



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**ANA BEATRIZ MARTINS SOARES**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO DE CARVÕES  
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL POR MEIO DA  
ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)**

Imperatriz - MA

2024

**ANA BEATRIZ MARTINS SOARES**

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO DE CARVÕES  
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL POR MEIO DA  
ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - UEMASUL, como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Michael Douglas Roque Lima

Imperatriz - MA

2024

S676e

Soares, Ana Beatriz Martins

Estimativa da temperatura final de carbonização de carvões provenientes de resíduos do manejo florestal por meio da Espectroscopia no Infravermelho próximo (NIR). / Ana Beatriz Martins Soares. – Imperatriz, MA, 2024.

33 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2024.

1.Materias residuais. 2.Carbonização. 3. Temperatura. 4. Imperatriz - MA. I. Título.

CDU 662.711/.712

Ficha elaborada pelo Bibliotecário: **Jennifer Rabelo Pires CRB13/987**

**ANA BEATRIZ MARTINS SOARES**

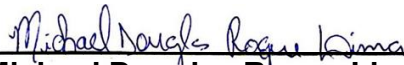
**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO DE CARVÕES  
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL POR MEIO DA  
ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Michael Douglas Roque Lima

Aprovado em: 06 / 08 / 2024

BANCA EXAMINADORA



---

**Michael Douglas Roque Lima**  
Prof. Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira - UEMASUL  
(Orientador)

---

**Joabel Raabe**  
Prof. Doutor em Ciências Florestais - UEMASUL  
(Membro 1)

---

**Diogenis Fontenele Ferreira Junior**  
Prof. Mestre em Ciências Florestais e Ambientais - UEMASUL  
(Membro 2)

*Dedico este trabalho a um anjinho que agora está na casa do Pai. Analú, a saudade que sinto de você é imensa, e viver sem a sua presença tem sido um grande desafio. Peço que cuide de nós aí de cima. Daqui, continuo a te amar eternamente.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar e fortalecer em cada etapa da minha trajetória.

À minha família, por serem a engrenagem e combustível da minha vida. Agradeço pelo amor incondicional e pelo suporte constante, vocês são minha fonte de inspiração e meu porto seguro em todos os momentos.

Agradeço em especial a minha mãe Ana Martins, por todo o esforço e sacrifício, que mesmo eu tendo que mudar de cidade e sem muitas condições conseguiu me apoiar, para que eu pudesse alcançar meus objetivos acadêmicos.

Ao meu namorado e aos meus amigos de vida, que sempre estiveram ao meu lado, compartilhando alegrias e dificuldades, o incentivo de vocês foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar mais esta meta.

Aos amigos que fiz na faculdade, com quem compartilhei tantos momentos seja na sala de aula ou nas aulas práticas nas florestas que foram sofridos e alegres, mas sobretudo foram únicos. Agradeço em especial Amanda Melo, pela parceria, apoio mútuo e por tornar essa jornada mais leve e divertida, sem você com certeza, mais essa conquista não conseguiria seria possível.

Meus agradecimentos à UEMASUL que foi minha segunda casa ao longo desses anos, foi um lar de desafios, qualificação e transformação. Agradeço a todos os professores, vocês não apenas me ensinaram conhecimentos técnicos, me ajudaram a ser uma cidadã mais crítica, e um ser humano melhor para as pessoas e para o meio ambiente. Agradeço em especial, ao professor e orientador Dr. Michael Douglas Roque Lima, que de forma honrosa contribuiu não só para construção desse trabalho, mas para a profissional que serei. Aos membros da banca de defesa Dr. Joabel Raabe e Me. Diogenis Fontenele, agradeço pelos ensinamentos ao longo da graduação, e por aceitarem o convite de participarem desse momento tão importante, com certeza terei valiosas contribuições.

O meu muito obrigada!

## RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de carvão vegetal, essencial para as indústrias siderúrgicas e metalúrgicas. Garantir a qualidade do carvão requer o monitoramento preciso de parâmetros, como a temperatura durante a carbonização. Nesse cenário, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), vem se destacando como uma técnica analítica avançada e promissora para otimizar o controle e a qualidade de diversos produtos. O presente estudo teve como objetivo avaliar a acurácia de modelos multivariados ajustados com dados espectrais de resíduos lenhosos amazônicos para estimar a temperatura final de carbonização. Foram utilizadas amostras de resíduos de seis espécies tropicais, carbonizadas em laboratório a quatro diferentes temperaturas finais (400, 500, 600 e 700 °C). Os dados espectrais foram coletados nas faces radial e transversal dos carvões. As leituras espectrais foram analisadas usando Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA) para avaliar o potencial do NIR na classificação dos carvões em faixas de temperatura. A PCA foi eficaz em segmentar as amostras com base nas diferentes faixas de temperatura, mas não conseguiu distinguir todas as amostras devido a sobreposições espectrais. Em contraste, a PLS-DA apresentou um desempenho superior, classificando corretamente mais de 89% das amostras. Dados da face radial, sem tratamento matemático, mostraram uma classificação correta de 96% dos carvões avaliados. Assim, é possível perceber que o NIR é sensível na separação de carvões em grupos de temperatura, sendo portanto uma ferramenta útil tornar o processo mais eficiente e sustentável.

Palavras-chaves: madeira residual; carbonização; NIR; qualidade; temperatura.

## ABSTRACT

Brazil is one of the largest producers of charcoal, which is essential for the steel and metallurgical industries. Ensuring the quality of charcoal requires precise monitoring of parameters such as the temperature during carbonization. In this context, near-infrared spectroscopy (NIR) has emerged as an advanced and promising analytical technique to optimize the control and quality of various products. This study aimed to evaluate the accuracy of multivariate models adjusted with spectral data from Amazonian woody residues to estimate the final carbonization temperature. Samples of residues from six tropical species were carbonized in the laboratory at four different final temperatures (400, 500, 600, and 700 °C). Spectral data were collected from the radial and transverse faces of the charcoals. The spectral readings were analyzed using Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) to assess the potential of NIR in classifying the charcoals into temperature ranges. PCA was effective in segmenting the samples based on different temperature ranges but was unable to distinguish all samples due to spectral overlaps. In contrast, PLS-DA showed superior performance, correctly classifying more than 89% of the samples. Data from the radial face, without mathematical treatment, showed a correct classification of 96% of the evaluated charcoals. Thus, it is evident that NIR is sensitive in separating charcoals into temperature groups, making it a useful tool for making the process more efficient and sustainable.

**Keywords:** residual wood; carbonization; NIR; quality; temperature.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de aquisição dos corpos de prova .....	19
Figura 2 - Esquema do sistema de carbonização laboratorial.....	20
Figura 3 - Média dos espectros coletados das amostras de carvão na face radial (A) e transversal (B).....	22
Figura 4 - Picos de absorção notáveis nas médias dos espectros na temperatura de 400 °C e 500 °C na face radial (A) e transversal (B)..	22
Figura 5 - Scores da análise de componentes principais de dados espectrais obtidos na superfície radial (A - espectro bruto; C - espectros tratados com a primeira derivada; e E - espectros tratados com a segunda derivada) e transversal (B - espectros brutos; D - espectros tratados com a primeira derivada; e F - espectros tratados com a segunda derivada) de amostras de carvão vegetal produzidas em escala laboratorial em 4 temperaturas diferentes.....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espécies selecionadas para o estudo. ....	18
Tabela 2 - Resumo das classificações das amostras de carvões vegetais através da análise PLS-DA e método de validação cruzada, considerando a superfície de aquisição dos espectros e o pré-tratamento matemático utilizado. ....	27
Tabela 3 - Classificação de amostras de madeira por espécie através de PLS-DA utilizando validação cruzada e um conjunto de teste de dados espectrais da superfície radial sem tratamento.....	28

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Processos de produção de carvão vegetal e impactos na qualidade do produto .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR).....</b>	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) na análise de carvão vegetal .....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1</b>	<b>Origem dos resíduos madeireiros .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2</b>	<b>Coleta de amostras e identificação botânica dos resíduos.....</b>	<b>18</b>
<b>4.3</b>	<b>Processo de carbonização laboratorial.....</b>	<b>19</b>
<b>4.4</b>	<b>Coleta de espectros no NIR.....</b>	<b>20</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise estatística multivariada .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>Espectros NIR.....</b>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise de componentes principais .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3</b>	<b>Validação cruzada de modelos de classificação de carvão .....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um importante biocombustível renovável, sendo utilizado na indústria como biorredutor na produção de ferro-gusa e aço (Rodrigues e Junior, 2019). O carvão vegetal é amplamente utilizado, especialmente em indústrias siderúrgicas e metalúrgicas, devido à sua interessante densidade energética e propriedades redutoras. O Brasil é o 9º produtor de aço do mundo, responsável por mais de 34 milhões de toneladas de aço bruto anualmente (IAB, 2023).

No Brasil, o setor de siderurgia e aço produziu 7,8 milhões de toneladas de ferro-gusa a partir de carvão vegetal em 2022, representando 24,1% da produção total de ferro-gusa (SINDIFER, 2023). Os produtores de carvão vegetal, têm sido cada vez mais pressionados por uma produção mais limpa com baixos índices de poluição (Santos *et al.*, 2012). A busca por alternativas que atendam a todos estes desígnios de forma econômica, leva à busca de novas matérias primas e processos mais eficientes, visando a redução dos gases intensificadores do efeito estufa.

A principal fonte de matéria prima para produção de carvão são madeiras de eucalipto (Rodrigues e Junior, 2019). Contudo, na região norte e nordeste do país, os plantios são incipientes (IBÁ, 2023). Assim surge, a produção de carvão vegetal a partir de resíduos madeireiros, uma prática que tem ganhado destaque como uma prática sustentável e eficiente.

De acordo com a instrução normativa do Ibama/MMA nº 15, de 6 de dezembro de 2011 (Brasil, 2011), são considerados resíduos da exploração florestal: galhos, sapopemas, restos de troncos de árvores provenientes das árvores exploradas (árvores derrubadas), que podem ser utilizados como produtos secundários do manejo florestal para a produção de madeira e energia. O aproveitamento da biomassa residual constitui uma importante estratégia de sustentabilidade e uso racional para a atividade madeireira no Brasil (Santos *et al.*, 2024).

Para assegurar a qualidade do carvão, é essencial monitorar diversos parâmetros ao longo do processo de carbonização, especialmente a sua temperatura final, pois esta influencia diretamente nas características físicas e químicas do produto (Lima *et al.*, 2022). A temperatura e a velocidade de aquecimento na pirólise podem influenciar a qualidade e o rendimento do carvão vegetal (Silva *et al.*, 2018). Assim, verificamos a importância de acompanhar a temperatura com precisão, visando

otimizar o processo e tornar mais eficiente o aproveitamento energético dos resíduos gerados na Amazônia (Silva *et al.*, 2020).

Uma das técnicas que podem ser utilizadas para monitorar a qualidade do carvão vegetal é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Uma técnica analítica avançada que permite a análise rápida e não destrutiva das propriedades dos materiais, que tem sido utilizada em diferentes ramos da indústria de base florestal (Nisgoski *et al.*, 2016). Em relação ao estudo do carvão vegetal, a espectroscopia NIR pode detectar variações na composição química e nas características físicas. Além disso, pode ser empregada para estimar propriedades do carvão a partir dos espectros adquiridos da madeira antes do processo de pirólise (Silva *et al.*, 2014).

O presente estudo possui relevância para a ciência da madeira, pois busca desenvolver um modelo estatístico que possa classificar o carvão em faixas de temperatura com base nos dados espectrais. A implementação de tais modelos pode levar a processos de produção mais eficientes e sustentáveis, melhorando a qualidade do carvão vegetal e reduzindo os impactos ambientais associados à sua fabricação.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Investigar a acurácia de modelos multivariados ajustados com base em dados espectrais de resíduos lenhosos amazônicos para estimar a temperatura final de carbonização.

### **2.2 Objetivos específicos**

Identificar as variações nas assinaturas espectrais dos carvões vegetais submetidos a diferentes temperaturas de carbonização usando o NIR.

Desenvolver e validar modelo estatístico para classificar os carvões de resíduos lenhosos em classes de temperatura.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processos de produção de carvão vegetal e impactos na qualidade do produto

A produção de carvão vegetal é uma das principais utilizações da madeira e de seus resíduos, desempenhando um papel vital no aproveitamento sustentável dos recursos florestais (Júnior *et al.*, 2021). Esta prática é especialmente relevante no Brasil, um dos maiores produtores e consumidores de carvão vegetal no mundo (IBÁ, 2023). O carvão vegetal tem grande importância industrial, principalmente como agente redutor na produção de ferro-gusa e aço (Rodrigues; Júnior, 2019). A eficiência e a qualidade do carvão vegetal produzido são fortemente influenciadas pelo método de produção adotado.

No Brasil, a maioria da produção de carvão vegetal, entre 60% e 80%, é realizada em fornos rudimentares de alvenaria (Araújo *et al.*, 2018). Esses fornos são preferidos por pequenos e médios produtores devido ao seu baixo custo de instalação e manutenção, comparado aos fornos industriais de maior capacidade volumétrica, que requerem um investimento inicial significativamente maior (Oliveira *et al.*, 2013).

Apesar de seu custo acessível, os fornos rudimentares apresentam limitações no controle dos parâmetros de carbonização, como temperatura e taxa de aquecimento, o que compromete a uniformidade do carvão vegetal produzido (Oliveira *et al.*, 2013). A homogeneidade é essencial para garantir a eficiência e a estabilidade no uso do carvão vegetal em aplicações industriais (Silva *et al.*, 2020). Essas variações de qualidade são um grande desafio, pois afetam diretamente o desempenho do carvão vegetal como fonte de energia.

Assim, observa-se que temperaturas diferentes resultam em variações na densidade, teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior do carvão vegetal. Lima *et al.* (2022) verificou efeito da interação espécie x temperatura final de carbonização no rendimento em carvão vegetal e consumo específico de lenha para carvões derivados dos resíduos do manejo florestal. Estudos de Picancio *et al.* (2018), demonstram que o aumento do teor de carbono fixo é resultante do aumento da temperatura final de carbonização. Portanto, controlar a temperatura com precisão permite otimizar o processo para atender às necessidades

específicas das aplicações industriais (Araújo *et al.*, 2018), bem como melhorar a qualidade do carvão vegetal.

Além do sistema de produção empregado, a qualidade do carvão vegetal é influenciada por diversos fatores, incluindo a espécie de madeira utilizada, já que diferentes tipos de madeira possuem características distintas que afetam o processo de carbonização e as propriedades do carvão resultante (Loureiro *et al.*, 2021). Esse sistema desempenha um papel importante na determinação das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal (Araújo *et al.*, 2018).

Dessa forma, as variações na qualidade do carvão vegetal são atribuídas às condições e fatores de todo o processo de carbonização, que incluem desde a seleção da matéria-prima até o controle dos parâmetros de carbonização (Rocha *et al.*, 2017).

### **3.2 Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR)**

NIR deriva do termo inglês *Near Infrared Spectroscopy*, é uma técnica não destrutiva que, segundo Costa (2017), tem sido amplamente aplicada para estimar características de materiais orgânicos que contêm em suas moléculas ligações C-H, O-H, N-H ou S-H. Sua versatilidade e rapidez têm permitido seu uso em diversos setores, desde a agricultura até a indústria florestal e alimentícia, tornando-se uma ferramenta valiosa na análise de compostos complexos.

De acordo com Barcellos (2007), o NIR já demonstrou sua eficácia no segmento agrícola, onde é utilizado para monitorar a qualidade de grãos, solo e outros produtos agrícolas. Outros setores industriais, como o de biocombustíveis e o farmacêutico, têm explorado essa tecnologia para aplicações no controle de processos e qualidade de produtos, aproveitando sua capacidade de fornecer resultados rápidos e precisos sem a necessidade de preparo destrutivo das amostras.

As análises realizadas com NIR geralmente envolvem o uso de um ou mais softwares estatísticos avançados, que permitem a identificação, qualificação e quantificação das amostras. Esses softwares facilitam a criação de modelos preditivos robustos, que podem ser utilizados para prever características químicas e físicas com alta precisão. O NIR é atualmente um dos métodos de análise química mais acessíveis no mercado, destacando-se pela sua combinação de praticidade e eficiência (Barcellos, 2007).

Essa tecnologia vem sendo utilizada pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) e tem apresentado avanço significativo na fiscalização ambiental, especialmente na identificação de madeiras e carvões. Essa ferramenta permite que os agentes realizem análises rápidas e precisas em campo, distinguindo entre espécies nativas e exóticas de forma não destrutiva. Assim, aumenta a eficiência na detecção de produtos florestais de origem ilegal, combatendo o desmatamento e promovendo a preservação da biodiversidade.

### **3.3 Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) na análise de carvão vegetal**

A produção de carvão vegetal enfrenta inúmeros desafios relacionados à qualidade do produto e à eficiência do processo de carbonização. Para superar esses obstáculos, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) emerge como uma técnica analítica inovadora e promissora.

Ela tem se mostrado uma ferramenta eficaz para a análise das propriedades de diversos materiais. Segundo Ramalho *et al.* (2019), a aplicação da NIR tem sido bem-sucedida em várias áreas devido à sua capacidade de realizar análises rápidas e precisas. Essa tecnologia permite uma significativa redução de custo e tempo gasto em análises laboratoriais de rotina (Pasquini, 2018).

Uma das grandes vantagens da espectroscopia NIR é a possibilidade da coleta de dados de espectros de refletância difusa de amostras sólidas e em pó (Hopkinson *et al.*, 2018). Essa técnica envolve uma análise direta sem a necessidade da preparação prévia da amostra, tornando-a altamente eficiente e prática (Magalhães *et al.*, 2022). Por ser não destrutiva, a técnica NIR é considerada uma análise rápida e segura (Zhao *et al.*, 2018).

A confiabilidade e a rapidez da NIR a torna valiosa para agrupar espécies de madeira semelhantes na produção de carvão vegetal (Lima *et al.*, 2022). Essa capacidade de distinção é especialmente relevante no contexto da produção de carvão, onde a uniformidade e a qualidade do produto são cruciais. Estudos realizados por Costa *et al.* (2018) demonstraram que a NIR pode distinguir carvão vegetal produzido a diferentes temperaturas de carbonização, o que é essencial para o controle de qualidade e a otimização do processo.

O estudo de Li *et al.* (2023) destaca que a tecnologia NIR se concentra na análise dos grupos funcionais orgânicos do carvão, o que pode limitar sua aplicação na determinação da qualidade do carvão, especialmente em relação à análise de múltiplos elementos, como aqueles que formam cinzas. No entanto, essas limitações podem ser parcialmente superadas pelo desenvolvimento de modelos de calibração mais precisos e pela combinação do NIR com outras técnicas analíticas.

A utilização da NIR para avaliar as propriedades do carvão vegetal em escala laboratorial tem sido explorada nos últimos 13 anos (Lima *et al.*, 2024), evidenciando sua relevância e potencial na pesquisa e na indústria. A crescente aplicação dessa técnica reforça a necessidade de aprofundar os estudos nessa área, conforme a tecnologia continua a evoluir e a oferecer novas possibilidades para a análise e a melhoria da produção de carvão vegetal.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Origem dos resíduos madeireiros

As madeiras residuais foram originárias do pátio de estocagem de resíduos da unidade de produção de carvão vegetal da Fazenda Rio Capim (UPC Rio Capim), localizada em Paragominas, no Estado do Pará. Pertence ao grupo Keilla, e sua operação é licenciada pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS - PA). Nessas áreas são realizadas práticas de manejo florestal sustentável para minimizar o impacto ambiental das suas operações.

### 4.2 Coleta de amostras e identificação botânica dos resíduos

Para este estudo, seis espécies tropicais distintas foram selecionadas com base na pesquisa de Lima *et al.* (2020), abrangendo uma variedade de densidades, incluindo baixa (0,300-0,500 g cm<sup>-3</sup>), média (0,500-0,750 g cm<sup>-3</sup>) e alta (0,750-1,000 g cm<sup>-3</sup>), conforme a classificação de Csanády *et al.* (2015). A relação das espécies escolhidas está detalhada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Espécies selecionadas para o estudo.

Nome científico	Família	Nome vulgar	DB (g cm <sup>-3</sup> )*
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Fabaceae	Angelim-vermelho	0,927 ± 0,010
<i>Caryocar</i> sp.	Caryocaraceae	Pequiarana	0,701 ± 0,015
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Fabaceae	Timborana	0,790 ± 0,006
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	Anacardiaceae	Tapiririca	0,397 ± 0,016
<i>Simaba guianensis</i> (Aubl.) Engl.	Simaroubaceae	Marupá amarelo	0,354 ± 0,029
<i>Brosimum gaudichaudii</i> Trécul	Moraceae	Inharé	0,599 ± 0,029

DB = Densidade Básica.

Fonte: Lima *et al.* (2022).

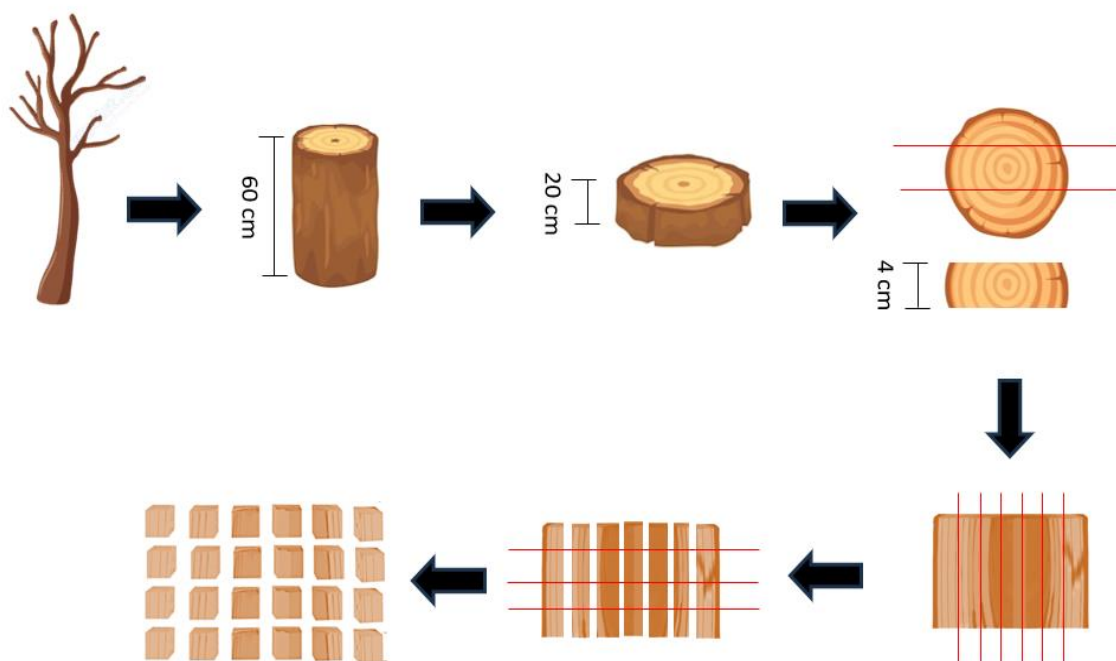
A densidade básica da madeira foi uma variável considerada na escolha das espécies devido ao fato de que essa está diretamente relacionada com a produção de

energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por unidade de volume (Pereira *et al.*, 2012).

No pátio de estocagem, ocorreu o processo de identificação e sinalização das espécies nas pilhas de resíduos, com o auxílio de um identificador botânico. Em seguida, as peças foram realocadas por uma carregadeira Volvo L90 F e encaminhadas para a etapa de preparação, na qual os resíduos foram seccionados em seis toretes de madeira por espécie, cada um medindo 60 cm de comprimento. Posteriormente, com motosserra foi seccionado cada torete, retirando um disco de madeira com uma espessura de 20 cm.

Estes discos foram então encaminhados para a fase de carbonização em laboratório e para análises espectrais. A partir dos discos de 20 cm de espessura, foram produzidos um total de 72 corpos de prova (4 x 4 x 3 cm) para cada espécie (Figura 1).

**Figura 1** - Esquema de aquisição dos corpos de prova.



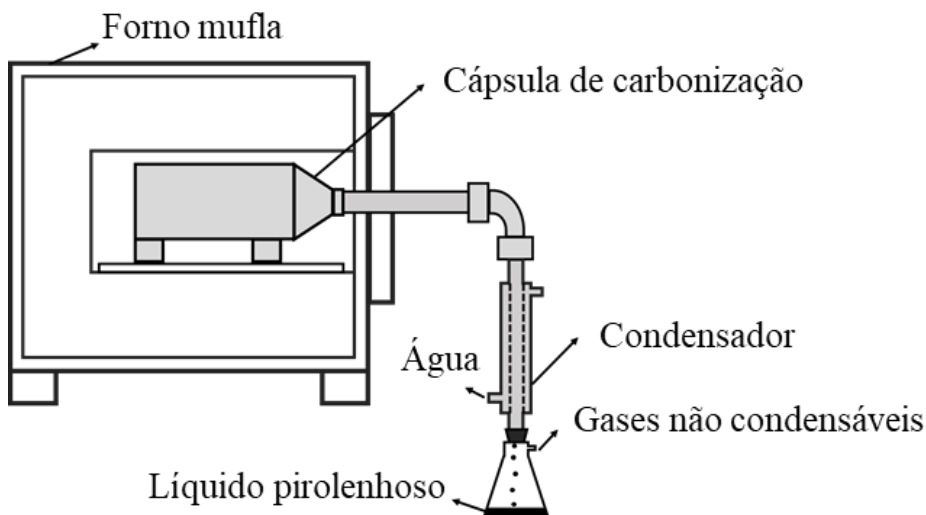
Fonte: Autoria própria (2024).

### 4.3 Processo de carbonização laboratorial

As carbonizações em ambiente laboratorial foram executadas em um forno elétrico do tipo mufla (modelo Q318S25T, marca Quimis, São Paulo, Brasil), com uma

cápsula de carbonização conectada ao condensador refrigerado a água, o qual está acoplado a um recipiente coletor de gases condensáveis (Figura 2).

**Figura 2** - Esquema do sistema de carbonização laboratorial.



Fonte: Martinez *et al.* (2019)

O processo de carbonização em laboratório foi conduzido com 72 amostras de madeira por espécie, considerando 4 temperaturas finais de carbonização (400, 500, 600 e 700 °C). Essa faixa de temperatura estudada simula a rampa de temperatura final atingida pelos fornos de alvenaria do tipo “rabo quente” na Amazônia brasileira (Lima *et al.*, 2022). Em cada temperatura, foram empregadas 18 amostras por espécie, com o objetivo de replicar a variação de temperatura observada em condições reais em um forno de alvenaria.

Antes da carbonização, os corpos de prova foram submetidos a secagem em estufa com circulação forçada de ar ( $105 \pm 2$  °C por 24 horas). As carbonizações seguiram um padrão específico, iniciando a partir de uma temperatura inicial de 100 °C, com uma taxa de aquecimento de 1,67 °C por minuto e um período de residência na temperatura final de 60 minutos, conforme a metodologia adaptada de Trugilho *et al.*, (1991).

#### 4.4 Coleta de espectros no NIR

As leituras espectrais foram realizadas em amostras de carvão vegetal produzido em escala laboratorial (432 amostras). As leituras foram realizadas em modo de reflectância difusa utilizando um espectrômetro Bruker (modelo MPA, Optik GmbH, Ettlingen, Germany), equipado com uma esfera de integração e uma fibra

óptica. Os dados espectrais foram adquiridos por meio do software OPUS versão 7.5, considerando a faixa de radiação de  $3.500\text{ cm}^{-1}$  -  $12.500\text{ cm}^{-1}$ , com resolução de  $8\text{ cm}^{-1}$ . Porém, só foram utilizados para calibração os espectros coletados entre  $4.000\text{ cm}^{-1}$  -  $9.000\text{ cm}^{-1}$ , devido ao ruído estático e à falta de informações relevantes em toda a gama (Costa *et al.*, 2018). Os espectros foram obtidos diretamente nas faces transversais e radiais de cada corpo de prova do carvão vegetal produzido em laboratório.

#### 4.5 Análise estatística multivariada

Foram realizadas análises de componentes principais (PCA) e análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) utilizando o software Chemoface versão 1.61 (Nunes *et al.*, 2012). A PCA foi realizada para explorar a dependência de dados e verificar a similaridade espectral.

A análise discriminante PLS-DA foi utilizada para desenvolver modelos de classificação das temperaturas finais de carbonização. O método de classificação PLS-DA, baseado na abordagem PLS-R, correlaciona dois blocos de variáveis, X (variáveis independentes) e Y (variáveis dependentes). As variáveis independentes (X) foram a matriz de espectros do NIR, enquanto as variáveis dependentes (Y) foram as classes de temperatura (400, 500, 600 e 700 °C). Os modelos foram ajustados por meio de dados espectrais tratados e não tratados matematicamente, foi utilizado tratamento matemático visando discriminar e otimizar a análise dos resultados (Moura *et al.*, 2011). *Outliers* foram detectados por análise gráfica de resíduos.

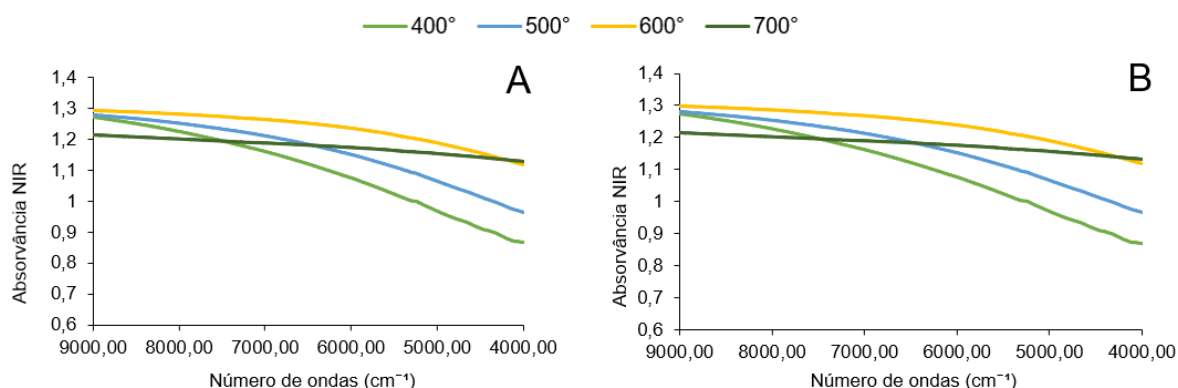
Na prática, as amostras de carvão vegetal foram agrupadas em 6 classes diferentes de acordo com as espécies: 1 (*D. excelsa*), 2 (*Caryocar* sp.), 3 (*P. suaveolens*), 4 (*T. guianensis*), 5 (*S. guianensis*) e 6 (*B. gaudichaudii*). Além disso, os carvões vegetais foram classificados considerando as temperaturas finais de carbonização (400, 500, 600 e 700 °C). Os modelos PLS-DA foram validados usando métodos de validação cruzada. Ao final, foi elaborada uma matriz de confusão, onde foram discriminadas as porcentagens de erros e acertos após testar o modelo gerado pela análise PLS-DA.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Espectros NIR

Os espectros NIR, mensurados de 9000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  em amostras de carvão nas faces radial e transversal (Figura 3), apresentam as mudanças provocadas pela degradação térmica nas diferentes temperaturas de carbonização e demonstram que o NIR é sensível o suficiente para diferenciar os carvões produzidos a temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C. No entanto, quando a temperatura atinge 700 °C, há uma sobreposição significativa das curvas espectrais com as temperaturas de 400 °C e 500 °C em ambas as faces das amostras. Isso representa as mudanças provocadas pela degradação térmica nas diferentes temperaturas de carbonização.

**Figura 3** - Média dos espectros coletados das amostras de carvão na face radial (A) e transversal (B).



**Fonte:** Autoria própria (2024).

Quanto maior a temperatura final de carbonização, menores serão as bandas de absorvância no NIR (Costa *et al.*, 2018). Segundo Ramalho *et al.* (2017), esse fato provavelmente ocorre porque temperaturas mais amenas, em que os constituintes celulares ainda não foram completamente degradados, resultam em uma maior interação entre a radiação infravermelha e os constituintes moleculares da amostra.

Durante a carbonização, os hidrocarbonetos presentes na madeira, como a celulose, as hemiceluloses e a lignina, passam por diversas reações de decomposição, gerando como produtos gases voláteis e carvão vegetal. É importante salientar que os componentes químicos da madeira se degradam em diferentes intervalos de temperatura: as hemiceluloses entre 220 °C e 310 °C, a celulose entre 315 °C e 400 °C, e a lignina entre 160 °C e 900 °C (Yang *et al.*, 2007). Devido à sua estrutura química complexa e aos tipos de ligações presentes em sua macromolécula,

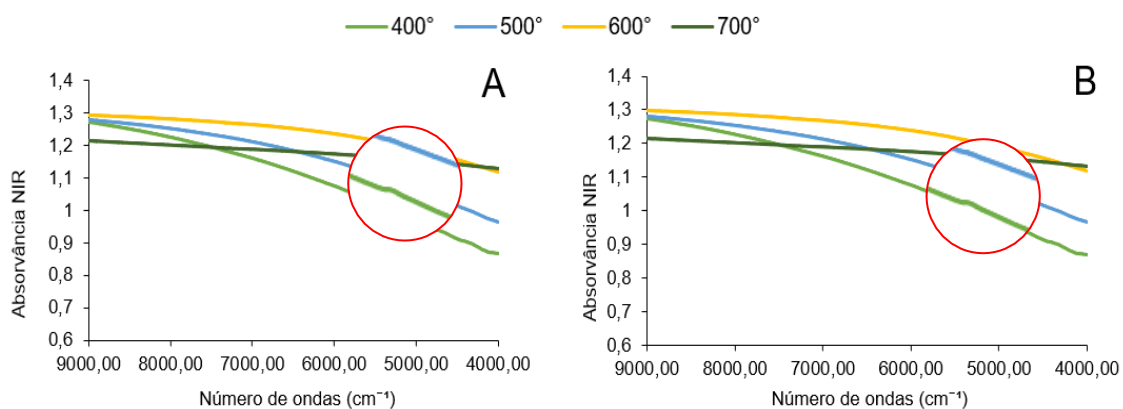
a lignina é o componente da madeira mais termoestável, em comparação com a celulose, as hemiceluloses e a própria madeira.

Essa sobreposição a 700 °C deve-se principalmente à homogeneidade que o carvão adquire com o aumento da temperatura. É difícil diferenciar amostras de carvão na espectroscopia do NIR quando o carvão é produzido em altas temperaturas (Ramalho *et al.*, 2017). Principalmente, devido ao afinamento da parede celular e ao encolhimento volumétrico, levando a uma estrutura mais uniforme, assemelhando-se à estrutura química do grafite, como observado no estudo realizado por Kim (2006), com carvões provenientes de *Quercus variabilis*.

Além disso, os autores Trugilho e Silva (2001), em trabalho realizado com carbonização de jatobá a diferentes temperaturas (variando de 300 °C até 900 °C), afirmam também que com o aumento da temperatura de carbonização, aumenta o teor de carbono fixo, cinzas e diminui o teor de materiais voláteis. Corroborando para uniformidade das amostras e contribuindo para justificar a sobreposição das curvas médias das amostras carbonizadas a 700 °C, como mostra a Figura 1.

As curvas nas faixas de temperaturas apresentam picos de absorção notáveis entre os espectros de 5000 - 5500  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 4). Esses picos de absorção podem ser atribuídos às mudanças estruturais e químicas que ocorrem à medida que componentes orgânicos, como a lignina, celulose e hemiceluloses, são decompostos e transformados em estruturas carbonizadas. Dessa forma, quando os picos ocorrem é indicativo da degradação dos polímeros presentes no material de origem durante o processo de carbonização (Muñiz *et al.*, 2013).

**Figura 4** – Picos de absorção notáveis nas médias dos espectros na temperatura de 400 °C e 500 °C na face radial (A) e transversal (B).



Fonte: Autoria própria (2024).

Tendo em vista as sobreposições nas curvas dos espectros das temperaturas, as assinaturas espectrais avaliadas através de análise visual podem enfrentar limitações devido a fatores como ruído, compressão e cores metamétricas, impactando sua precisão (Fu *et al.*, 2024). Dessa forma, a análise estatística multivariada foi realizada nos dados espectrais para melhor distinguir as faixas dos espectros de temperatura. Pois, a estatística multivariada permite avaliar o conjunto de dados, indicando uma maior similaridade em vários comprimentos do espectro (Nascimento *et al.*, 2017).

## 5.2 Análise de componentes principais

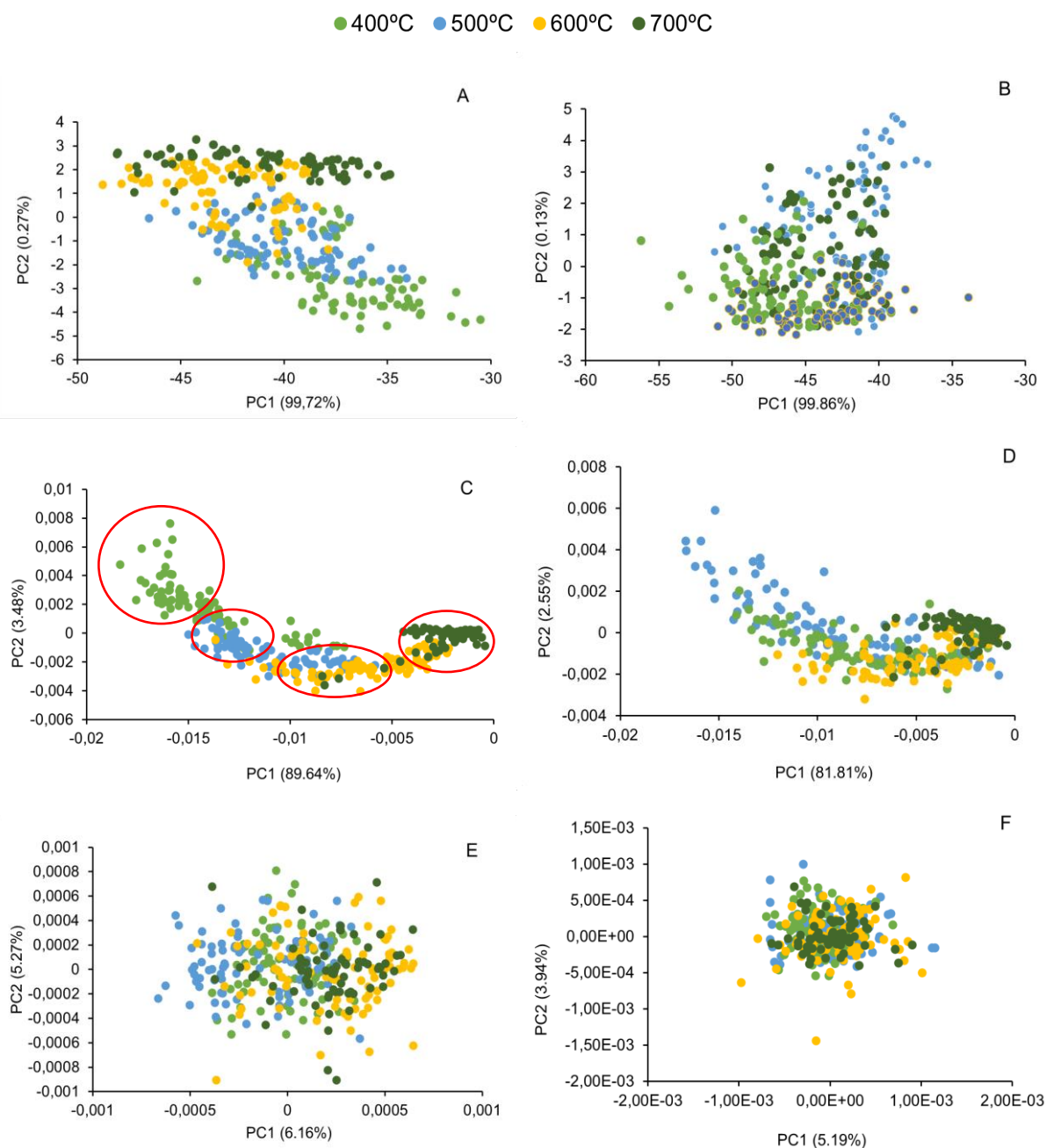
Os gráficos de escores da análise de componentes principais revelaram a variabilidade espectral das superfícies radial e transversal das amostras de carvão vegetal, obtidos a partir das madeiras das espécies de *Dinizia excelsa*, *Caryocar* sp., *Pseudopiptadenia suaveolens*, *Tapirira guianensis*, *Simaba guianensis* e *Brosimum gaudichaudii*, produzidos em 4 diferentes temperaturas: 400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C.

A variância dos dados espectrais sem tratamento matemático das superfícies radiais de PC1 (99,72%) e PC2 (0,27%) totalizou 99,99% (Figura 5A). No que se refere às superfícies transversais, também houve explicação de 99,99% da variabilidade dos dados espectrais brutos, considerando as variâncias individuais de PC1 (99,86%) e PC2 (0,13%) (Figura 2B). Na face radial, é possível verificar os pontos mais dispersos, o mesmo não acontece na face transversal, no qual houve sobreposição entre os níveis de temperatura avaliados.

Os dados da 1ª derivada (1d) apresentaram uma melhoria significativa na distinção dos espectros das amostras de carvão, tanto na face radial (Figura 5C), quanto na face transversal (Figura 5D). Em contraste, os escores dos dados espectrais tratados com 2ª derivada (2d) (Figuras 5E e 5F) não apresentaram melhora significativa quando comparados a 1d.

**Figura 5** - Escores da análise de componentes principais de dados espectrais obtidos na superfície radial (A - espectro bruto; C - espectros tratados com a primeira derivada; e E - espectros tratados com a segunda derivada) e transversal (B - espectros brutos; D - espectros tratados com a primeira derivada;

e F - espectros tratados com a segunda derivada) de amostras de carvão vegetal produzidas em escala laboratorial em 4 temperaturas diferentes.



Fonte: Autoria própria (2024).

As características de disposição dos elementos anatómicos influenciam na leitura dos espectros. A maior dispersão dos escores na superfície transversal está relacionada ao maior volume de informações da parede celular obtida nesta superfície. A penetração da radiação NIR na superfície transversal é mais profunda, com as fibras e as estruturas de poros/vasos atuando como tubos de luz, levando a

um maior volume de carvão avaliada. Muñiz *et al.*, (2016) estudaram madeiras vendidas como "angelim" no Brasil, esse estudo apresentou que os resultados da análise de infravermelho foram influenciados pela superfície de coleta dos espectros. Eles observaram que as características anatômicas das seções transversais fornecem mais informações sobre o tipo e a distribuição celular do que as seções longitudinais (radial e tangencial). Corroborando para explicar a maior dispersão dos pontos no gráfico da face transversal em comparação com o gráfico da face radial. Ademais, a degradação térmica dos polímeros promove aumento no volume de microporos e macroporos presentes no carvão (Gmach *et al.*, 2023). Além disso, os carvões apresentam trincas e rachaduras, que é característica intrínseca desse material, o que também justifica a maior dispersão dos dados obtidos na face transversal.

É possível perceber que o NIR é sensível na separação de carvões em grupos de temperatura, mesmo que a PCA seja uma técnica para análise exploratória inicial. Apesar de ser possível observar, na face radial da 1d, claros agrupamentos de carvões produzidos nas diferentes temperaturas, também se nota sobreposição de pontos. Dessa forma, assim como no trabalho de Lima *et al.*, (2024), a aplicação da PCA aos espectros NIR não revelou diferenças discerníveis entre os carvões produzidos em fornos de alvenaria de regiões tropicais florestais. Segundo Monteiro *et al.*, (2010), a forte colinearidade entre os espectros NIR do carvão vegetal foi um fator importante na explicação deste resultado, dificultando a aplicação da PCA e a interpretação dos resultados.

Assim, para obter uma discriminação mais precisa entre os grupos de temperaturas, foi realizada análise complementar utilizando a técnica PLS-DA.

### **5.3 Validação cruzada de modelos de classificação de carvão**

Modelos PLS-DA para classificação de carvões considerando as temperaturas finais de carbonização e as duas faces de obtenção dos espectros demonstraram níveis de acertos variando de 53,09% (dados da face transversal tratados com 2d) a 89,59% (dados da face radial sem tratamento matemático) como mostra a Tabela 2. A face radial demonstrou melhores resultados para classificação, com níveis de assertividade chegando a 89,59 %. Por outro lado, 74,64 % de acertos foram associados ao modelo PLS-DA calibrado com dados espectrais tratados com 2d.

**Tabela 2** - Resumo das classificações das amostras de carvões vegetais através da análise PLS-DA e método de validação cruzada, considerando a superfície de aquisição dos espectros e o pré-tratamento matemático utilizado.

Temperatura (°C)	Radial (10 VLs)						Transversal (10 VLs)					
	ST		1d		2d		ST		1d		2d	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
400	82	96.47	81	95.29	80	94.12	75	86.21	79	90.80	69	79.31
500	74	85.06	75	86.21	49	56.32	63	73.26	61	70.93	43	50.00
600	74	85.06	73	83.91	39	44.83	49	57.65	49	57.65	34	40.00
700	67	91.78	64	87.67	33	45.21	57	79.17	57	79.17	31	43.06
Média	--	<b>89.59</b>	--	88.27	--	60.12	--	74.07	--	<b>74.64</b>	--	53.09

VL: Variável Latente, ST: Sem tratamento, 1d: primeira derivada e 2d: segunda derivada.

**Fonte:** Autoria própria (2024).

A predição da temperatura final de carbonização é relevante para a indústria siderúrgica, especialmente por influenciar os índices qualitativos do carvão vegetal, como densidade relativa aparente e teor de carbono fixo do carvão vegetal (Trugilho *et al.*, 1991), bem como o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e consumo específico de lenha (Lima *et al.*, 2022). Segundo Andrade *et al.*, (2012) e Ramalho *et al.*, (2017) corpos de prova de madeira carbonizados sob altas temperaturas finais resultam em carvão mais homogêneo porque há maior concentração de carbono em sua composição. Isso ocorre porque a degradação dos polímeros de madeira é mais avançada em temperaturas mais altas, aumentando a concentração fixa de carbono (Trugillo *et al.*, 2001).

Entende-se que os carvões recebidos pela indústria siderúrgica precisam de melhor qualidade. Tendo em vista que faixas de temperaturas mais altas, resultam em carvões com maior teor de carbono fixo, e, conseqüentemente, maior valor agregado. Assim, baseando-se no maior controle de temperatura, é possível melhorar o valor da comercialização dos carvões, seja com base na tonelada, ou com base no volume. Embora carvões produzidos em alta temperatura tenham melhor teor de carbono fixo, o rendimento da carbonização é menor, o que corrobora com a necessidade do produtor aumentar os valores de comercialização em função do acréscimo do carbono fixo.

Nesse contexto, foi utilizado a matriz de confusão ajustada com dados espectrais da face radial do carvão sem tratamento, esta demonstrou 297 amostras classificadas por temperatura corretamente, o que corresponde ao índice de acerto de 89,59 %. Valores acima de 85 % de precisão na predição foram reportados

considerando todas as temperaturas, sendo 96,47 e 91,7 8% registrados para as temperaturas de 400 a 700 °C. O modelo PLS-DA cometeu maior número de erros de classificação entre as temperaturas de 500 e 600 °C.

Abaixo, apresenta-se os resultados da seção radial a 400 °C, sem aplicação de tratamento matemático (Tabela 3), pois essa condição alcançou o maior percentual de classificações corretas das amostras de carvão vegetal. A carbonização nessa faixa é preferível porque, embora o aumento da temperatura resulte em ganhos na densidade aparente do carvão vegetal, as perdas no rendimento gravimétrico são significativas (Lima *et al.*, 2022). Além disso, a carbonização em altas temperaturas prolonga o ciclo de carbonização, reduzindo a produtividade e aumentando as emissões de gases.

**Tabela 3** - Classificação de amostras de madeira por espécie através de PLS-DA utilizando validação cruzada e um conjunto de teste de dados espectrais da superfície radial sem tratamento.

Temperatura (°C)	Classificação da temperatura prevista pelo NIR				Classificação (10 VLs)	
	400	500	600	700	n	%
400	82	2	1		82	96.47
500	2	74	11		74	85.06
600		8	74	5	74	85.06
700			6	67	67	91.78
<b>Classificação geral</b>					<b>297</b>	<b>89.59</b>

**Fonte:** Autoria própria (2024).

O modelo PLS-DA também foi utilizado por Costa *et al.*, (2018) que classificou amostras de carvão vegetal de eucalipto, a partir de carbonizações em temperaturas finais de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C. Nesse estudo, mais de 97,5% das amostras foram classificadas corretamente, um valor superior ao obtido na validação deste trabalho. No entanto, observa-se que a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) combinada com a análise multivariada PLS apresenta resultados satisfatórios para as classes de temperaturas estudadas.

Nesse sentido, o presente estudo demonstra o potencial da análise multivariada para aprimorar a precisão na classificação do carvão vegetal submetido a diferentes condições de processamento térmico. Assim, fica evidente que a combinação de NIR e PLS-DA é uma abordagem robusta para aplicações industriais e de pesquisa, onde a caracterização precisa desse material é fundamental.

## 6 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, não foi possível distinguir as espécies apenas pela análise visual da assinatura espectral. Em contrapartida, foi utilizada a análise de componentes principais dos dados espectrais originais, sendo que as análises a partir do tratamento da 1d apresentaram uma melhoria significativa na distinção dos espectros das amostras de carvão, tanto na face radial, quanto na face transversal. Mesmo assim, também não foi suficiente para obter uma discriminação mais precisa entre os grupos de temperaturas, fazendo-se necessário análise complementar utilizando a técnica PLS-DA.

Os modelos PLS-DA classificaram corretamente mais de 89 % das amostras de carvão vegetal de acordo com a temperatura final de carbonização. Quando avaliados os dados da face radial sem tratamento matemático, houve uma classificação correta de 96 % dos carvões avaliados. Assim, é possível perceber que o NIR é sensível na separação de carvões em grupos de temperatura.

Dessa forma, fica evidente que o controle de temperatura na unidade produtiva de carvão é fundamental porque temperaturas inadequadas podem resultar em carvão de baixa densidade e menor eficiência energética, além de afetar o rendimento gravimétrico e aumentar as emissões de gases. Portanto, um controle rigoroso da temperatura de carbonização otimiza o consumo de matéria-prima, aumenta o rendimento do processo e produz carvão de alta qualidade. Dessa forma, recomendamos que as UPC invistam em tecnologias que permitam um controle razoável da temperatura, pois isso levará a um maior rendimento gravimétrico, menor consumo de matéria-prima e ciclos de carbonização mais curtos, tornando assim, o processo mais eficiente e sustentável.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; LIMA, J.T.; NAPOLI, A. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimar propriedades do carvão vegetal de eucalipto. ***Jornal de Espectroscopia no Infravermelho Próximo***. 2012; 20(6):657-666.

BARCELLOS, Daniel Camara. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. Viçosa – MG, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução normativa MMA de 11 de dezembro de 2006**. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, 201 execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas. Brasil: 2006.

COSTA, Livia Ribeiro. Aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo para avaliação do carvão vegetal. Lavras – MG, 2017.

COSTA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Evaluation and classification of eucalypt charcoal quality by near infrared spectroscopy. ***Biomass and Bioenergy***, v. 112, p. 85-92, 2018.

CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. Quality of machined wood surfaces. **Springer International Publishing**: New York City, 2015.

FU, Q.; SOUZA, M.; CHOI, E.S.; SHIN, S.; BAEK, S.; HEIDRICH, W. Limitações da reconstrução espectral orientada por dados - uma análise com reconhecimento de óptica. **arXiv.org**. 2024.

GMACH, F.; CUBAS, R., MORRONE, S. R., NISGOSKI, S. Anatomia e identificação do carvão vegetal comercializado na região de papanduva, Santa Catarina, sul do Brasil. **Revista Floresta** , v. 53, n. 3, 2023.

HOPKINSON, L.; RUTT, K. J.; KRISTOVA, P. The near-infrared spectra of the alkali carbonates. ***Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*** **200**: 143-149, 2018.

IAB - Instituto Aço Brasil. **Relatório de Sustentabilidade**, Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <[https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2023/07/AcoBrasil\\_Anuario\\_2023.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2023/07/AcoBrasil_Anuario_2023.pdf)>. Acesso em maio/2024.

IBÁ – Instituto Brasileiro de Árvores. **Carvão Vegetal**, 2017: Disponível em :< <https://iba.org/carvao-vegetal-2>>. Acesso em maio/2024.

JÚNIOR, Diêgo Gomes *et al.* Controle ambiental do processo de carbonização de resíduos madeireiros por meio do sistema forno-fornalha. **GONÇALVES, Fabricio Gomes et al.(org.). Sistemas integrados de produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias**. Guarujá, SP: Científica Digital, 2021., 2021.

KIM, N. H.; HANNA, R. B. Características morfológicas do carvão vegetal de *Quercus variabilis* preparado em diferentes temperaturas. **Ciência e Tecnologia da Madeira**. Vol. 40, Edição: 5, pp 392-401, 2006.

LI, J., GAO, R., ZHANG, Y., WANG, S., ZHANG, L., YIN, W., & JIA, S. Coal Calorific Value Detection Technology Based On NIR-Xrf Fusion Spectroscopy. **Chemosensors**, v. 11, n. 7, p. 363, 2023.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.

LIMA, M. D. R.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. **Renewable Energy**, 193, 584-594, 2022.

LIMA, M. D. R.; GUEDES RAMALHO, F. M.; BUFALINO, L.; MASSUQUE, J.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Models Based on NIR Signature to Identify and Classify Charcoal Produced from Amazonian Wood Wastes. **Available at SSRN 4820163**, 2024.

MAGALHAES, Rachel F. *et al.* Infrared reflectance techniques applied to silica particles diameter determination-theoretical and experimental data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. 3, p. e20210545, 2022.

MARTINEZ, C. L. M., MASHLAKOV, A., JESUS, M. S., CARDOSO, M., & ALMEIDA, G. M. Carbonization of coffee wood for charcoal production. In: **V Fórum Nac. Sobre Carvão Veg. e III Semin. Energ. Da Biomassa Florest.** Belo Horizonte, 2019. p. 7.

MONTEIRO, T. C.; SILVA, R. V.; LIMA, J. T.; HEIN, P.R.G.; NAPOLI, A. Use of near infrared spectroscopy to distinguish carbonization processes and charcoal sources, **Cerne**. 16 381–390, 2010.

MOURA, Danillo Barbosa de; CAMPOS, Alfredo Borges de; GODINHO, Mariana Silva; SOUZA, Aparecido Ribeiro de; BELTRÃO, Danielle Silva; OLIVEIRA, Anselmo Elcana de. Aplicação da quimiometria para tratamento de dados espectrais gerados por FTIR referentes ao herbicida glifosato em solos. In: **REUNIÃO ANUAL DA SBPC**, 63., 2011, Goiânia. Anais... Goiânia: SBPC, 2011

MUÑIZ, G. I. B.; CARNEIRO, M. E.; NISGOSKI, S.; RAMIREZ, M. G. L.; MAGALHÃES, W. L. E. SEM and NIR characterization of four forest species charcoal. **Tecnologia de Ciência da Madeira**. 47 815–823, 2013.

MUÑIZ, G. I. B. de et al. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “Angelim” by Near-IR and wood anatomy. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 18, n. 3, p. 505-522, jul. 2016.

NASCIMENTO, C. C.; BRASIL, M. M.; NASCIMENTO, C. S.; BARROS, S. V. S. Estimativa da densidade básica da madeira de *Eschweilera odora* (Poepp.) Miers por espectroscopia no infravermelho próximo. **Rev Cienc Mad**, v. 8, p. 42–53, 2017.

NISGOSKI, S. *et al.* Uso do NIR na discriminação da madeira e carvão de 20 espécies do Mato Grosso, Brasil. **Los Bosques y El Futuro**. Capítulo 3.

NUNES, C. A.; FREITAS, M. P.; PINHEIRO, A. C. M.; BASTOS, S. C. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. Journal of the **Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 11, p. 2003-2010, 2012.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, p. 557-566, 2013.

PASQUINI, Celio. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives—A review. **Analytica chimica acta**, v. 1026, p. 8-36, 2018.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. D. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* para uso em ironmaster. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, n. 1, p. 523025, 2012.

RAMALHO, Fernanda Maria Guedes *et al.* Influence of Particles Size on NIR Spectroscopic Estimations of Charcoal Properties. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. e20180397, 2019.

RAMALHO, F. M. G.; HEIN, P. R. G.; ANDRADE, J. M.; NAPOLI, A. Potencial da Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Distinguir Carvão Produzido a Partir de Madeira Plantada e Nativa para Fins Energéticos. **Energy & Fuels**, 31(2), 1593–1599, 2017.

ROCHA, Maria Fernanda Vieira *et al.* Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 8, n. 2, 2017.

RODRIGUES, Thaisa; JUNIOR, Aldo Braghini. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 143, p. 104670, 2019.

ROSSO, Silvana. Predição das propriedades de *Eucalyptus grandis* Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo. 2010.

SANTI, Auxiliadora Maria Moura; DE LIMA GONÇALVES, Zahia. Por trás da cortina de fumaça: trabalho e vida em carvoarias brasileiras. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, 2019.

SANTOS, Irislane Vieira *et al.* Cadeia produtiva do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável: um estudo de caso no polo siderúrgico da região do Carajás. **Nativa**, v. 12, n. 2, p. 205-214, 2024.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda; HATAKEYAMA, Kazuo. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Production**, 22, 309-321, 2012.

SCHIMLECK, L. R.; MICHELL, A. J.; RAYMOND, C. A.; MUNERI, A. Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 2, p. 194-201, 1999.

SILVA, Dimas Agostinho da *et al.* Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, p. 561-568, 2014.

SILVA, Luan Felipe Feitosa da *et al.* Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

SILVA, Renata Carvalho da *et al.* Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário estatístico 2023**, ano base 2022: produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil. 2023.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; REGAZZI, A. J. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 15, n. 2, p. 144-151, 1991.

TRUGILHO, P. F. & SILVA, D. A. D. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). *Scientia Agraria*, v. 2, n. 1-2, 2001.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

ZHAO, Qingna *et al.* Rapid determination of the fat, moisture, and protein contents in homogenized chicken eggs based on near-infrared reflectance spectroscopy. **Poultry science**, v. 97, n. 6, p. 2239-2245, 2018.