ab
<b>Média</b>	<b>7,80 A</b>	<b>6,8 B</b>	<b>6,1 B</b>	<b>6,0 B</b>	<b>9,4 A</b>	<b>7,2</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.



**Figura 5** – Variação do teor de umidade, base seca, do carvão vegetal em função do tempo de estocagem.

Observa-se que não houve alteração no teor de umidade dos carvões vegetais, com 5% de teor de umidade inicial, após 90 dias de estocagem, ou seja, mês 3, independente do ambiente

de estocagem. No entanto, no mês quatro, quando houve aumento da pluviosidade, há incremento médio de 100% no teor de umidade dos carvões vegetais estocados no ambiente semiaberto.

Para os carvões vegetais com teor de umidade inicial de 10%, nota-se que após 30 dias de estocagem houve redução de 30%, tendo valor médio de 6,9%. Observa-se que ao longo dos dois meses subsequentes o teor de umidade se manteve constante, evidenciando que o carvão vegetal, provavelmente, entrou em equilíbrio com o meio o qual estava estocado. No entanto, no quarto mês de estocagem, houve incremento de 78% no teor de umidade do carvão vegetal estocado no ambiente semiaberto, devido ao volume chuvas ocorridas no período, sendo que parte dessa precipitação adentrou para o ambiente de estocagem por meio das aberturas laterais do galpão. No período entre o mês 3 e 4 choveu na região do experimento cerca de 500 milímetros (INMET, 2022).

No período entre o mês 0 e 1, verificou redução no teor de água presente nos carvões com 10% de umidade inicial e ganho em umidade de aproximadamente 1% nos carvões com teores de umidade de 5%. A partir do mês 2 as amostras de carvão vegetal começaram a entrar em equilíbrio com o ambiente, tendo valores médios de umidade próximos de 6%, em todas as pilhas de estocagem. Durante o mês 2 e o mês 3 não houve variação significativa no teor de umidade dos carvões vegetais estocados. A partir do início do período chuvoso, houve ganho em umidade nos carvões armazenados em local semiaberto, apresentando aumento de aproximadamente 6% no valor do teor de umidade no mês 4.

Aumento no teor de umidade ocasiona aumento no consumo de energia para a evaporação da água presente no carvão, reduzindo sua capacidade energética, se tornando mais restritivo tanto para siderurgia quanto para a cocção de alimentos (DIAS JÚNIOR et al., 2021). Maior teor de umidade no carvão vegetal pode influenciar, também, no aumento no volume de gases (fumaça) devido a geração de maior percentual de gases (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>), o que prejudica sua qualidade para cocção, além poder alterar o sabor do alimento (OLIVEIRA et al., 2019).

O carvão vegetal, por se tratar de um material poroso, possui alta taxa de absorção de água quando exposto a condições úmidas (DIAS JÚNIOR et al, 2016; COSTA, 2019). Mas, também possui alta taxa de remoção de água, visto que a água absorvida pelo material fica armazenada nos poros, portanto, a água é evaporada facilmente por capilaridade. Costa (2019) observou que, nas primeiras 48 horas o carvão vegetal apresenta uma taxa de remoção de água

de 1,1%/hora. Após este período a taxa de remoção cai para 0,6%/hora, estabilizando-se a partir do sétimo dia.

Neste experimento, a capacidade de remoção de água do carvão vegetal pode ser observada entre o mês 0 e o mês 1, onde as pilhas com 10% de umidade inicial, rapidamente perderam a água absorvida e o teor de umidade desses tratamentos se aproximou aos demais. A capacidade de absorção do carvão pode ser observada no mês 4, quando a água das chuvas atingiu o carvão estocado em ambiente semiaberto, fazendo com que o material absorvesse elevados teores de água.

Anater et al. (2019), avaliando a qualidade do carvão vegetal comercializado para cocção, atribuiu o aumento nos teores de umidade do carvão vegetal ao modo de armazenagem do produto, que em muitos casos não havia preocupação dos comerciantes em armazenar o carvão vegetal corretamente e em algumas situações o produto estava exposto às intempéries.

As pilhas armazenadas em local fechado não foram afetadas pela água da chuva, portanto não sofreram alterações significativas no teor de umidade carvão.

#### ***4.1.2 Friabilidade dos carvões vegetais empilhados em função do tempo de estocagem***

Na Tabela 3 e Figura 6, observa-se que a friabilidade dos carvões vegetais aumentou ao longo do tempo de estocagem, independentemente do local e do teor de umidade inicial dos materiais. Não houve efeito significativo da interação, somente efeito isolado do tempo de estocagem. Tendência diferente da observada por Costa (2019) que observou diferença significativa da friabilidade do carvão vegetal de eucalipto somente a partir de 7% de umidade.

**Tabela 3** - Valores médios da friabilidade do carvão vegetal (%) em função do tempo de estocagem

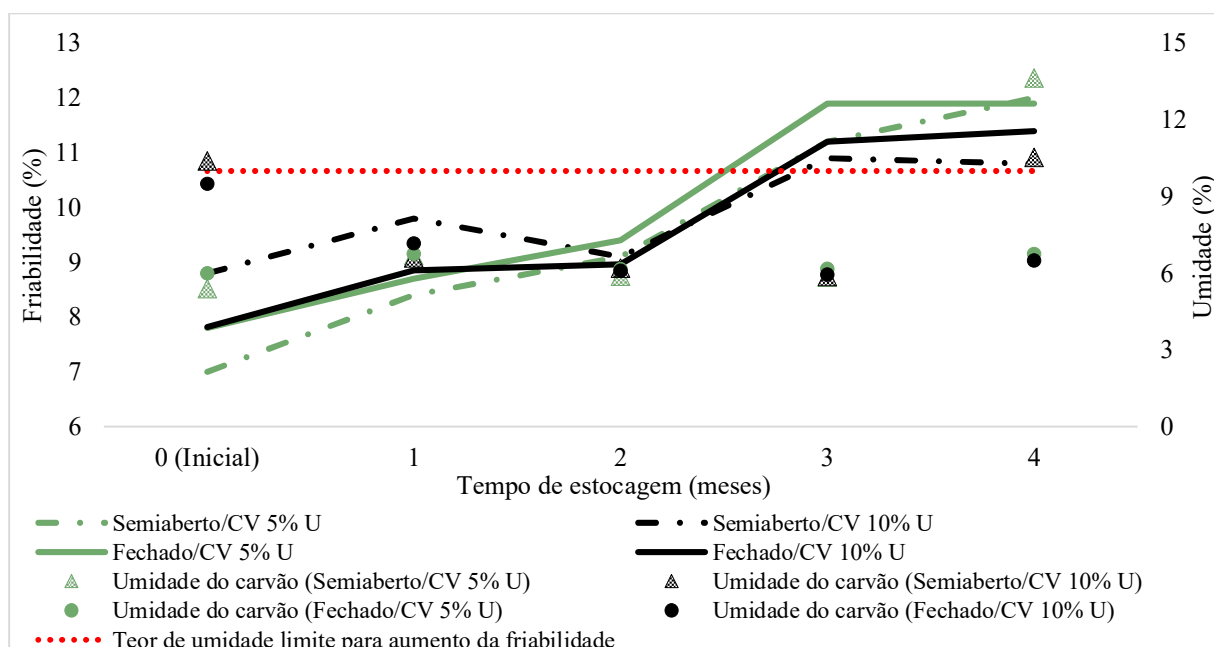
Condição de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (inicial)	1	2	3	4	
Semiaberto/CV 5% U	7,0	8,4	9,1	11,2	12	9,5
Semiaberto/CV 10% U	8,8	9,8	9,1	10,9	10,8	9,9
Fechado/CV 5% U	7,8	8,7	9,4	11,9	11,9	9,9
Fechado/CV 10% U	7,7	8,5	8,2	10,8	10,9	9,2
<b>Média</b>	7,8 B	8,9 B	9,0 B	11,2 A	11,4 A	<b>9,6</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

De modo geral, houve aumento significativo da friabilidade somente após o segundo mês de avaliação, independentemente dos tratamentos.

Observa-se que os carvões vegetais com 5% de umidade inicial, tiveram aumentou da friabilidade em todos os meses, independentemente do local estocado, com incremento médio de 13% ao mês. Ao final do experimento (mês 4), os carvões vegetais estocados com 5% de umidade apresentaram um incremento de 38% em relação ao valor inicial de friabilidade (mês 0), chegando a 12% de geração de finos.

Para o carvão vegetal com 10% de umidade, observa-se que esses foram estocados com friabilidade média de 8,8%, ou seja, maior que a do carvão vegetal com 5% de umidade. Logo, o incremento médio para esse tratamento foi menor, 8% ao mês, apresentando ao final do experimento (mês 4) 11% de geração de finos, valor 26% maior que a friabilidade inicial (mês 0).



**Figura 6** – Variação da friabilidade em relação ao tempo de estocagem e teor de umidade do carvão vegetal.

Na Figura 6 também está representada pela linha pontilhada, o limite de teor de umidade do carvão vegetal para o aumento da friabilidade, segundo Gomes e Oliveira (1980), equivalente à 10% de umidade.

Observa-se que tanto no mês 0 quanto no mês 4, os carvões vegetais com o maior teor de umidade também apresentaram maior friabilidade (12%). Porém, quando se observa o segundo maior valor de friabilidade (11,9%), que é do carvão seco estocado em ambiente fechado, o teor de umidade desta amostra não ultrapassou os 7%.

Portanto, outro fator que contribuiu para o aumento da friabilidade do carvão vegetal é o revolvimento da carga, onde ocorre a abrasão entre as peças nas pilhas, quebrando-as e aumentando a geração de finos (CARNEIRO et al., 2013). Neste experimento, o revolvimento das pilhas fez-se necessário durante a coleta de amostras para as análises de caracterização de carvão para maior homogeneização das amostras.

Mesmo com o aumento da friabilidade, de acordo com a classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), o carvão vegetal proveniente da madeira de *Corymbia citriodora x Corymbia torelliana* foi considerado pouco friável (10-15% de perdas).

#### 4.1.3 Densidade a granel dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem

Os valores médios de densidade a granel estão apresentados na Tabela 4 e Figura 7. Não houve efeito significativo da interação, apenas efeito isolado do tempo e local de estocagem. Observou-se diferença significativa de tempo somente no mês 4 em relação aos demais. Em relação a condição de armazenamento dos carvões vegetais, os estocados em ambiente semiabertos diferiram significativamente daqueles estocados em ambiente fechado.

**Tabela 4.** Valores médios de densidade a granel do carvão vegetal (kg/m<sup>3</sup>) em função do tempo de estocagem

Condição de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (inicial)	1	2	3	4	
Semiaberto/CV 5% U	242,9	241,6	237,9	239,6	296,9	251,8 a
Semiaberto/CV 10% U	237,3	246,5	227,6	244,3	301,3	251,4 a
Fechado/CV 5% U	237,9	227,3	229,1	225,0	244,6	232,8 b
Fechado/CV 10% U	243,2	238,6	230,1	228,0	240,0	236,0 b
<b>Média</b>	240,3 B	238,5 B	231,2 B	234,2 B	270,7 A	<b>242,9</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

Observa-se que, assim como no teor de umidade, não houve alteração significativa do valor da densidade a granel para o carvão vegetal estocado com 5% de umidade, independentemente do local de estocagem, nos primeiros 90 dias, ou seja, meses 1, 2 e 3, apresentando valores entre 225 e 243 kg/m<sup>3</sup>.

Apesar do maior teor de umidade, o carvão vegetal estocado a 10% de umidade não apresentou diferença estatística no mês 0 em relação aos estocados com 5% de umidade,

também nos meses 1, 2 e 3, independentemente do local de estocagem, apresentando valores entre 227 e 246 kg/m<sup>3</sup>

Entretanto, no mês 4, quando houve incremento pluviométrico na região, logo, o carvão vegetal armazenado em ambiente semiaberto, independentemente do teor de umidade inicial, aumentou em 23% no valor de densidade, apresentando valores médios acima dos 300 kg/m<sup>3</sup>. Já o carvão vegetal estocado em ambiente fechado apresentou valor médio de 245 kg/m<sup>3</sup>, valor 6,5% maior que o mês anterior.

Devido ao ganho significativo do teor de umidade dos carvões estocados em ambiente semiaberto entre o mês 3 e 4, houve incremento na massa do material devido ao acúmulo de água absorvida, elevando, conseqüentemente, sua densidade a granel (COSTA, 2019). Assim, cabe salientar que se o frete da carga for baseado no peso do produto, a presença de água no carvão pode aumentar o preço do transporte (SOMERVILLE; JAHANSHAH, 2015), além de induzir ao erro para pagamento em função de qualidade.

#### *4.1.4 Composição Química imediata dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem*

Não houve efeito dos tratamentos nos teores de materiais voláteis e carbono fixo, somente efeito isolado do tempo de estocagem no teor de cinza dos carvões vegetais.

Os valores médios do teor de cinzas dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem e condição de armazenamento estão apresentados na Tabela 5.

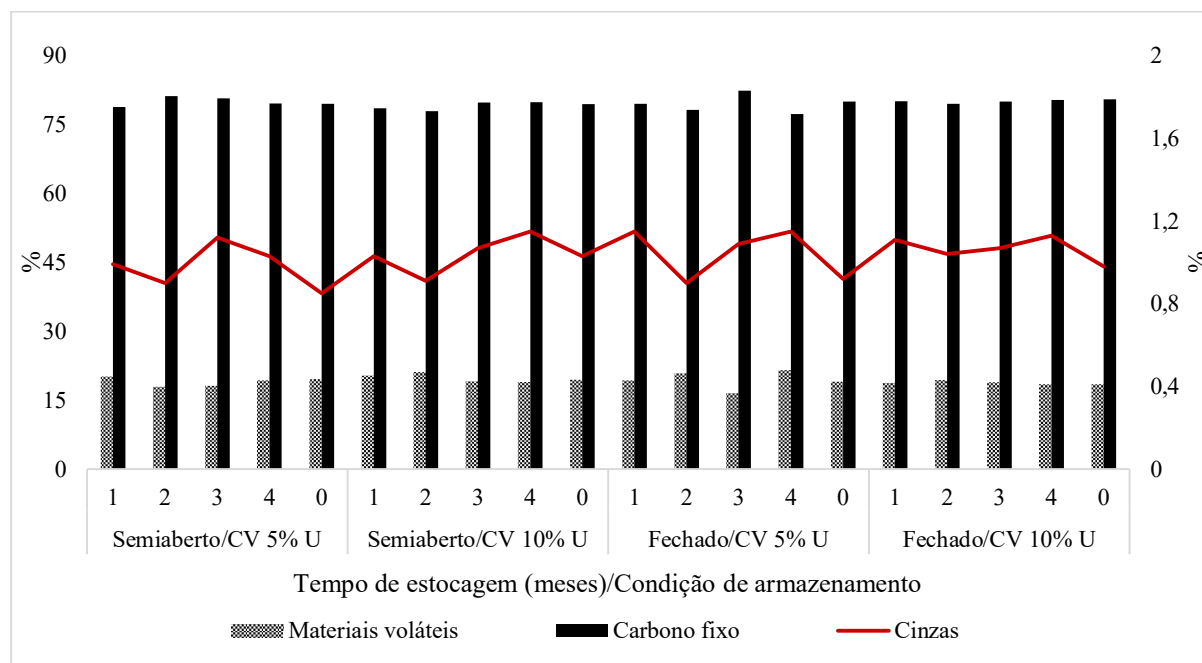
**Tabela 5** - Valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal (%) em função do tempo de estocagem.

Condição de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (inicial)	1	2	3	4	
Semiaberto/CV 5% U	0,9	1,0	0,9	1,1	1,0	1,0
Semiaberto/CV 10% U	1,0	1,0	0,9	1,1	1,2	1,0
Fechado/CV 5% U	0,9	1,2	0,9	1,1	1,2	1,0
Fechado/CV 10% U	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1
<b>Média</b>	0,9 B	1,1 A	0,9 B	1,1 A	1,1 A	<b>1,0</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

A variação do teor de cinzas pode ser justificada pelo fato de que o carvão vegetal estocado em pilhas esteve mais vulnerável à contaminação por particulados suspensos no ar,

mesmo estando armazenado em galpão fechado. Na Figura 8 está representado os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem para as diferentes condições de estocagem.



**Figura 8** – Valores médios de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas em função dos tratamentos

O teor de materiais voláteis variou entre 16,53 e 21,51%, sendo o menor valor referente ao carvão vegetal armazenado com 5% de umidade, ambiente fechado, no mês 3 e o maior valor também é referente a esse tratamento no mês 4.

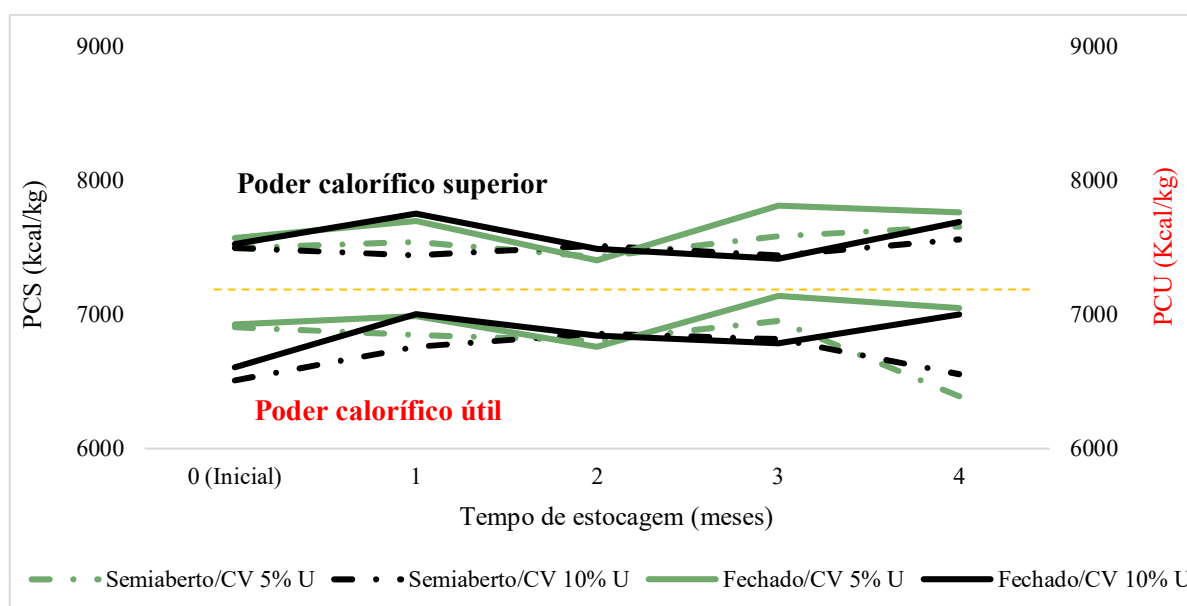
O teor de carbono fixo variou entre 77,34 e 82,39%, o menor valor referente ao carvão vegetal armazenado com 5% de umidade, ambiente fechado e no mês 4 e o maior valor também é referente a esse tratamento no mês 3.

O Selo Premium para carvão vegetal no estado de São Paulo, promulgado pela Resolução nº 40/2015 da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado (São Paulo, 2015) exige que, para cocção, o carvão vegetal tenha teor de carbono fixo maior que 73%, teor de materiais voláteis menor que 23,5% e o teor de cinzas menor que 1,5%.

Durante todo o período de avaliação, nenhum tratamento obteve valores de materiais voláteis e carbono fixo fora do padrão exigido para a utilização do carvão vegetal como biorredutor e para cocção de alimentos, porém a teor de cinzas ficou acima do recomendado para a siderurgia, onde busca-se teor abaixo de 1% (SANTOS, 2008; CARNEIRO et al, 2013; DIAS JÚNIOR et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2019; DIAS JÚNIOR et al, 2020).

#### 4.1.5 Poder calorífico dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem

Na Figura 9 estão apresentadas as variações médias do poder calorífico superior e útil dos carvões vegetais em função do tempo de estocagem para as diferentes condições de estocagem.



**Figura 9** – Variação do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU) dos carvões em função do tempo de estocagem para as diferentes condições de armazenamento.

O poder calorífico superior (PCS) é uma propriedade do carvão vegetal que pode ser definida como a quantidade de calor liberada na combustão completa por unidade de massa de carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2013). Porém, esta propriedade não considera o teor de umidade do material e a energia consumida para evaporação da água presente na biomassa. De acordo com a análise de variância não houve efeito dos tratamentos sobre o poder calorífico superior dos carvões vegetais avaliados neste experimento. Por outro lado, houve interação significativa do tempo de estocagem e condição de armazenamento, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Quando calculado o poder calorífico útil (PCU), leva-se em conta o teor de umidade do material e a energia gasta para secá-lo. Observa-se no gráfico uma queda média de 10% no valor do PCU comparado ao PCS, destacando-se o período inicial, onde os carvões vegetais foram estocados com 10% de umidade e os carvões vegetais estocados em ambiente semiaberto no mês 4, quando ocorreu o incremento no teor de umidade destes materiais.

**Tabela 6** - Valores médios do poder calorífico útil do carvão vegetal (kcal/kg) em função do tempo de estocagem.

Condição de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Semiaberto/CV 5% U	6905 Aa	6847 Aa	6803 Aa	6952 Aa	6389 Bb	6779
Semiaberto/CV 10% U	6509 Ab	6760 Aa	6857 Aa	6816 Aa	6555 Ab	6699
Fechado/CV 5% U	6926 Aa	6987 Aa	6759 Aa	7139 Aa	7046 Aa	6972
Fechado/CV 10% U	6606 Bb	7002 Aa	6842 ABa	6787 ABa	7000 Aa	6847
<b>Média</b>	6737	6899	6816	6924	6748	<b>6824</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

No período inicial (mês 0), nota-se uma diferença de 15% do PCU do carvão vegetal estocado em ambiente semiaberto, com 10% de umidade inicial, em relação ao PCS do mesmo tratamento, enquanto o carvão vegetal estocado em ambiente semiaberto com 5% de umidade apresentou diferença de 8% entre o PCU e o PCS.

Para o carvão vegetal estocado em ambiente fechado, o valor do PCU do carvão vegetal estocado com 10% de umidade foi 13% inferior ao seu PCS e para o carvão vegetal estocado com 5% de umidade, a redução foi de 9%.

Durante os meses 1, 2 e 3, que foi o período de baixa pluviosidade, a diferença entre o PCS e o PCU teve a mesma proporção para todos os carvões vegetais, independentemente do teor de umidade inicial ou do local de estocagem, devido à estabilização do teor de umidade do carvão vegetal estocado.

Porém, no mês 4, os carvões vegetais estocados em ambiente semiaberto, devido ao incremento no teor de umidade, tiveram redução de até 20% em sua capacidade energética.

O teor de umidade é inversamente proporcional a capacidade de fornecimento de energia da biomassa, visto que parte da energia gerada é consumida no próprio processo para evaporação da água presente no material, portanto há um balanço energético desfavorável, reduzindo a energia disponível para outros fins (ORTIZ, 1996; CARROLL; FINNAN, 2012; COSTA et al., 2017).

## 4.2 EXPERIMENTO II

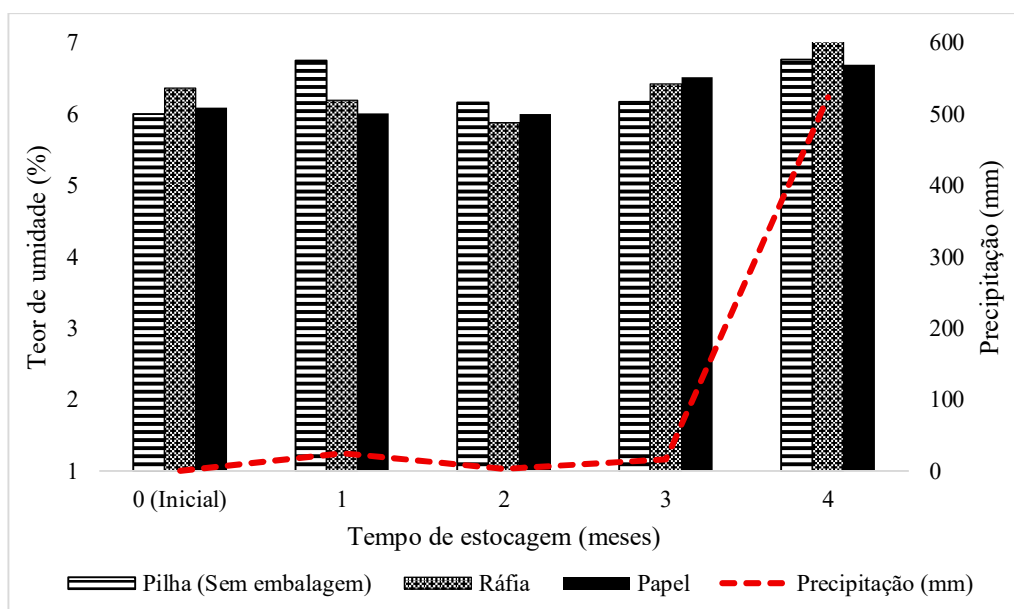
### 4.2.1 Teor de umidade dos carvões vegetais em função do tipo de embalagem e tempo de estocagem

Na Tabela 7 e Figura 10 estão apresentados os valores médios do teor de umidade do carvão vegetal estocado com relação ao tempo e ao tipo de embalagem. Houve apenas efeito isolado do tempo de estocagem no teor de umidade dos carvões vegetais, tendo os meses 3 e 4, maiores valores médios de umidade.

**Tabela 7** - Valores médios do teor de umidade base seca, do carvão vegetal (%) em função do tempo de estocagem.

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	6,00	6,75	6,16	6,17	6,76	6,4
Ráfia	6,36	6,19	5,88	6,42	7,08	6,4
Papel	6,09	6,01	6,00	6,51	6,69	6,3
<b>Média</b>	6,2 B	6,3 B	6,0 B	6,4 B	6,8 A	<b>6,34</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas, na linha, não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.



**Figura 10** – Variação do teor de umidade do carvão vegetal estocado.

Não houve diferença estatística entre os tipos de armazenamento durante os meses avaliados, apenas observa-se alteração significativa no teor de umidade médio no mês 4 em relação aos meses anteriores.

Isto mostra que mesmo armazenado em local fechado e/ou em embalagens, o carvão vegetal possui a tendência de adsorver água do ambiente quando exposto a ambientes de maiores teores de umidade, que neste caso é o período chuvoso.

O carvão vegetal é considerado um material higroscópico e sua capacidade de adsorção está relacionada com a quantidade de grupos hidroxílicos e carboxílicos presentes em sua estrutura e variam de acordo com a temperatura final de carbonização da madeira: quanto maior a temperatura final de carbonização, menor será a quantidade de grupos funcionais hidrofílicos na estrutura do carvão vegetal e, conseqüentemente menor será sua capacidade de adsorção (ANDRADE E DELLA LUCIA, 1995; LIU et al., 2017; COSTA, 2019).

Ainda assim, de acordo com Costa (2019), em ambiente com umidade relativa de 85%, o carvão vegetal tende a apresentar umidade de equilíbrio higroscópico maior que 7%, que o valor máximo desejável para a siderurgia. Durante o período chuvoso, o conseqüente aumento da umidade relativa do ar fez com que o carvão vegetal adsorvesse água do ambiente, aumentando seu teor de umidade sem mesmo entrar em contato direto com a água das chuvas.

Dias Júnior et al. (2021) analisando carvão vegetal comercializado para churrasco observaram que, em épocas diferentes, a mesma marca de carvão vegetal possuía teores de umidade diferentes. Os autores acreditam que esta diferença se dá pelo local onde o produto estava armazenado e ainda sugeriram que, devido à característica higroscópica do carvão vegetal, deve-se evitar o acondicionamento do material em lugar com umidade elevada.

#### **4.2.2 Friabilidade e densidade a granel dos carvões vegetais em função do tipo de embalagem e tempo de estocagem**

Os valores médios de friabilidade estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Valores médios da friabilidade do carvão vegetal (%) em função do tempo de estocagem e do tipo de embalagem

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	7,8	8,7	9,4	11,9	11,9	9,9
Ráfia	8	9	9,4	12,2	10,8	9,9
Papel	7,0	7,8	8,0	9,8	10,7	8,7
<b>Média</b>	7,6 C	8,5 BC	8,9 B	11,3 A	11,1 A	<b>9,5</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas, na linha, não diferem entre si pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

A friabilidade aumentou para todos os tratamentos ao longo do tempo de estocagem, sendo esse incremento significativo a partir do mês 2. Nota-se que o carvão vegetal embalado em sacos de papel apresentou menor friabilidade em relação aos demais, apesar da diferença entre os tratamentos não ser significativa, isso mostra que o saco de papel conferiu mais proteção ao carvão vegetal.

Baseando-se na classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), ao final do tempo de avaliação, independentemente da condição de armazenamento, o carvão vegetal foi classificado como pouco friável (10-15% de perdas). Nota-se que o carvão vegetal estocado em pilhas e em sacos de rafia alterou de muito pouco friável (< 10% de perdas) para pouco friável (10-15% de perdas) a partir do mês 3. Já o carvão vegetal estocado em sacos de papel passou a ser considerado pouco friável somente a partir do mês 4.

Os valores de densidade a granel estão apresentados na Tabela 9. Houve efeito significativo da interação tempo de estocagem e tipo de armazenamento.

**Tabela 9** - Valores médios da densidade a granel do carvão vegetal ( $\text{kg/m}^3$ ) em função do tempo de estocagem e do tipo de embalagem.

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	237,9 ABa	227,4 Ba	229,1 Ba	225,0 Ba	244,6 Ab	232,8
Rafia	220,8 Bb	230,3 Ba	228,7 Ba	210,8 Ba	279,5 Aa	234,0
Papel	220,8 Bb	238,3 Aa	232,7 ABa	222,9 ABa	240,0 Ab	231,0
<b>Média</b>	226,5	232,0	230,2	219,6	254,7	<b>232,6</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos de estocagem e mesmas letras minúsculas entre tipo de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade

Para todos os tipos de armazenamento, a densidade a granel não teve variação significativa nos primeiros meses de estocagem, ou seja, meses 1, 2 e 3, apresentando valores médios de 219,6 a 232  $\text{kg/m}^3$ .

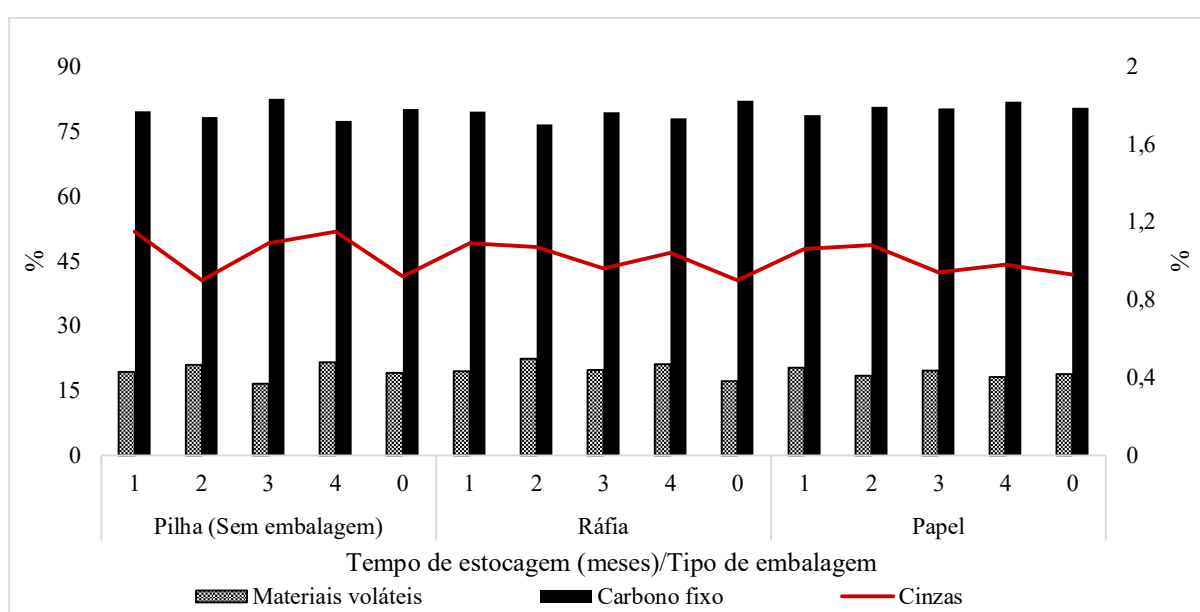
Entretanto, no mês 4, a densidade a granel do carvão vegetal estocado em pilhas e em sacos de rafia diferiram aos demais meses. O carvão vegetal estocado em sacos de papel, não teve alteração significativa.

Nota-se aumento significativo da densidade a granel do carvão vegetal estocado em sacos de rafia no mês 4, devido ao tamanho das partículas de carvão vegetal. Na prática, os

produtores costumam quebrar o carvão vegetal, até mesmo com os pés, para diminuir a granulometria e, conseqüentemente, comportar mais carvão dentro dos sacos de ráfia. O carvão vegetal com menor granulometria ocupa mais espaços vazios, podendo influenciar diretamente na densidade a granel (FIGUEIRÓ, 2018).

#### 4.2.4 Propriedades dos carvões vegetais em função do tipo de armazenamento e tempo de estocagem

Na Figura 12 estão apresentadas as variações dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo das amostras ao longo do tempo de estocagem.



**Figura 12** – Valores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas de todos os tratamentos.

Não houve efeito significativo dos tratamentos no teor de cinzas do carvão vegetal em função dos tratamentos, provavelmente, devido os locais utilizados de armazenamento serem pavimentados.

Houve interação significativa entre os tempos de estocagem e tipo de embalagem para os teores de carbono fixo e materiais voláteis, apresentados na Tabela 10 e 11, respectivamente.

**Tabela 10.** Valores médios do teor de materiais voláteis do carvão vegetal (%) em função do tipo de embalagem e do tempo de estocagem

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	19,1 ABa	19,3 ABa	20,9 Aab	16,5 Bb	21,5 Aa	19,5
Ráfia	17,1 Bb	19,4 ABa	22,4 Aa	19,7 ABa	21,1 Aa	19,9
Papel	18,8 Aab	20,3 Aa	18,4 Ab	19,6 Aab	18,1 Ab	19,0
<b>Média</b>	18,3	19,7	20,6	18,6	20,2	<b>19,5</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

**Tabela 11.** Valores médios do teor de carbono fixo do carvão vegetal (%) em função do tipo de embalagem e do tempo de estocagem

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	80,0 ABb	79,6 ABa	78,2 Bab	82,4 Aa	77,34 Bb	79,5
Ráfia	82,0 Aa	79,5 ABa	76,5 Bb	79,3 ABb	77,9 Bb	79,0
Papel	80,3 Aab	78,7 Aa	80,5 Aa	80,2 Aab	81,77 Aa	80,3
<b>Média</b>	80,8	79,2	78,4	80,6	79,0	<b>79,61</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

O carvão vegetal, assim como a madeira, possui característica heterogênea, ou seja, suas propriedades variam até mesmo dentro de uma mesma peça. Wang et al. (2017) também observaram essa tendência no seu estudo com estocagem de carvão vegetal de eucalipto.

A variação do teor de materiais voláteis do carvão vegetal estocado em pilha ao longo do tempo foi significativa, sendo o menor valor correspondente ao mês 3 (16,5%) e o maior valor correspondendo ao mês 4 (21,5%). A diferença estatística encontrada nas amostras de carvão vegetal estocadas em sacos de rafia ao longo do tempo é somente em relação ao teor inicial (mês 0), que apresentou 17,1%, enquanto os meses 1, 2, 3 e 4 tiveram valores de 19,4%, 22,4%, 19,7% e 21,1%, respectivamente. O teor de materiais voláteis presentes no carvão vegetal estocado em sacos de papel variou de 18,1 a 20,3% diferindo dos demais quanto ao tipo de estocagem. Nos meses 2, 3 e 4 houve diferença significativa nos valores de materiais voláteis

entre os tipos de armazenagem, sendo o maior valor obtido para o carvão vegetal estocado em saco de rafia no mês 2 (22,4%) e o menor valor naqueles estocados em pilhas no mês 3 (16,5%). No mês 4 de estocagem, o carvão vegetal estocado em sacos de papel apresentou menor teor de materiais voláteis (18,1%) quando comparado com os carvões estocados em pilhas (21,5%) e sacos de rafia (21,1%).

O teor de carbono fixo do carvão vegetal estocado em pilha variou de 77,3 a 82,4%, sendo o menor valor correspondente ao mês 4 e o maior correspondente ao mês 3. A variação do teor de carbono fixo do carvão vegetal estocado em sacos de rafia foi de 76,5 (mês 2) a 82,0% (mês 0). O teor de carbono fixo do carvão vegetal estocado em sacos de papel não alterou significativamente ao longo do tempo de estocagem.

O carvão vegetal estocado em pilhas teve maior teor de cinzas, chegando à 1,15% no mês 1 e 4. Apesar de não haver diferenças significativas, nota-se que os carvões armazenados em embalagens (1,09%) tiveram menores alterações nos valores médios de cinzas. O coeficiente de variação para a amostra estocada em pilhas foi de 1,5%, enquanto o coeficiente de variação do carvão vegetal estocado em embalagens foi de 0,6%. Esta variação pode ser justificada pelo fato de que o carvão vegetal embalado está mais protegido de materiais particulados suspensos no ambiente que podem depositar sobre o material e colaborar para maior teor de cinzas.

Santos et al. (2016) recomendam que, para uso siderúrgico, o ideal seja que o teor de cinzas do carvão vegetal esteja inferior a 1%, para evitar contaminação e possível desgaste no alto-forno, comprometendo a qualidade do ferro-gusa com consequentes formações de trincas e fissuras. Porém na prática, quando o carvão é retirado do forno e estocado em pilhas para a estabilização da temperatura antes do transporte, normalmente são colocados em pátios não pavimentados, levando à contaminação da carga e, conseqüentemente, elevando o teor de cinzas do carvão vegetal.

De acordo com a literatura consultada e o Selo Premium (SÃO PAULO, 2015) os valores de teor de materiais voláteis e carbono fixo estão adequadas para a utilização do carvão vegetal como biorredutor e para cocção de alimentos (SANTOS, 2008; CARNEIRO et al, 2013; DIAS JÚNIOR et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2019; DIAS JÚNIOR et al., 2020).

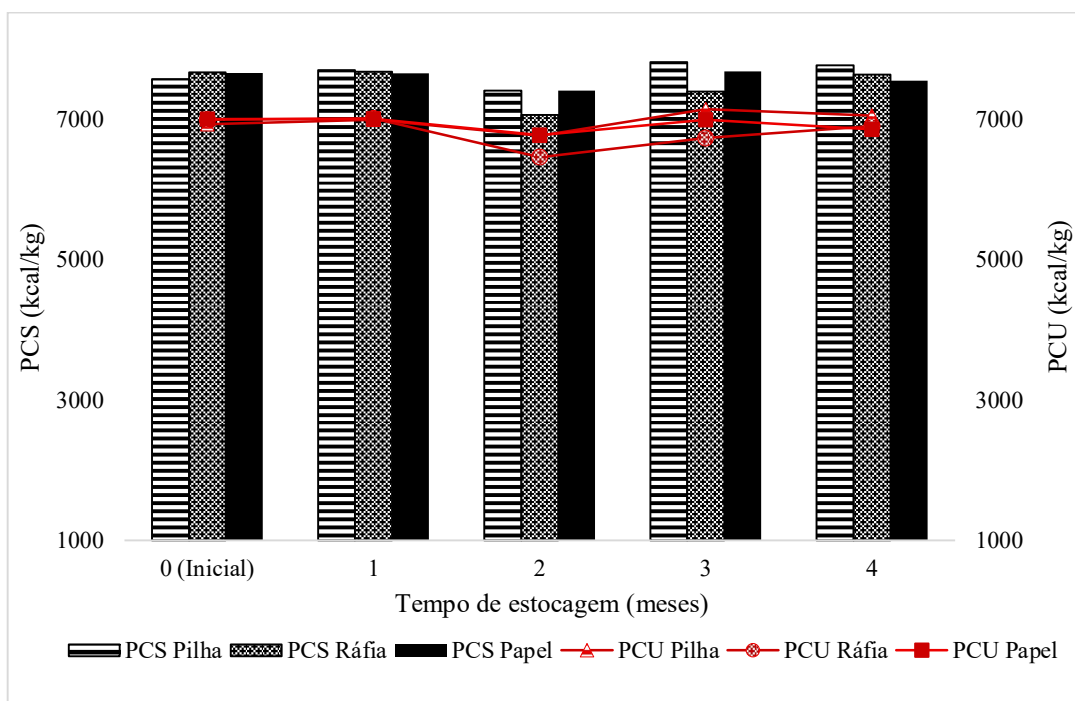
Os valores do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil estão apresentados na Tabela 12 e Figura 13.

**Tabela 12.** Valores médios do poder calorífico superior (kcal/kg) em função do tipo de embalagem e do tempo de estocagem

Tipo de armazenamento	Tempo de estocagem (meses)					Média
	0 (Inicial)	1	2	3	4	
Pilha (Sem embalagem)	7568 BCa	7697 ABa	7404 Ca	7810 Aa	7762 ABa	7648
Ráfia	7664 Aa	7672 Aa	7058 Cb	7392 Bb	7631 Aab	7483
Papel	7652 Aa	7650 Aa	7404 Ba	7679 Aa	7547 ABb	7586
<b>Média</b>	7628	7673	7288	7627	7647	<b>7573</b>

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre condição de armazenamento não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

Houve diferença estatística entre todos os tratamentos nos meses 2, 3 e 4. De acordo com Oliveira et al. (2019), o poder calorífico superior do carvão vegetal é influenciado positivamente principalmente pelo teor de carbono fixo presente em sua composição, bem como o teor de hidrogênio elementar. Portanto, a redução no poder calorífico superior do carvão vegetal armazenado em saco de rafia pode ser justificada pelo menor teor de carbono fixo obtido na amostra (76%).



**Figura 13** – Variação do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU).

Nota-se que o poder calorífico útil ficou ligeiramente menor em relação ao poder calorífico superior, devido ao teor de umidade presente nas amostras de carvão vegetal. Como não houve grande variação no teor de umidade dos carvões vegetais em função dos tratamentos, não se observou diferenças significativas, também, no tipo de armazenagem e tempo de estocagem no poder calorífico útil. Para todos os tipos de embalagem, independentemente do tempo, os valores médios o poder calorífico superior foi reduzido, em média, em 9%.

Para o uso doméstico, ou seja, cocção, o poder calorífico do carvão vegetal é uma propriedade relevante, pois quando maior o poder calorífico do meu material, maior será sua eficiência na preparação de alimentos (ANATER et al., 2021). Porém, vale destacar que, por se tratar de um material higroscópico, o PCS do carvão vegetal é apenas um valor teórico e seu teor de umidade deve ser levado em consideração para determinar sua real eficiência energética, daí a necessidade de calcular o PCU (OLIVEIRA et al., 2019).

## 5. CONCLUSÕES

### EXPERIMENTO I

- Durante os períodos de baixas pluviosidades, o local de estocagem não influencia as propriedades do carvão vegetal;
- Durante os períodos chuvosos, locais semiabertos não oferecem proteção suficiente;
- O carvão estocado em ambiente semiaberto apresentou maior densidade a granel e menor poder calorífico útil devido à alta umidade no ambiente no último mês de coleta;
- A friabilidade aumentou em todos os ambientes, porém o carvão vegetal ainda foi classificado como pouco friável;
- O local de estocagem não influenciou significativamente a química imediata do carvão vegetal;
- Recomenda-se estocar o carvão em local fechado devido à maior proteção da carga durante os períodos chuvosos.

### EXPERIMENTO II

- O teor de umidade do carvão vegetal não foi afetado pelo tipo de armazenamento ao longo do período estudado;
- A friabilidade aumentou para todos os tratamentos, sendo o carvão embalado em saco de papel o que obteve menor variação desta propriedade ao longo do tempo;
- A densidade a granel do carvão embalado em saco de ráfia aumentou devido ao aumento de moinha;
- A química imediata e o poder calorífico do carvão vegetal não foram afetados pelo tipo de estocagem;
- Para empacotamento é melhor estocar o carvão já embalado devido à maior proteção da carga quanto a geração de finos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philadelphia: 1982

ANATER, M. J. do N.; SANQUETTA, C. R.; BRAND, M. A.; SILVA, D. A.; CORTE, A. P. D.; Análise da qualidade do carvão vegetal para uso residencial na região de Curitiba, Paraná, Brasil. **Sciencia Florestalis**, Piracicaba, SP, v. 47, n. 123, p. 494-504, 2019.

ANDRADE, A. M. de; DELLA LUCIA, R. M. Avaliação da higroscopicidade do carvão vegetal e seus efeitos na resistência ao esmagamento. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 2, p. 19-26, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**: Carvão vegetal - Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981, 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.929** Madeira - determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest ecology and management**, v. 301, p. 28-34, 2013.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H.; Bioenergia e Biorefinarias: cana-de-açúcar e espécies florestais. Ed. UFV, **Viçosa**, p. 429-457, 2013

CARROLL, J. P.; FINNAN, J.; Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Séries Técnicas **CETEC**, Belo Horizonte, 393 p. 1982.

COSTA, L. J. **Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.

DIAS JÚNIOR, A. F. PIROLA, L. P.; TAKESHITA, S.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; DE ANDRADE, A. M.; Higrscopicity of charcoal produced in different temperatures. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 423-430, 2016.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; MILAN, M.; BRITO, J. O.; DE ANDRADE, A. M.; DE SOUZA, N. D.; Quality function deployment (QFD) reveals appropriate quality of charcoal used in barbecues. **Scientia Agricola**, v.77, n.6, p. 1-11, 2020.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; LANA, A. Q.; DA SILVA, A. M.; BRITO, J. O.; MILAN, M.; Tips on the variability of BBQ charcoal characteristics to assist consumers in product choice. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79 p. 1017-1026, 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro. 2022.

EVANGELISTA, W.V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007

FIGUEIRÓ, C. G.; **Caracterização espacial das propriedades do carvão vegetal em estoques industriais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Estação Climatológica de Viçosa. **Boletim meteorológico 2022**, Viçosa, MG; UFV, 2022

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS (CETEC). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27-41.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES.; **Relatório Anual 2021**: ano base 2020. Brasília, DF: IBA, 2021.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES.; **Relatório Anual 2022**: ano base 2021. Brasília, DF: IBA, 2022.

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**, 73(6), 709-717 2014a.

KYMÄLÄINEN, M., HAVIMO, M., KERIÖ, S., KEMELL, M., & SOLIO, J. Biological degradation of torrefied wood and charcoal. **Biomass and Bioenergy**, 71, 170-177, 2014b.

LIU, L. et al. Water adsorption on carbon: a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 250, p. 64-78, Dec. 2017.

OLIVEIRA, R. S.; DA SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-9, 2019

ORTIZ, L.; Influencia del contenido de humedad en el Poder Calorífico. In: Aprovechamiento energético de la biomasa/forestal. **GAMASEL**, Torrecedeira, 92. 330 p., 1996.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília.

SANTOS, R.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; CASTRO, R.V.O.; VIDAURRE, G.B.; TRUGILHO, P.F.; CASTRO, A.F.N.M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2022**, ano base 2021. Belo Horizonte, MG: SINDIFER, 2022.

SOARES, J. D; DE PAULA, M. O.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, L. J., OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; Parameters to determine mechanical strength of charcoal in a hydraulic press. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, p. 1-6, 2021.

SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. **Renewable Energy**, Oxford, v. 80, n. 8, p. 471-478, 2015.

WANG, L.; BARTA-RAJNAI, E.; HU, K.; HIGASHI, C.; SKREIBERG, Ø.; GRØNLI, M.; CZÉGÉNY, Z.; JAKAB, E.; MYRVÅGNES, V.; VÁRHEGYI, G.; ANTAL, M. J. Jr. Biomass charcoal properties changes during storage. **Energy Procedia**, v. 105, p. 830-835, 2017.

WANG, L., BUVARP, F., SKREIBERG, Ø., & KHALIL, R. A. Impact of storage time and conditions on properties of biocarbon, **The Italian Association of Chemical Engineering**, V. 65, p. 715, 2018.