

**MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**Vaniele Bento dos Santos**

**Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal**

**Montes Claros  
2021**

**Vaniele Bento dos Santos**

**Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

**Orientador:** Prof. Dr. Edy Eime Pereira Baraúna

**Coorientador:** Prof. Dr. Fernando Colen

Montes Claros  
25 de Março de 2021

Santos, Vaniele Bento dos.

S237q  
2021

Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal [manuscrito] / Vaniele Bento dos Santos. Montes Claros, 2021.  
65 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Edy Eime Pereira Baraúna

Banca examinadora: Fernando Colen, Marina Donária Chaves Arantes, Thiago Campos Monteiro..

Inclui referências: f. 26-31; 41-43; 59-64.

1. Madeira -- Qualidade -- Teses. 2. Carvão -- Carbonização -- Teses. 3. Rendimento gravimétrico -- Teses. I. Baraúna, Edy Eime Pereira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 25 dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 14 horas, sob a Presidência do Professor Edy Eime Pereira Barauna, D. Sc. (Orientador - ICA-UFMG) e com a participação dos Professores Fernando Colen, D. Sc. (Coorientador - ICA-UFMG), Marina Donária Chaves Arantes, D. Sc. (UFSJ) e Thiago Campos Monteiro, D. Sc. (UFPR), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **VANIELE BENTO DOS SANTOS**, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: **“Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal”**,

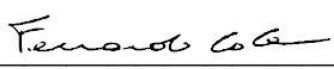
sendo a aluna considerada (aprovada/reprovada) **APROVADA**. E, para constar, eu, Professor Edy Eime Pereira Barauna, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

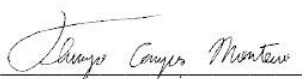
**Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.**

Montes Claros, 25 de março de 2021.

  
\_\_\_\_\_  
Edy Eime Pereira Barauna  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Fernando Colen  
Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Marina Donária Chaves Arantes  
Membro

  
\_\_\_\_\_  
Thiago Campos Monteiro  
Membro

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido e amado irmão  
Romerito Bento dos Santos (*In Memoriam*).  
Sua lembrança me inspira e me faz sempre persistir.

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, pela vida, pelas novas conquistas e pela força durante toda a minha trajetória.

Aos meus pais, Venceslau e Marlene, serei eternamente grata por todo apoio, amor e cuidados.

Ao Prof. Edy Eime Pereira Baraúna, agradeço imensamente, pela orientação, incentivo e confiança.

Ao Prof. Fernando Colen, pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Marina Donária Chaves Arantes e ao Prof. Thiago Campos Monteiro, por todas as sugestões.

À Prof.<sup>a</sup> Talita Baldin, por ter disponibilizado o material de estudo e por todos os ensinamentos.

Ao Prof. Christian Dias Cabacinha, por todas as dicas na análise estatística.

A todos do Grupo de Estudos em Tecnologia da Madeira, em especial, Patrick, Sílvia e Breno, muito obrigada pela amizade e apoio para a realização deste trabalho.

Aos funcionários Everson de Souza e Sérgio, por toda ajuda e colaboração.

À Prof.<sup>a</sup> Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Lawrence Oliveira e Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da UFV, pelas contribuições.

À FAPEMIG e ao Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, bem como ao corpo docente e administração, por todo suporte e oportunidade de realização do mestrado.

A todos minha eterna gratidão.

**QUALIDADE DAS MADEIRAS DE *Astronium fraxinifolium* SCHOTT E  
*Enterolobium gummiferum* (MART.) J.F.MACBR. PARA PRODUÇÃO DE  
CARVÃO VEGETAL**

**RESUMO**

O Cerrado, segundo maior bioma do Brasil, apesar de apresentar grande diversidade de espécies florestais, ainda hoje pouco se conhece sobre a qualidade tecnológica de sua madeira. Neste sentido, com o intuito de avaliar o potencial energético das madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum*, nativas oriundas de remanescentes florestais do Cerrado, este trabalho teve como objetivo estudar a qualidade das madeiras e do carvão vegetal dessas espécies. Foram retirados discos na altura de 1,3 m do solo de três árvores de cada espécie. Foram confeccionados amostras para as análises das propriedades anatômica, química, energéticas das madeiras e também para a produção de carvão vegetal, em condições de laboratório, sob duas temperaturas finais de carbonização (350 e 450°C). Posteriormente, foi realizada a caracterização do carvão vegetal, e calculados os rendimentos da carbonização e a produtividade do carvão vegetal por unidade de volume. Constatou-se que as madeiras das espécies florestais são anatomicamente semelhantes e possuem características físicas, químicas e energéticas satisfatórias que as potencializam para fins energéticos. O carvão da *E. gummiferum* se destacou pelo baixo teor de cinzas, já a *A. fraxinifolium* apresentou maior densidade aparente, e conseqüentemente, maiores rendimentos da carbonização e produtividade de carvão vegetal por unidade de volume de madeira. Os carvões produzidos em ambas as temperaturas finais de carbonização apresentaram parâmetros adequados para uso doméstico e setor siderúrgico, sendo assim indicada a utilização da temperatura final de 350°C por apresentar maiores rendimentos gravimétricos e energéticos da carbonização.

**Palavras-chave:** Caracterização da madeira. Carbonização. Rendimento gravimétrico. Espécies do Cerrado.

**WOOD QUALITY OF *Astronium fraxinifolium* SCHOTT AND *Enterolobium gummiferum* (MART.) J.F.MACBR. FOR CHARCOAL PRODUCTION**

**ABSTRACT**

The Cerrado, the second largest biome in Brazil, despite having a great diversity of forest species, still little is known about the technological quality of its wood. In this sense, in order to evaluate the energetic potential of the *Astronium fraxinifolium* and *Enterolobium gummiferum* woods, native from the Cerrado forest remnants, this work aimed to study the quality of the woods and the charcoal of these species. Disks were removed at a height of 1.3 m from the soil of three trees of each species. Samples were made for the analysis of the anatomical, physical, chemical, energetic properties of the wood and also for the production of charcoal, under laboratory conditions, under two final carbonization temperatures (350 and 450°C). Subsequently, charcoal characterization was carried out, and carbonization yields and charcoal productivity per unit volume were calculated. It was found that the woods of the forest species are anatomically similar and have satisfactory physical, chemical and energetic characteristics that enhance them for energy purposes. *E. gummiferum* coal stood out for its low ash content, whereas *A. fraxinifolium* showed higher apparent density, and consequently, higher carbonization yields and charcoal productivity per unit volume of wood. The coals produced at both final carbonization temperatures showed parameters suitable for domestic use and the steel sector, thus indicating the use of the final temperature of 350°C as it presents higher gravimetric and energetic carbonization yields.

**Keywords:** Characterization of wood. Carbonization. Gravimetric yield. Cerrado species.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1.** Valores médios do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (A), rendimento em carbono fixo (B), rendimento energético da carbonização (C) ..... 57

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 2.1</b> – Valores médios e intervalo de confiança da densidade básica e análise anatômica das madeiras de <i>Astronium fraxinifolium</i> e <i>Enterolobium gummiferum</i> ...              | 37 |
| <b>Tabela 2.2</b> – Valores médios dos índices qualitativos das madeiras de <i>Astronium fraxinifolium</i> e <i>Enterolobium gummiferum</i> .....  | 39 |
| <b>Tabela 3.1</b> – Valores médios das características tecnológicas das madeiras de <i>Astronium fraxinifolium</i> e <i>Enterolobium gummiferum</i> .....  | 50 |
| <b>Tabela 3.2</b> – Valores médios das características tecnológicas do carvão vegetal de <i>Astronium fraxinifolium</i> e <i>Enterolobium gummiferum</i> produzido em duas temperaturas finais ..... | 53 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>Carvão vegetal no Brasil</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>Cerrado e as espécies com potencial para geração de energia</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>Espécies em estudo</b> .....  | <b>18</b> |
| <i>Astronium fraxinifolium</i> <b>Schott</b> .....   | <b>18</b> |
| <i>Enterolobium gummiferum</i> <b>(Mart.) J.F.Macbr</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>Processo de carbonização da madeira</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>Propriedades da madeira e sua influência no carvão vegetal</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>Densidade básica e análise anatômica das madeiras de <i>Astronium fraxinifolium</i> Schott e <i>Enterolobium gummiferum</i> (Mart.) J.F.Macbr.</b> .....      | <b>32</b> |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>34</b> |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | <b>35</b> |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>CONCLUSÃO</b> .....   | <b>40</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>Qualidade das madeiras de <i>Astronium fraxinifolium</i> Schott e <i>Enterolobium gummiferum</i> (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal</b> ..... | <b>44</b> |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>46</b> |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | <b>47</b> |
| <b>Coleta do material e preparo das amostras</b> .....   | <b>47</b> |
| <b>Caracterização da madeira</b> .....   | <b>48</b> |
| <b>Carbonização da madeira</b> .....   | <b>48</b> |
| <b>Caracterização do carvão vegetal</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>Análise estatística</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>49</b> |
| <b>Caracterização da madeira</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>Caracterização do carvão vegetal</b> .....  | <b>52</b> |
| <b>CONCLUSÕES</b> .....  | <b>59</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>59</b> |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | <b>65</b> |

## INTRODUÇÃO

A biomassa florestal é importante para a matriz energética brasileira, seja pela utilização direta da madeira ou pela sua transformação em combustível (FONTES, 2005). Cerca de 46,2% da energia utilizada no País provém de fontes renováveis em que a lenha e o carvão vegetal representam 8,8% desta oferta interna de energia, sendo aproveitada pelos setores industrial, comercial, residencial e agropecuário (BEN, 2020). O carvão vegetal, por exemplo, posiciona o Brasil como principal produtor no mundo, justamente por ser uma matéria-prima relevante para diversas cadeias em que, na sua grande maioria, é originado de árvores plantadas, principalmente as do gênero *Eucalyptus*, contribuindo, assim, para a substituição daquelas de origem fóssil e redução da emissão de gases de efeito estufa (IBÁ, 2020).

O carvão vegetal, resultante da carbonização da madeira, tem como principal aplicação no Brasil a indústria siderúrgica, pois, além do seu caráter renovável e relevância histórica e econômica para o País, o carvão vegetal apresenta um elevado grau de pureza e baixo custo de produção, atuando, assim, como agente redutor do minério de ferro e fornecedor de energia para o processo siderúrgico (MACHADO e ANDRADE, 2004; FONTES, 2005; SIEBENEICHLER *et al.*, 2017).

Das 180 principais unidades siderúrgicas do Brasil, a maioria utiliza o carvão vegetal como termorredutor em seu processo de produção, com destaque para o Estado de Minas Gerais, principal polo produtor e consumidor, bem como maior produtor de florestas plantadas (IBÁ, 2020). Além de contribuir para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga, o carvão vegetal ainda atua como substituto do óleo combustível nas caldeiras e fornos de diversas indústrias (VALVERDE *et al.*, 2012).

As características e a composição química elementar do carvão vegetal dependem dos parâmetros do processo de carbonização, como por exemplo, a temperatura final, que em altas temperaturas proporciona o aumento de carbono fixo no material e, conseqüentemente, maior poder calorífico superior. Contudo há uma redução nos rendimentos gravimétricos e nos teores de hidrogênio e oxigênio (BARCELLOS, 2007; SILVA e ATAÍDE, 2019). Neste sentido, um dos desafios para processo de produção de carvão vegetal tem sido maximizar os rendimentos do carvão, já que, além dos parâmetros do processo de carbonização, a qualidade do

carvão vegetal para a siderurgia também está diretamente relacionada às propriedades da madeira (ASSIS *et al.*, 2016).

Uma vez que as propriedades da madeira de folhosas têm um impacto maior nos rendimentos da carbonização e nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal (DUFOURNY *et al.*, 2019), estudos relacionados à qualidade de exemplares nativos para fins energéticos tornam-se necessários. Deste modo, o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a caracterização das madeiras de espécies do Cerrado, segundo maior bioma do Brasil e que já se destaca pela presença de espécies com frequência e produção de biomassa, pode contribuir para o Plano de Manejo Sustentável do bioma. Além de que, juntamente com o Acordo de Paris (ONU, 2015) e o incentivo ao cultivo de espécies nativas, também podem proporcionar que espécies pouco conhecidas e com alto potencial energético sejam introduzidas no mercado.

Neste contexto, a *Astronium fraxinifolium* Schott (Gonçalo-alves) e a *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr (timburi-do-cerrado), por exemplo, são espécies nativas e endêmicas do Cerrado brasileiro, pertencentes às famílias Anacardiaceae e Fabaceae, respectivamente, que além de apresentarem madeira com valor comercial para a construção civil e fins estruturais, possuem alto potencial para o reflorestamento e manejo de áreas degradadas, (PILON e DURIGAN, 2013; CALGARO *et al.*, 2015), sendo, assim, opções viáveis para produtores de florestas plantadas.

Visto que as características e qualidade do carvão vegetal estão diretamente correlacionadas com as propriedades da matéria-prima e do processo utilizado, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético das madeiras de *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-Alves) e *Enterolobium gummiferum* (timburi-do-cerrado) para a produção de carvão vegetal em duas diferentes temperaturas finais de carbonização.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

Avaliar o potencial energético e a qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr para a produção sustentável de carvão vegetal.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar as propriedades tecnológicas das madeiras;
- Caracterizar as propriedades do carvão vegetal;
- Avaliar a influência de duas temperaturas finais de carbonização na qualidade do carvão produzido.

## REVISÃO DE LITERATURA

### Carvão vegetal no Brasil

Cerca de 46,2% da energia utilizada no Brasil provêm de fontes renováveis, sendo que a lenha e o carvão vegetal representam 8,8% desta oferta interna de energia, que são utilizados como fonte nos setores industrial, comercial, residencial e agropecuário (BEN, 2020). Devido às suas características tecnológicas, a biomassa florestal se tornou um importante insumo para a matriz energética brasileira, seja pela utilização direta da madeira ou pela sua transformação em combustível. No Estado de Minas Gerais, por exemplo, a lenha e derivados apresentaram uma demanda total de 16,4% no ano de 2015, representando, assim, 23% do total de energia demandada pela indústria em todo o Estado (CEMIG, 2017).

Dentre os coprodutos da biomassa florestal, destaca-se o carvão vegetal, resultante da carbonização da madeira, que pelo seu caráter renovável e relevância histórica e econômica, representa grande importância para a indústria nacional (FONTES, 2005). Justamente por ser uma matéria-prima importante para diversas cadeias, o carvão vegetal posiciona o Brasil como principal produtor no mundo em que na sua grande maioria é originado de árvores plantadas, principalmente as do gênero *Eucalyptus*, contribuindo, assim, para a substituição daquelas de origem fóssil e redução da emissão de gases de efeito estufa (IBÁ, 2020).

Resultante do processo de carbonização da madeira, o carvão vegetal tem como principal aplicação no Brasil a indústria siderúrgica, pois, além de ser uma fonte renovável, o carvão vegetal apresenta um elevado grau de pureza e baixo custo de produção, atuando, assim, como agente redutor do minério de ferro e fornecedor de energia para o processo siderúrgico (MACHADO e ANDRADE, 2004; SIEBENEICHLER *et al.*, 2017).

No ano de 2019, o carvão vegetal registrou consumo de 5,3 milhões de toneladas no País, representando um crescimento de 3,7% em relação ao ano anterior, principalmente em função do aumento da atividade do setor siderúrgico. Das 180 principais unidades produtoras de ferro-gusa, ferro liga e aço no Brasil, mais de 40% das empresas encontra-se no estado de Minas Gerais, sendo, assim, o principal polo de consumo e produção de carvão vegetal do País, bem como maior produtor de florestas plantadas (IBÁ, 2020).

Uma vez que a grande maioria da matéria-prima utilizada para produção de carvão vegetal no País é oriunda de floresta plantada, a lei 18.365/2009 de Minas Gerais, a partir do ano de 2018, permite que a pessoa física ou jurídica, no território do estado, industrialize ou consuma produto ou subproduto da flora em volume anual igual ou superior a 8.000 m<sup>3</sup> de madeira ou 4.000 m de carvão vegetal, podendo consumir até 5% do produto ou subproduto de formação nativa, desde que oriundos de uso alternativo do solo e autorizado pelos órgãos ambientais competentes (MINAS GERAIS, 2009). Neste sentido, o Cerrado, maior bioma do estado e que já se destaca pela presença de espécies florestais com frequência e produção de biomassa, é considerado como maior fornecedor de madeira para este segmento energético.

### **Cerrado e as espécies com potencial para geração de energia**

Considerado o segundo maior bioma do Brasil, o Cerrado ocupa cerca de 22% do território brasileiro (2.036.448 km<sup>2</sup>), com extensão territorial nos estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, além dos enclaves no Amapá, Roraima e Amazonas. Neste bioma, encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul, ou seja, Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata, o que resulta em um elevado potencial aquífero e favorece a sua biodiversidade (MMA, 2020).

O Cerrado é caracterizado por apresentar cobertura florestal composta por árvores pequenas e retorcidas. Possui grande diversidade de espécies vegetais, de fauna e de solo, e por essas razões é considerado um dos biomas mais ricos (MYERS *et al.*, 2000). Entretanto, também é um dos mais ameaçados no mundo. Isso ocorre, principalmente, em virtude da falta de conhecimento tecnológico de grande parte das suas espécies florestais, evidenciando, assim, a necessidade de pesquisas científicas relacionadas à qualidade da madeira desse bioma. Com essas informações, é possível contribuir para a sustentabilidade do manejo florestal praticado no Cerrado, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado/PPCerrado (SIQUEIRA *et al.*, 2020).

O Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado), formulado em 2009, abordou em um dos seus



pontos o manejo sustentável no Cerrado para fins energéticos. Assim sendo, as empresas siderúrgicas, metalúrgicas ou outras que consomem grandes quantidades de carvão vegetal ou lenha devem elaborar e implementar o Plano de Suprimento Sustentável e estabelecer a utilização exclusiva de matéria-prima oriunda de florestas plantadas e/ou recursos que provêm de manejo florestal, realizado por meio de Plano de Manejo Florestal Sustentável/PMFS (MMA, 2014). Neste sentido, torna-se fundamental a realização de estudos das espécies nativas para que se destine um melhor uso sustentável desses recursos.

Além do PPCerrado e do Acordo de Paris, que têm como objetivo minimizar as consequências do aquecimento global, há o incentivo de plantios de espécies nativas. Segundo Batista, Calmon e Valle (2019), o Brasil é um País florestal que tem grande oportunidade de desenvolver uma vibrante economia dos produtos madeireiros e não-madeireiros oriundos de florestas nativas plantadas, que podem resultar em um modelo economicamente viável para produtores e, ao mesmo tempo, proteger o meio ambiente, como por exemplo, a restauração de áreas degradadas com espécies nativas da região e os sistemas agroflorestais.

Existem diversas espécies nativas de importância econômica e com papel significativo na composição do Cerrado. Algumas destas se destacam pela frequência e produção de biomassa, bem como pela potencialidade de serem convertidas em carvão vegetal (BARCELLOS, 2007), como por exemplo, a aroeira-do-sertão (*Myracrodruon urundeuva*), cerejeira (*Amburana cearensis*) e tachi-branco (*Tachigali vulgaris*) que, de acordo estudos desenvolvidos por Siqueira *et al.* (2020), a madeira dessas espécies apresenta potencial tecnológico adequado para geração direta de energia, principalmente o carvão da *M. Urundeuva*, que se destacou com os maiores valores de rendimento em carvão vegetal (35,34%) e densidade aparente (475 kg m<sup>-3</sup>).

Paula (2005), avaliando espécies do Cerrado, concluiu que a *Lindackeria paraensis*, *Parkia platycephala*, *Swartzia flaemingii*, *Vatairea macrocarpa*, *Platonia insignis*, *Salvertia convallariodora* e *Zeyhera tuberculata* foram consideradas de boa qualidade para a produção de carvão e lenha. Ainda segundo o autor, tais espécies somente poderiam ter uma utilização efetiva, do ponto de vista econômico e ecológico, se incluídas na formação de grandes maciços florestais heterogêneos, sob planos de manejo, com rendimento sustentável.

Costa *et al.* (2014), também estudando espécies florestais do Cerrado, considerando como referência clones do gênero de *Eucalyptus*, constataram que a *Casearia sylvestris* (guaçatonga), *Guazuma ulmifolia* (mutamba) e *Luehea divaricata* (Açoita-cavalo) possuem potencial energético, destacando-se por altos valores de densidade básica e teor de lignina da madeira, e maior rendimento gravimétrico, teor de carbono fixo e poder calorífico do carvão vegetal.

Outras espécies nativas do Cerrado, que se destacam com potencial para geração de bioenergia e carvão vegetal, são a *Pterodon pubescens* (sucupira-branca), *Sclerobium paniculatum* (carvoeiro), *Dalbergia miscolobium* (caviúna) e *Qualea parviflora* (pau-terra), principalmente, por altos valores para a densidade aparente do carvão vegetal, assim como um bom rendimento gravimétrico (VALE, DIAS e SANTANA, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2011).

## **Espécies em estudo**

### *Astronium fraxinifolium* Schott

A *Astronium fraxinifolium* Schott, conhecida popularmente como Gonçalo-alves, aroeira-do-campo e sete cascas, é uma espécie arbórea pioneira, heliófita, decídua e seletiva xerófila, pertencente à família Anacardiaceae. Ocorre no Brasil e em outros países da América do Sul, sendo típica nas regiões do Cerrado do Brasil Central, Nordeste e Amazônia. Possui porte arbóreo médio, com altura de 8 a 12 m, com tronco cilíndrico e reto, e casca esbranquiçada e adstringente. Suas folhas, que possuem ação antisséptica, são alternadas e compostas por 7 a 11 folíolos, que assumem coloração diferente ao longo do ano. A sua floração ocorre nos meses de julho a agosto e a frutificação em setembro. A casca, folhas e raízes são utilizadas como tratamentos medicinais (JENRICH, 1989; LORENZI, 1992; 2014).

De acordo com Martinelli e Moraes (2013), a *Astronium fraxinifolium* está entre as espécies da família Anacardiaceae ameaçadas de extinção na categoria pouco preocupante. Isso se deve à destruição e diminuição de habitats, e, sobretudo, pela exploração de sua madeira que apresenta boa qualidade no mercado para a construção civil e fins estruturais. Esta árvore está incluída entre as

espécies prioritárias para conservação de recursos genéticos no Brasil, segundo a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (LEITE, 2002).

A madeira de *Astronium fraxinifolium* tem grande importância econômica e elevado valor comercial pelas suas características de qualidade, sendo esta pesada, compacta, rígida e de grande durabilidade natural, apresentando resistência ao ataque fúngico com cerne interno rosado e espesso, variando em tons de marrom-claro a avermelhado. Por essas características, é muito utilizada na construção civil, naval, indústria de móveis e confecção de dormentes a portas de fino acabamento, além de ser uma opção para o paisagismo por seu porte médio e beleza da copa (JENRICH, 1989; LORENZI, 1992; 2000; LEITE, 2002).

Por ser uma espécie pioneira e com ampla ocorrência no Cerrado brasileiro, a *Astronium Fraxinifolium* é indicada como opção para o reflorestamento e manejo de áreas degradadas, uma vez que esta possui grande potencial para regeneração e se encontra naturalmente nesses ambientes (CALGARO *et al.*, 2015). Além disso, visto seu elevado valor comercial, Haidar (2008) sugeriu a possibilidade de implantação de planos de manejo nas diversas regiões de ocorrência da *A. fraxinifolium* e de outras nativas de valor econômico para, assim, assegurar a permanência de madeiras nobres no mercado.

### ***Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr**

A *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr., conhecida popularmente como timburi-do-cerrado, tamboril, angico-de-minas e saboeiro, é uma espécie arbórea endêmica do Brasil que integra a família Fabaceae, sendo típica em áreas de mata, cerradão distrófico e cerrado sentido restrito. Com comportamento decidual, heliófita, seletiva xerófito e clímax, características exclusivas do Cerrado. É dotada de copa ampla e arredondada, podendo chegar de 4 a 6 metros de altura, com ramos suberosos e tronco tortuoso com casca profundamente fissurada e suberosa. Possui folhas compostas bipinadas, inflorescência em panículas de capítulos com flores brancas e com frutos do tipo vagem. Sua floração ocorre nos períodos de agosto a novembro e sua frutificação de maio a agosto (ALMEIDA *et al.*, 1998; LORENZI, 1998).

A seiva, folhas e goma da casca da *Enterolobium gummiferum* é amplamente utilizada na medicina popular. A casca possui tanino que pode ser empregado na

indústria de curtume, e a sua resina tem poder adesivo, assim como a goma arábica. Possui madeira moderadamente pesada, dura, de textura grossa, grã revessa, e de boa resistência e durabilidade, sendo indicada para obras internas em construção civil, marcenaria, confecção de esquadrias, lenha e carvão vegetal. Sua árvore ainda possui qualidades ornamentais que a recomendam para a arborização paisagística (LORENZI, 2009).

Há estudos na literatura que potencializam a *Enterolobium gummiferum* para usos de recuperação de áreas degradadas, principalmente aquelas do Cerrado, sendo, assim, recomendada para restauração florestal de fragmentos com condições ambientais semelhantes (AZEVEDO, 2008; PILON e DURIGAN, 2013; SOUZA, 2018).

### **Processo de carbonização da madeira**

O processo de carbonização da madeira ocorre quando a mesma é submetida a um tratamento térmico acima de 300°C, numa atmosfera redutora controlada. Consiste em um processo de pirólise lenta em que o objetivo principal é eliminar a maior parte do oxigênio pela ação do calor, possibilitando a concentração do carbono na estrutura residual (carvão vegetal) e uma fração volátil composta por gases condensáveis (licor pirolenhoso) e não condensáveis, como CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, entre outros (PINHEIRO, 2006; VALE e GENTIL, 2008; SILVA e ATAÍDE, 2019).

Desta forma, o processo de carbonização tem como finalidade concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto final. A relação teor de carbono no carvão vegetal/teor de carbono na madeira é de aproximadamente 1,7 (BRAGA, 1992). O carvão é apenas uma fração dos produtos que podem ser obtidos durante a carbonização, sendo que, se utilizados os sistemas apropriados para a coleta, também podem ser aproveitados os condensados pirolenhosos (líquido pirolenhoso) e os gases não-condensáveis (COUTO *et al.*, 2004).

Em relação ao sistema de produção, o processo de carbonização depende da madeira utilizada e das variáveis das reações, tais como a taxa de aquecimento, temperatura final da carbonização, tempo de exposição e tipo de atmosfera do forno, ou seja, oxidante, redutora ou neutra, que definem tanto a quantidade como a qualidade do carvão vegetal produzido. (ALVES, 2003; TRUGILHO, 2008). Desta

forma, o processo de carbonização da madeira requer controle, e para que isto ocorra, é necessário identificar as etapas do processo e os parâmetros a serem controlados (SANTOS, 2017).

De acordo Medeiros e Rezende (1983), as etapas de degradação térmica da madeira são expressas por meio de quatro faixas de temperaturas:

- Abaixo de  $\leq 200^{\circ}\text{C}$ : Fase endotérmica, quando ocorre a liberação de vapor d'água e secagem da madeira, iniciando-se a decomposição térmica.
- De  $200^{\circ}\text{C}$  a  $280^{\circ}\text{C}$ : Predominância de reações endotérmicas, quando ocorre a liberação de gases da madeira, como ácido acético, metanol, água e  $\text{CO}_2$ .
- De  $280^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$ : Fase exotérmica, com ocorrência da liberação de gases combustíveis, como  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  e alcatrões. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.
- Acima de  $500^{\circ}\text{C}$ : o carvão já está estável, apenas pequenas quantidades de materiais voláteis, principalmente  $\text{H}_2$ , são liberadas.

Segundo a Fundação João Pinheiro (1988), a influência da temperatura final de carbonização faz-se notar em relação ao rendimento da carbonização e ao teor de carbono fixo no carvão vegetal produzido. Por esse motivo, há vários estudos desenvolvidos a partir de diferentes marchas e temperaturas finais de carbonização, como por exemplo, no experimento com madeira de *Eucalyptus pellita*, em escala de laboratório considerando taxa de aquecimento de  $1,25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , Oliveira *et al.* (2010) identificaram  $450^{\circ}\text{C}$  como a temperatura final de carbonização que apresentou maior rendimento gravimétrico e elevados poder calorífico superior e teor de carbono fixo.

Barcellos (2007), Figueiredo *et al.* (2018) e Araújo *et al.* (2018), trabalhando com espécies nativas, constataram em seus estudos que a temperatura final da carbonização interferiu na qualidade do carvão vegetal produzido em que o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis reduziram com o aumento da temperatura de carbonização, enquanto o contrário foi observado para o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior.

De modo geral, quanto maior for a temperatura final de carbonização menor será o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o teor de carbono fixo (AZEVEDO *et al.*, 2013), isso porque a redução no rendimento gravimétrico está relacionada à perda de massa resultante da degradação térmica dos constituintes da

madeira a partir do incremento da temperatura, que, simultaneamente, há concentração de carbono no carvão (ARAÚJO *et al.*, 2018). Neste sentido, os mesmos autores ressaltaram a necessidade de se avaliar a temperatura final de pirólise para produção comercial de carvão vegetal, a fim de manter o equilíbrio entre o rendimento da fração sólida e a qualidade do material combustível resultante.

### **Propriedades da madeira e sua influência no carvão vegetal**

A madeira, por ser classificada como um material orgânico, heterogêneo, anisotrópico, higroscópico e poroso, apresenta variabilidade entre as suas características tecnológicas, sendo, assim, fundamental realizar um estudo sobre o comportamento das suas propriedades tecnológicas (KLOCK, 2000). Quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, a qualidade da madeira é um fator de extrema importância, levando em consideração o fato de que as propriedades físicas, químicas, energéticas e anatômicas do lenho influenciam no processo de carbonização e conseqüente quantidade e qualidade do carvão.

A umidade, por exemplo, influencia diretamente no rendimento do carvão vegetal, sendo indicadas madeiras com umidade abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF) para a produção e utilização energética. Quanto maior for a umidade da madeira, mais quebradiço e friável será o carvão resultante, pois, durante o processo de carbonização, parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor, gerando pressão interna, o que acarreta na diminuição do rendimento gravimétrico e poder calorífico, e aumento da friabilidade do carvão vegetal (ROUSSET *et al.*, 2011; FROEHLICH e MOURA, 2014).

De acordo Oliveira, Gomes e Almeida (1982), a friabilidade reflete a capacidade do carvão vegetal em produzir partículas finas (finos) devido à ação combinada de abrasão e choques, principalmente durante o manuseio e transporte. Neste sentido, visto que a friabilidade do carvão está correlacionada com a sua resistência mecânica, para fins industriais são desejáveis aqueles menos friáveis (SILVA *et al.*, 2007)

Dentre as características físicas da madeira, a densidade é uma das propriedades mais relevantes para a produção de carvão vegetal. São recomendadas madeiras com densidade básica superior a 500 kg m<sup>-3</sup>, pois quanto maior for a densidade da madeira maior será a produção em massa em carvão

vegetal, além de que, maior será a densidade energética e resistência mecânica do carvão produzido. A utilização de madeiras densas para fins energéticos ainda proporciona vantagens no campo, como a menor área de estocagem e manuseio da madeira, maior rendimento energético no transporte e maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira (PEREIRA, SCHAITZA e BAGGIO, 2000; TRUGILHO *et al.*, 2001; PEREIRA *et al.*, 2012).

Segundo Santos (2010), a espessura de parede das fibras reflete diretamente na densidade do lenho, visto que fibras de parede celular espessas apresentam maior volume de biomassa. Neste sentido, ao analisar morfológicamente as fibras da madeira, obtêm-se informações auxiliares na indicação de espécies potenciais para produção de carvão vegetal, sendo recomendadas madeiras caracterizadas pela presença de fibras com fração de parede alta acima de 60%, que está correlacionada com a sua alta densidade (PAULA, 2005).

Diretamente correlacionada com a densidade e poder calorífico da madeira, tem-se a densidade energética, parâmetro de grande importância para o uso energético, que está relacionada à energia contida num determinado volume de madeira, ou seja, demonstra a quantidade de calor em um volume definido na biomassa (ORELLANA *et al.*, 2018; BARROS *et al.*, 2019).

Além de sofrer influência das características físicas e anatômicas, o processo de carbonização também está relacionado à composição química de três componentes da madeira, ou seja, a celulose e as hemiceluloses, que representam cerca de 70% da sua composição e são os componentes menos estáveis; e a lignina, componente mais estável, que se degrada de modo lento, sendo a principal responsável pela formação do carvão vegetal. Os primeiros componentes a se degradarem são as hemiceluloses, na temperatura de 200°C a 260°C, seguidas da celulose (240°C a 350°C) e da lignina, cuja degradação inicia-se a 150°C e se mantém até 500°C (GOLDSTEIN, 1977; ANDRADE *et al.*, 2004).

A resistência térmica dos constituintes químicos da madeira está intimamente relacionada às suas respectivas estruturas, ou seja, quanto mais complexa, rígida e cristalina for a estrutura, mais estável do ponto de vista térmico será o componente químico (ANDRADE *et al.*, 2004). Deste modo, para a produção de carvão vegetal, é indicado que a madeira apresente maior teor de lignina e menor teor de holoceluloses, visto que os teores de lignina desempenham um papel vital no processo de combustão em decorrência do estado de redução na composição

química da madeira, tanto em nível molecular quanto atômico. Logo, proporciona maior concentração de carbono no carvão vegetal, o que irá contribuir significativamente para o poder calorífico do produto final (COUTO *et al.*, 2004; DADILE *et al.*, 2020).

Já os componentes químicos acidentais da madeira, que são os extrativos e cinzas, embora se encontrem em pequenas proporções, também apresentam influência nas propriedades e qualidade do processamento do lenho (KLOCK *et al.* 2005). Segundo Protásio *et al.* (2012), a depender da composição química destes extrativos e da sua estabilidade térmica, altos valores são desejáveis para a produção energética, pois maximiza o rendimento do carvão vegetal. Enquanto os valores elevados de cinzas, isto é, a fração inorgânica da madeira, não são benéficos para o setor energético, pois resultarão em um carvão vegetal com elevado conteúdo de minerais (COSTA *et al.*, 2014).

Com relação aos parâmetros analisados no processo de carbonização, o rendimento gravimétrico é um parâmetro relevante quando se pretende indicar um material potencial para a produção energética, pois este envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal (ANDRADE, 1993). De acordo com Protásio *et al.* (2012), o rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresenta correlações diretas com as características da madeira, sendo estas negativas com o teor de holocelulose e positivas com o teor de lignina total, teor de extrativos e com a densidade básica da madeira.

Quando se pensa na utilização do carvão vegetal como fonte de energia em substituição aos combustíveis fósseis, deve-se levar em consideração o seu poder calorífico superior, que pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de carvão (CETEC, 1982). Segundo Oliveira, Gomes e Almeida (1982), quanto maior a umidade, menor é o poder calorífico, fato que se explica tendo em vista que a madeira com maior umidade necessitará de maior quantidade de calor para evaporação de sua água.

Visto que o carvão vegetal é um material altamente higroscópico, a umidade contida no seu interior exerce grande influência no rendimento dos processos em que será utilizado, pois a água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno, o que pode provocar perda de calor, aumentando, assim, o consumo específico de carbono e diminuindo a resistência do carvão vegetal (MORAIS, NASCIMENTO e MELO, 2005).



Em relação à química imediata do carvão vegetal, representada pelos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, seus parâmetros estão diretamente relacionados com a qualidade e rendimento gravimétrico do carvão vegetal produzido, além de representarem relevância no balanço de massa dos processos que o utilizam como redutor (OLIVEIRA, GOMES e ALMEIDA, 1982). De acordo Mendes, Gomes e Oliveira (1982), a temperatura final de carbonização é o principal parâmetro que influencia na química imediata do carvão, representando assim uma correlação positiva com o carbono fixo e negativa com os materiais voláteis.

O carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente no carvão vegetal. É considerado uma das características mais importantes no procedimento de qualificação, uma vez que está diretamente correlacionado com o poder calorífico do combustível, em que possui uma relação diretamente proporcional à densidade básica e aos teores de lignina e extrativos da madeira, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose (BATAUS *et al.*, 1989).

Os materiais voláteis são definidos como aquelas substâncias que se desprendem da madeira, como gases durante a carbonização e/ou queima do carvão, e estão ligados à estrutura física do carvão (BARCELLOS, 2007). Um aumento de materiais voláteis acarreta em redução no percentual de carbono fixo e, conseqüentemente, na diminuição da reatividade no processo de combustão, uma vez que, quanto maior o teor de carbono, maior é a reatividade do processo (FROEHLICH e MOURA, 2014).

Já o conteúdo de cinzas resultante do processo de carbonização é usualmente pequeno, podendo incluir cálcio, potássio, magnésio e outros, sendo determinado como o resíduo sólido inorgânico existente após a queima do carvão vegetal (ANDRADE, 1993). De acordo Pimenta e Barcellos (2000), são indicados até 3% de cinzas, pois, um alto teor pode provocar o fenômeno da segregação no processo siderúrgico, que é o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, deixando-os assim menos resistentes.

Visto que a qualidade do carvão vegetal está relacionada às características da matéria-prima e dos parâmetros utilizados no processo de carbonização (ASSIS *et al.*, 2016), torna-se essencial o desenvolvimento de pesquisas voltadas para caracterização intrínseca das madeiras destinadas ao setor energético.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. P.; PROENÇA, C. E. B.; SANO, S. M.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: espécies vegetais úteis**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 464 p., 1998.
- ALVES, C. R. **Utilização de frações de alcatrão na síntese de resinas fenólicas para substituição parcial de fenol e formaldeído**. 2003. Tese (Ciência Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.
- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1993.
- ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. Pirólise de resíduos do coco-da-baia (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n.5, p. 707-714, set./out. 2004.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, 2016.
- ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; NETO, R. M. G.; ROCHA, M. F. V. R.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, e201701546, p. 1-9, 2018.
- AZEVEDO, C. H. S.; SANTOS, F. G.; ANDRADE, V. O.; SILVA, A. G.; SANTOS, F. E. V. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1279-1287, jul. 2013.
- AZEVEDO, M. I. R. **Estrutura e restauração de cerradão em Palmas-TO e germinação de sementes de *Buchenavia tomentosa* Eichler, *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne, *Guazuma ulmifolia* Lam. e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F. Macbr.** 2008. 139 f. Tese (Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 163 f. Tese (Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- BARROS, M. L.; SILVA, R. G. C.; PADILHA, M. C. S.; SÁ, V. A. Caracterização energética de *Eucalyptus* sp. provenientes de dois tratamentos do solo em Alagoas. In: IV Congresso Brasileiro de Eucalipto. **Anais...** Salvador, BA, 2019.
- BATAUS, Y. S. de L. PASTORE JÚNIOR, F.; OKINO, E. Y. A.; PASTORE, T. C. M. **Carbonização integral de frutos de palmáceas**. Brasília: IBAMA, LPF, 1989.

BATISTA, A.; CALMON, M.; VALLE, R. S. T. Florestas: Já pensou em lucrar com APP e RL?. **Revista A Granja**, Porto Alegre-RS. Ed. 845, maio, 2019. 65Disponível em: <<https://edcentaurus.com.br/agranja/edicao/845/materia/9936>>. Acesso em: 18 de jan. 2021.

BRAGA, R. N. B. **Carvão vegetal, produção, propriedades e aplicações na siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 320 p., 1992.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese – Ano base 2019**. Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Rio de Janeiro, 2020.

CALGARO, H. F.; BUZETTI, S.; SILVA, L. R.; STEFANINI, L.; MIRANDA, L. P. M.; MORAES, M. A.; MORAES, M. L. T. Distribuição natural de espécies arbóreas em áreas com diferentes níveis de antropização e relação com os atributos químicos do solo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n. 2, p. 233-243, 2015.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **31º Balanço Energético do Estado De Minas Gerais: BEEMG – Ano base 2015**. Belo Horizonte: CEMIG, 2017.

CETEC - **Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 83 p., 1982.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46. 2014.

COUTO, L. C; COUTO. L; WATZLAWICK, L. F; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, v.1, n.1, p. 71-92. 2004.

DADILE, A. M.; SOTANND, O. A.; ZIRA, B. D.; GARBA, M.; YAKUBU, I. Evaluation of Elemental and Chemical Compositions of Some Fuelwood Species for Energy Value. **International Journal of Forestry Research**, 2020.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, volume 137, 2019.

FIGUEIREDO, M. E. O.; JÚNIOR LONGUE, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S. Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 420-431, jan.- mar., 2018.

FONTES, A. A. **A Cadeia Produtiva da Madeira para Energia**. 2005. 134 f. Tese (Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendências**, v.9, n.1, Jan.-Jun. 2014.

FUNDAÇÃO João Pinheiro, Belo Horizonte. Centro de Estudos Políticas e Sociais. **Diagnóstico, avaliação e perspectivas do sistema produtivo de carvão vegetal.** Belo Horizonte, 5v. 86p., 1988.

GOLDSTEIN, I. S. **Wood Technology Chemical aspect.** American Chemical Society, Washington, 322 p. 1977.

Haidar, R. F. **Fitossociologia, diversidade e sua correlação com variáveis ambientais em florestas estacionais do bioma cerrado no planalto central e do Nordeste do Brasil.** 2008. 254 f. Dissertação (Ciências Florestais) - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2008.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2020 – Ano base 2019.** São Paulo, SP, 2020.

JENRICH, H. **Vegetação arbórea e arbustea nos altiplanos das chapadas do Piauí central.** Teresina: Ministério do Interior-DNOCS/Covênio Brasil-Alemanha, p. 90, 1989.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H.E. Moore.** 2000. 292 f. Tese (Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira.** 3ª ed. Curitiba: UFPR, 86 p., 2005.

LEITE, E. J. State-of-knowledge on *Astronium fraxinifolium* Schott (Anacardiaceae) for genetic conservation in Brazil. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 5, n. 1, p. 63–77, 2002.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras – Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Vol. 02, 3ª ed. Instituto Plantarum, 2009.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa: Plantarum, 1992.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** 2 ed. Nova Odessa: Plantarum. 1998.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2000.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** 6. ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2014.

MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. M. Propriedades Termoquímicas dos Finos de Carvão Vegetal e de Carvão mineral para a Injeção nas Ventaneiras de Altos-Fornos Siderúrgicos. **Revista Biomassa e Energia**, v. 1, n.4, p. 353-363, 2004.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A. **Livro vermelho da flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 1 ed. p 140. 2013.

MEDEIROS, C. A.; REZENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. **Revista da Fundação João Pinheiro**, Belo Horizonte, v. 13, n. 9/12, p. 42-48, set./dez. 1983.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. de. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: Produção e utilização de carvão vegetal. **Anais...** Belo Horizonte: CETEC, p. 74-89, 1982.

MINAS GERAIS, Lei nº 18.365, de 01 de setembro de 2009. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 2009.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomassas: Bioma Cerrado. 2020**. Disponível em: < <https://antigo.mma.gov.br/biomassas/cerrado.html>>. Acesso em: 18 de jan. 2021.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **PPCerrado – Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no Cerrado:2ª fase (2014-2015)**. Brasília: MMA, 2014.

MORAIS, S. A. L., NASCIMENTO, E. A., MELO, D. C. Análise da Madeira de *Pinus Carpa* Parte 1 – Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis. SIF, Sociedade de Investigações Florestais, **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. AB.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, p. 853-858, Feb. 2000.

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

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Estudos preliminares de normatização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, CETEC. p. 7-38. 1982.

ONU Brasil. **Adoção do Acordo de Paris**. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima — Conferência das Partes, Vigésima primeira sessão. Paris, 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>>. Acesso em: 18 de fev. de 2021.

ORELLANA, B. B. M. A.; VALE, A. T.; GONÇALEZ, J. GUEDES, M. C.; ORELLANA, J. B. P.; LIMA, C. M. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. especial, p. 773-781, dez. 2018.

PAULA, J. E. Característica anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, Lavras, v.11, n.1, p.90-100, 2005.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Grevillea robusta*. Colombo: **EMBRAPA Florestas**, 11 p., 2000.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, 2012.

PILON, N. A. L.; DURIGAN, G. Critérios para indicação de espécies prioritárias para a restauração da vegetação de cerrado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 389-399, set. 2013.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. S. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 76, 2000.

PINHEIRO, P. C. C. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 1ª ed. Belo Horizonte: Autores, 2006.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295– 307, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; DE SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, vol. 92, 2011.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 159 p. Tese (Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2010.

SANTOS, S. F. O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 2017. 144 f. Tese (Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2017.

SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M.; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência da temperatura e das taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão vegetal de *Eucalyptus cloeziana*. **Ciência da Madeira**, vol. 8, 2017.

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, mar. 2007.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, volume 172, 2019.

SIQUEIRA, H. F.; PATRÍCIO, E. P. S.; LIMA, M. D. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Avaliação de três madeiras nativas do cerrado goiano visando à utilização energética. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 5, p. 615-624, set./out. 2020.

SOUZA, L. R. **Incorporação de lodo de esgoto (biossólido) no substrato de produção de mudas de *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F. Macbr. (timburi-do-cerrado)**. 2018. 37 f. Monografia (Engenharia Florestal). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.114-201, 2001.

TRUGILHO, P. F. A carbonização da madeira. **Opiniões: Sobre as Florestas Energéticas**, Ribeirão Preto - SP, v. 11, n. 5, p.25-25, jun./set. 2008.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (ed). Tecnologia aplicadas ao setor madeireiro III. **Anais...** Jerônimo Monteiro, ES, 2008.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145. 2010.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. Silvicultura brasileira: oportunidades e desafios da economia verde. Rio de Janeiro: **Fundação Brasileira Desenvolvimento Sustentável**, 2012.

**Densidade básica e análise anatômica das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr.**

**RESUMO**

Com o intuito de qualificar a madeira das espécies de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* para produção energética, nativas oriundas de remanescentes florestais do Cerrado, este trabalho teve como objetivo estudar a densidade básica e a biometria de fibras e elementos de vasos do seu lenho. Foram retirados discos na altura de 1,3 m do solo de três árvores de cada espécie e confeccionados perpendicularmente em cunhas. Os parâmetros analisados foram: densidade básica, dimensão das fibras e dos elementos de vasos; e os índices qualitativos (fração de parede, coeficiente de flexibilidade e índice de Runkel) calculados a partir dos valores médios da morfologia das fibras. Embora a *E. gummiferum* tenha maior fração de parede celular em relação a *A. fraxinifolium*, ambas as espécies, classificadas como madeiras de média densidade e anatomicamente semelhantes, apresentaram madeira com potencial para fins energéticos.

**Palavras-chave:** Biometria de fibras. Índice de qualidade. Fração de parede.



**Basic density and anatomical analysis of the wood of *Astronium fraxinifolium*  
Schott and *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr.**

**ABSTRACT**

In order to qualify the wood of the species of *Astronium fraxinifolium* and *Enterolobium gummiferum* for energy production, native from the Cerrado forest remnants, this work aimed to study the basic density and the biometry of fibers and vessel elements of its wood. Discs were removed at a height of 1.3 m from the soil of three trees of each species and made perpendicularly in wedges. The parameters analyzed were: basic density, fiber and vessel elements dimensions; and the qualitative indices (wall fraction, flexibility coefficient and Runkel index) calculated from the mean values of the fiber morphology. Although *E. gummiferum* has a higher fraction of cell wall in relation to *A. fraxinifolium*, both species, classified as medium density wood and anatomically similar, presented wood with potential for energy purposes.

**Keywords:** Fiber biometrics. Quality score. Wall fraction.

## INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia industrial madeireira possibilitou a expansão e a aplicação da madeira para diversas finalidades, como para a construção civil, produção energética, papel e celulose, dentre outros, que garantem a sua valorização e demanda (LOURENÇO e BRANCO, 2013). Essa crescente utilização é motivada, principalmente, pelas suas características tecnológicas e qualidade do lenho.

Segundo Gonzalez *et al.* (2006), a qualificação da madeira se refere a sua capacidade em satisfazer os requisitos necessários para a fabricação de um determinado produto. Dentre as características que expressam a sua qualidade, tem-se a densidade, que está diretamente relacionada ao volume de espaços vazios existentes na madeira (MORESCHI, 2014). Para a produção energética, por exemplo, são recomendadas madeiras com densidade básica superior a  $500 \text{ kg.m}^{-3}$ , pois quanto maior for a densidade da madeira, maior será a produção em massa em carvão vegetal (TRUGILHO *et al.*, 2001).

Outra variável importante na qualificação das espécies florestais é a anatomia do lenho, em que a determinação da biometria de fibras e elementos de vasos, mensurados pelo seu comprimento, largura, espessura de parede e o diâmetro do lúmen, permitem estimar índices qualitativos e classificar, mesmo que preliminarmente, a madeira.

De acordo Santos *et al.* (2011), a espessura de parede das fibras reflete diretamente na densidade da madeira, já que fibras de parede celular espessas apresentam maior volume de biomassa. Neste sentido, ao analisar morfologicamente as fibras da madeira, obtêm-se informações auxiliares na indicação de espécies potenciais para produção de carvão vegetal (PAULA, 2005).

Uma vez que o conhecimento das características da madeira, associadas ao manejo sustentável, podem acarretar ganhos tanto ambientais quanto financeiros em uma propriedade (GUMA, 2013), estudos relacionados à qualidade de exemplares nativos tornam-se necessários para que seja possível realizar um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), além de proporcionar que espécies pouco conhecidas e com alto potencial sejam introduzidas no mercado.

Neste contexto, a *Astronium fraxinifolium* Schott (Gonçalo-alves) e a *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr (timburi-do-cerrado), por exemplo, são

espécies nativas e endêmicas do Cerrado brasileiro, pertencentes às famílias Anacardiaceae e Fabaceae, respectivamente, que por apresentarem potencial para o reflorestamento e manejo de áreas degradadas, tornam-se como opções viáveis para produtores, sendo, assim, necessário e importante o desenvolvimento de pesquisas voltadas para caracterização intrínseca das suas madeiras.

Deste modo, tendo em vista a importância da qualidade da madeira para seu uso racional e sustentável, o presente estudo teve como objetivo analisar as madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* para fins energéticos, com base nas características anatômicas e densidade básica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizados discos de 5 cm de espessura do DAP (diâmetro a 1,3 m do solo) de três árvores de *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-Alves), coletadas no município de Montes Claros, MG, Brasil (coordenadas: 16° 41' 04"W, 43° 50' 50"S), e de três árvores de *Enterolobium gummiferum* (timburi-do-cerrado), coletadas no município de Carbonita, MG, Brasil (coordenadas: 43° 8' 21"W, 17° 32' 23"S). Ambos exemplares foram provenientes de uma área de vegetação remanescente do bioma Cerrado.

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima dos municípios de Montes Claros e Carbonita são do tipo tropical Aw, sendo que Montes Claros possui temperatura média anual de 23,1°C e pluviosidade média anual de 869 mm, a Carbonita apresenta temperatura média anual de 21,9°C, com totais pluviométricos anuais de 855 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2021).

Os discos referentes ao DAP das árvores foram confeccionados perpendicularmente em cunhas. Duas cunhas opostas foram utilizadas para determinar a densidade básica de acordo com a NBR 11941 (2003), que consistiu na relação entre a massa seca da madeira pelo seu volume saturado.

Para a análise anatômica, retiraram-se pequenos fragmentos do alburno de uma das cunhas para a confecção das lâminas de macerado. A dissociação do tecido lenhoso foi realizada com base na solução macerante de peróxido de hidrogênio, ácido acético e água destilada, conforme metodologia de Mady (2007). Foram confeccionadas três lâminas por espécie, e com o auxílio do microscópio óptico com câmera acoplada e sistema de aquisição de imagens, foram realizadas

25 leituras para o comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede das fibras e dos elementos de vasos.

A partir dos valores médios das dimensões das fibras de cada espécie, foi possível calcular os índices qualitativos da madeira, sendo a Fração de Parede, o Coeficiente de Flexibilidade e o Índice de Runkel, de acordo com Barrichelo e Brito (1976).

Os resultados foram interpretados em função das espécies e suas propriedades tecnológicas estudadas. Foram avaliados por meio das análises descritivas e de variância (ANOVA) a 5% de significância, utilizando o *software* R Core Team (2019).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a densidade básica da madeira houve diferença estatística entre as espécies estudadas (Tabela 1). A *Astronium fraxinifolium* apresentou maior massa específica ( $632 \text{ kg m}^{-3}$ ) em relação à *Enterolobium gummiferum* ( $548 \text{ kg m}^{-3}$ ), contudo, ambas as espécies florestais foram classificadas como de média densidade ( $500 \text{ a } 700 \text{ kg m}^{-3}$ ), segundo classificação de Melo, Coradin e Mendes (1992).

Tabela 1 – Valores médios e intervalo de confiança da densidade básica e análise anatômica das madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum*.

| Parâmetros                                  | Espécie                 |                      |
|---|-------------------------|----------------------|
|   | <i>A. fraxinifolium</i> | <i>E. gummiferum</i> |
| <b>Densidade básica (kg m<sup>-3</sup>)</b> | 632 (±0,04) a           | 548 (±0,03) b        |
| <b>Fibras (µm)</b>                          |                         |                      |
| Comprimento                                 | 865,90 (±49,64) a       | 853,06 (±54,77) a    |
| Diâmetro total                              | 22,58 (±1,56) a         | 23,13 (±1,41) a      |
| Diâmetro do lúmen                           | 13,99 (±1,32) a         | 13,76 (±1,41) a      |
| Espessura da parede                         | 4,30 (±0,42) a          | 4,69 (±0,43) a       |
| <b>Vasos (µm)</b>                           |                         |                      |
| Comprimento                                 | 231,93 (±24,55) a       | 227,24 (±15,56) a    |
| Diâmetro total                              | 179,78 (±29,16) a       | 207,89 (±31,24) a    |

em que: Médias seguidas por uma mesma letra em uma mesma linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste F a 5% de significância.

A classificação quanto à densidade da madeira permite direcionar as espécies estudadas de acordo com o produto e sua qualidade. Para a produção de carvão vegetal, por exemplo, se analisada pontualmente a densidade, ambas as espécies encontram-se na média exigida pelo setor ( $> 500 \text{ kg m}^{-3}$ ), com destaque para *A. fraxinifolium*, pois quanto maior for a densidade da madeira, maior será a densidade e resistência mecânica do carvão produzido (PEREIRA *et al.*, 2012).

Os resultados para a densidade básica foram condizentes com aqueles descritos na literatura para espécies do Cerrado, que variam de 200 a 845 kg m<sup>-3</sup> (VALE, BRASIL e LEÃO, 2002; SILVA, VALE e MIGUEL, 2015; SIQUEIRA *et al.*, 2020). Valores similares foram apresentados por Oliveira (2014) para a densidade básica das madeiras de *A. fraxinifolium* (610 kg m<sup>-3</sup>) e *E. gummiferum* (430 kg m<sup>-3</sup>).

Em relação à análise anatômica, as madeiras de *A. fraxinifolium* e *E. gummiferum* não apresentaram diferenças estatísticas, sendo assim consideradas semelhantes às dimensões das suas fibras e elementos de vasos (Tabela 1).

Ambas as madeiras estudadas foram classificadas como de fibras muito curtas, com 865,9 µm de comprimento para *A. fraxinifolium* e 853,06 µm para *E. gummiferum*, o que caracteriza uma quantidade grande de fibras para uma determinada quantidade de madeira, assim como as do gênero *Eucalyptus* que variam entre 700 a 1.300 µm (SILVA, 2005). As fibras ainda apresentaram largura média, diâmetro do lúmen estreito e paredes delgadas a espessas.

Os valores médios da dimensão das fibras foram semelhantes àqueles apresentados por Paula (2005), Paes *et al.* (2013) e Faria *et al.* (2020) para espécies florestais do Cerrado, com variação de 688 a 2.052,9 µm para o comprimento; 12 a 27,7 µm para o diâmetro total; 1,6 a 16,3 µm para o diâmetro do lúmen; e 4,3 a 11,5 µm para a espessura da parede das fibras.

Para a dimensão dos vasos, as espécies florestais apresentaram valores altos de diâmetro total e comprimento (Tabela 1), podendo, assim, ser considerados como de baixa frequência, já que, de acordo Evangelista *et al.* (2010) e Lima *et al.* (2011), este parâmetro, normalmente, está associado aos maiores valores de diâmetros transversais. Neste sentido, estas características potencializam as espécies em estudo para fins energéticos, pois para a produção de carvão vegetal são desejáveis o menor conteúdo de espaços vazios como lúmen das fibras e vasos, pois estes não contribuem com o rendimento gravimétrico do carvão e influenciam negativamente na qualidade do mesmo (PEREIRA *et al.*, 2012).

Resultados similares à dimensão dos vasos foram apresentados por Motta *et al.* (2014) com espécies do Cerrado, como por exemplo, *Cedrela fissilis* com 224,08 µm de diâmetro total e 272,73 µm de comprimento. Gonçalves *et al.* (2020), também trabalhando com a *A. fraxinifolium*, obtiveram resultados semelhantes, sendo 1.040 (±154) µm, 6,90 (±1,67) µm e 3,17 (±0,7) para o comprimento, diâmetro do lúmen e

espessura da parede das fibras, respectivamente; e 109,84 ( $\pm 15,51$ ) para o diâmetro total dos vasos.

Os índices qualitativos das madeiras, determinados a partir da dimensão das fibras, forneceram um diagnóstico prévio da qualidade das espécies em estudo. Assim como para a morfologia das fibras, constatou-se que não houve diferença estatística entre os parâmetros avaliados (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios dos índices qualitativos das madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum*.

| <b>Espécie</b>          | <b>Coefficiente de flexibilidade (%)</b> | <b>Índice de Runkel</b> | <b>Fração de parede (%)</b> |
|-------------------------|--|-------------------------|-----------------------------|
| <i>A. fraxinifolium</i> | 61,95 a                                  | 0,61 a                  | 38,51 a                     |
| <i>E. gummiferum</i>    | 59,50 a                                  | 0,68 a                  | 41,23 a                     |

em que: Médias seguidas por uma mesma letra em uma mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste F a 5% de significância.

Para o coeficiente de flexibilidade, que está relacionado com a facilidade de união entre as fibras, e para o índice de Runkel, que se refere à firmeza e rigidez destas, ambas as espécies florestais foram classificadas como madeiras de fibras flexíveis e boas para o setor de papel e celulose, com tendências a formar um papel altamente resistente (BARRICHELO e BRITO, 1976; BEKTAS, TUTUS e EROGLU, 1999).

Já para o setor de carvão vegetal, que leva em consideração o índice de fração de parede das fibras por estar relacionado à maior presença de componentes que possam gerar energia, como a lignina, ambas as espécies florestais apresentaram valores abaixo do recomendado por Paula (2005) para fins energéticos (> 60%). Entretanto, segundo Foelkel (2007), quando a fração de parede

apresenta um percentual maior que 40%, as fibras tendem a ser mais rígidas e difíceis de colapsarem, ou seja, para produção de carvão vegetal este fenômeno é favorável. Deste modo, a *E. gummiferum* é uma boa indicação para o setor energético.

Os resultados para os índices qualitativos estão de acordo com aqueles obtidos por Faria (2016) com espécies do Cerrado e por Baldin *et al.* (2017) com espécies de *Eucalyptus*, gênero mais utilizado no setor florestal.

Uma vez que as propriedades anatômicas refletem diretamente na densidade básica da madeira, Vital (1984) menciona que a densidade tende a aumentar em função do aumento da espessura da parede, contudo, mesmo a *E. gummiferum* apresentando menor densidade, suas dimensões anatômicas foram estatisticamente iguais a *A. fraxinifolium*. Este fenômeno pode ser explicado pela especificidade de cada espécie. Além de que, mesmo com paredes espessas, a *E. gummiferum* pode ter na sua composição anatômica maior porcentagem de tecidos leves, com espaços vazios, que contribuem para os resultados encontrados.

Para elucidar esse ponto os autores indicam a caracterização anatômica completa das espécies florestais, e recomendam a avaliação adicional das demais características tecnológicas, como a química, para melhor aproveitamento do material. Ressalta-se, ainda, que o conhecimento dessas espécies madeireiras, alinhado ao manejo sustentável, diminuirá a pressão sobre outras essências proibidas de corte, podendo ser uma possibilidade de associação às espécies tradicionalmente utilizadas, principalmente quando se objetiva produzir carvão vegetal.

## CONCLUSÃO

As espécies *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* foram classificadas como madeiras de média densidade e apresentaram semelhanças anatomicamente. Ambas possuem potencial e qualidade para produção de carvão vegetal, sendo indicado a tecnologia da madeira, juntamente com a silvicultura e manejo florestal, investigações mais aprofundadas sobre as espécies e seus coprodutos.



## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: Determinação da densidade básica da madeira. Rio de Janeiro, 2003.
- BALDIN, T.; MARCHIORI, J. N. C.; NISGOSKI, S.; TALGATTI, M.; DENARDI, L. Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. **Ciência da Madeira**, p. 114-126. 2017.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Série Divulgação PRODEPEF**, n.13, p.1-145. 1976.
- BEKTAS, I.; TUTUS, A.; EROGLU, H. A study of the suitability of Calabrian Pine (*Pinus burtia*, Jen) for pulp and paper manufacture. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 23, n. 3, p. 589-597. 1999.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**, 2021. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>> Acesso em: 05 de abril de 2021.
- EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; VALLE, M. L. A.; XAVIER, B. A. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284. 2010.
- FARIA, M. C. G. **Potencial madeireiro de 22 espécies arbóreas do Cerrado: caracterização anatômica, física e energética**. 2016. 103 f. Dissertação (Biodiversidade florestal). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO. 2016.
- FARIA, M. C. G.; SILVA NETO, C. M.; LIMA, P. A. F.; CHAGAS, M. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; SETTE JUNIOR, C. R. Brazilian cerrado species: wood characteristics. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 4, p. 1335-1352, July/Aug. 2020.
- FOELKEL, C. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel**. *Eucalyptus* Online Book & Newsletter, p. 48. 2007.
- GONÇALEZ, J. C.; BREDAS, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. & VALE, A. T. Características Tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341. 2006.
- GONÇALVES, R. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; DE MORAES, M. L. T.; CAMBUIM, J.; MARTINS, A. R. Anatomical variation in vascular attributes of wood of *Astronium fraxinifolium* Schott trees from the soil loan area of a hydroelectric plant and an experimental plantation. **Flora**, Germany. vol. 265, abril, 2020.

GUMA, R. L. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tetrorchidium rubrivenium* Poeppig & Endlicher**. 2013. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; JÚNIOR, E. O. B.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINE, F.; 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**, United Kingdom. vol. 140, 2020.

LOURENÇO, P.; BRANCO, J. **Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI**. História da Construção – Arquiteturas e Técnicas Construtivas, CITCEM. Braga, 2013.

MADY, F. T. M. **Técnicas para microscopia da madeira**. Manaus: editora da Universidade Federal do Amazonas (EDUA); p.80, 2007.

MELO, J. E.; CORADIN V. T. R.; MENDES J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. **Silvicultura**, São Paulo, v. 12, n. 42, p. 695-699, 1992.

MORESCHI, J. C. **Propriedade da Madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, Curitiba. 4ª ed., 2014.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BRAZ, R. L. B.; DUARTE, A. P. C.; ALVES, R. C. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.12, p.2186-2192, dez, 2014.

OLIVEIRA, G. M. V. **Densidade da madeira em Minas Gerais: Amostragem, espacialização e relação com variáveis ambientais**. 2014. 125 p. Tese (Ciências Florestais). Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. 2014.

PAES, J. B.; LIMA, C. R. L.; OLIVEIRA, E.; NETO, P. N. M. Características físico-química, energética e dimensões das fibras de três espécies florestais do semiárido brasileiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica. 2013.

PAULA, J. E. Característica anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, Lavras, v.11, n.1, p.90-100, 2005.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus Clones* for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, 2012.

R CORE TEAM (2019). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros

de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SILVA, C. J. da; VALE, A. T.; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 63-75. 2015.

SILVA, J. C. **Anatomia da Madeira e suas Implicações Tecnológicas**. Universidade Federal de Viçosa: Departamento de Engenharia Florestal. Viçosa, MG. p. 72. 2005.

SIQUEIRA, H. F.; PATRÍCIO, E. P. S.; LIMA, M. D. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Avaliação de três madeiras nativas do cerrado goiano visando à utilização energética. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 5, p. 615-624, set./out. 2020.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.114-201, 2001.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80. 2002.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984.

**Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal**

**RESUMO**

Devido a carência de dados literários sobre o potencial energético das madeiras nativas de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum*, este trabalho teve como objetivo estudar a qualidade das madeiras e do carvão vegetal destas espécies oriundas de remanescentes florestais do Cerrado. Foram retirados discos do DAP (diâmetro a 1,3 m do solo) de três árvores de cada espécie, e confeccionadas amostras para as análises das propriedades químicas e energéticas das madeiras e para a produção de carvão vegetal em condições de laboratório, sob duas temperaturas finais de carbonização (350 e 450°C). Posteriormente, realizou-se a caracterização deste material, bem como os rendimentos da carbonização e a produtividade do carvão vegetal por unidade de volume de madeira. Constatou-se que as madeiras das espécies florestais possuem características satisfatórias que as potencializam para fins energéticos. O carvão vegetal da *E. gummiferum* se destacou pelo baixo teor de cinzas, enquanto a *A. fraxinifolium* apresentou maior densidade aparente e, conseqüentemente, maiores rendimentos da carbonização e produtividade de carvão vegetal por unidade de volume de madeira. Embora os carvões produzidos em ambas as temperaturas finais de carbonização apresentaram parâmetros adequados para uso doméstico e setor siderúrgico, indica-se a utilização da temperatura final de 350°C por apresentar maiores rendimentos gravimétricos e energéticos da carbonização.

**Palavras-chave:** Caracterização da madeira. Carbonização. Rendimento gravimétrico. Espécies do Cerrado.

**Wood quality of *Astronium fraxinifolium* Schott and *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. for charcoal production**

**ABSTRACT**

Due to the lack of literary data on the energetic potential of the native wood of *Astronium fraxinifolium* and *Enterolobium gummiferum*, this work aimed to study the quality of the wood and the charcoal of these species originating from Cerrado forest remnants. Disks were removed at 1.3 m from the soil of three trees of each species, and samples were made for the analysis of the chemical and energetic properties of the wood and for the production of charcoal under laboratory conditions, under two temperatures final carbonization (350 and 450°C). Subsequently, the characterization of this material was carried out, as well as the carbonization yields and the charcoal productivity per unit of wood volume. It was found that the woods of forest species have satisfactory characteristics that enhance them for energy purposes. The charcoal of *E. gummiferum* stood out for its low ash content, while *A. fraxinifolium* showed a higher apparent density and, consequently, higher yields of carbonization and productivity of charcoal per unit of wood volume. Although the coals produced at both final carbonization temperatures showed parameters suitable for domestic use and the steel sector, the use of the final temperature of 350°C is indicated for presenting higher gravimetric and energetic carbonization yields.

**Keywords:** Characterization of wood. Carbonization. Gravimetric yield. Cerrado species.

## INTRODUÇÃO

A energia derivada da biomassa tem sido avaliada como alternativa aos combustíveis fósseis, os quais têm diversos impactos ambientais, principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa (SIEBENEICHLER *et al.*, 2017). Nesta perspectiva, o carvão vegetal, originado em sua maioria de árvores plantadas como as do gênero *Eucalyptus*, posiciona o Brasil como maior produtor no mundo (IBÁ, 2020). Sua principal aplicação é no setor siderúrgico onde, devido seu elevado grau de pureza e baixo custo de produção, atua como agente redutor do minério de ferro e fornecedor de energia para o processo (MACHADO e DE ANDRADE, 2004). Além de contribuir para a indústria siderúrgica, o carvão vegetal é utilizado como fonte de energia nos setores industrial, comercial, agropecuário e residencial (BEN, 2020).

O carvão vegetal é oriundo da carbonização da madeira, que consiste em um processo de pirólise lenta, em que o objetivo é eliminar a maior parte do oxigênio pela ação do calor, possibilitando a concentração do carbono na estrutura residual (carvão vegetal) e uma fração volátil composta por gases condensáveis (licor pirolenhoso) e não condensáveis (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) (PINHEIRO, 2006; SILVA e ATAÍDE, 2019). Assim, as proporções desses produtos resultam dos parâmetros do processo de carbonização, como a taxa de aquecimento e temperatura final (ROUSSET *et al.*, 2011). Além disso, a qualidade do carvão vegetal está diretamente relacionada às características da madeira, sendo que, um dos desafios para o seu processo de produção tem sido maximizar o rendimento gravimétrico (ASSIS *et al.*, 2016).

Segundo Dufourny *et al.* (2019), as propriedades da madeira de folhosas têm um impacto maior nos rendimentos do carvão vegetal e nas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Neste contexto, o desenvolvimento de pesquisas voltadas para caracterização intrínseca das madeiras de espécies do Cerrado, segundo maior bioma do Brasil e que já se destaca pela presença de espécies com frequência e produção de biomassa, pode contribuir com o Plano de Manejo Sustentável do bioma. Além de que, juntamente com o Acordo de Paris (ONU, 2015) e o incentivo ao reflorestamento e cultivo de espécies nativas, também podem proporcionar que exemplares pouco conhecidos e com alto potencial energético sejam introduzidas no mercado.

A *Astronium fraxinifolium* Schott (Gonçalo-alves) e a *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr (timburi-do-cerrado), por exemplo, são espécies

nativas e endêmicas do Cerrado brasileiro, pertencentes às famílias Anacardiaceae e Fabaceae, respectivamente, que, além de apresentarem madeira com valor comercial para a construção civil e fins estruturais, possuem alto potencial para o reflorestamento e manejo de áreas degradadas, (PILON e DURIGAN, 2013; CALGARO *et al.*, 2015), sendo, assim, opções viáveis para os produtores de florestas plantadas.

Desta forma, tendo em vista que a qualidade do carvão vegetal está diretamente correlacionada com as propriedades da matéria-prima e do processo de carbonização, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético das madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* para a produção de carvão vegetal em duas diferentes temperaturas finais de carbonização.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Coleta do material e preparo das amostras**

Foram utilizados dois discos de 5 cm de espessura do DAP (diâmetro a 1,3 m do solo) de três árvores de *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-Alves), coletadas no município de Montes Claros, MG, Brasil (coordenadas: 16° 41' 04"W, 43° 50' 50"S), e de três árvores de *Enterolobium gummiferum* (timburi-do-cerrado), coletadas no município de Carbonita, MG, Brasil (coordenadas: 43° 8' 21"W, 17° 32' 23"S). Ambos os exemplares foram provenientes de uma área de vegetação remanescente do bioma Cerrado.

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima dos municípios de Montes Claros e Carbonita são do tipo tropical Aw, sendo que Montes Claros possui temperatura média anual de 23,1°C e pluviosidade média anual de 869 mm, e Carbonita apresenta temperatura média anual de 21,9°C, com totais pluviométricos anuais de 855 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2021).

Os dois discos de cada árvore foram divididos perpendicularmente em quatro cunhas. Duas cunhas opostas foram utilizadas para determinar a densidade básica das madeiras. As demais cunhas foram confeccionadas em amostras para a análise química e energética da madeira e para a produção e caracterização do carvão vegetal.

## **Caracterização da madeira**

Para a análise química e energética da madeira, foram retirados pequenos palitos das cunhas e, em seguida, transformados em serragem utilizando um moinho do tipo Willey. A serragem foi classificada em peneiras, sendo selecionada a fração que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh. As análises foram realizadas em triplicata e o teor absolutamente seco das amostras foi determinado conforme a TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1997a).

Os extrativos totais foram determinados de acordo com a TAPPI T204 cm-97 (TAPPI, 1997b), em que a extração foi realizada com diclorometano, álcool-tolueno (1:2) e álcool 96° GL pelo aparelho Soxhlet completo. O teor de cinzas e a lignina Klason foram determinados de acordo com a TAPPI 211 om-93 (TAPPI, 1997c) e TAPPI T222 om (TAPPI, 1997d), respectivamente. E o teor de holocelulose foi determinado de forma indireta, pela diferença percentual do somatório dos teores de extrativos totais, de lignina Klason e de cinzas.

O poder calorífico superior da madeira foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984). Determinou-se, também, a densidade básica conforme a NBR 11941 (2003), e a densidade energética, obtida pelo produto da densidade básica pelo poder calorífico superior.

## **Carbonização da madeira**

As carbonizações laboratoriais foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, utilizando-se aproximadamente 300 g de madeira previamente seca a  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ , e duas temperaturas finais, 350 e  $450^{\circ}\text{C}$ . A taxa média de aquecimento para a realização da pirólise foi de  $1,67^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , conforme metodologia de Trugilho *et al.* (2005).

## **Caracterização do carvão vegetal**

A caracterização do carvão vegetal foi realizada em triplicata, em que foram analisadas: o teor de umidade de acordo com o Método Brasileiro - MB -15 (ABNT,



1995); o teste de friabilidade com o auxílio do aparelho Friabilômetro MA 79, conforme Figueiredo *et al.* (2018); o poder calorífico superior de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984); a densidade aparente pela adaptação da NBR 11941 (2003), com substituição da água por mercúrio; e a densidade energética, obtida pelo produto da densidade aparente pelo poder calorífico superior.

Para a análise química imediata do carvão, determinam-se os teores de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo, de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1983). Para isto, o carvão vegetal foi triturado e utilizou-se como amostra a fração que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh.

Após cada carbonização, foram calculados o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, o rendimento em carbono fixo, o rendimento energético da carbonização e a produtividade do carvão vegetal por unidade de volume de madeira conforme Protásio *et al.* (2015).

### **Análise estatística**

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Levene a 5% de significância para testar a normalidade dos resíduos e a homogeneidade entre as variâncias. Para as variáveis atendidas às pressuposições da estatística paramétrica, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F, e quando necessário o teste de Tukey, ambos a 5% de significância. Àquelas variáveis cujos resíduos não apresentaram normalidade, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis a 5% de significância. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* R Core Team (2019).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Caracterização da madeira**

Para o teor de extrativos totais das madeiras houve diferença significativa entre as espécies florestais (Tabela 1). A *Enterolobium gummiferum* obteve valores mais elevados (6,44%) em relação a *Astronium fraxinifolium* (4,89%), e também

quando comparado ao *Eucalyptus* (1 a 5%), gênero mais utilizado no setor energético (ARANTES *et al.*, 2011; PEREIRA *et al.*, 2012).

Tabela 1 – Valores médios das características tecnológicas das madeiras de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum*.

| Espécie                 | T.E. (%) | T.C. (%) | T.L. (%) | T.H. (%) | P.C.S<br>(MJ kg <sup>-1</sup> ) | D.B.<br>(kg m <sup>-3</sup> ) | D.E.<br>(GJ m <sup>-3</sup> ) |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <i>A. fraxinifolium</i> | 4,89 b   | 1,54 a   | 19,92 a  | 73,65 a  | 17,59 a                         | 632 a                         | 11,12 a                       |
| <i>E. gummiferum</i>    | 6,44 a   | 0,61 b   | 20,52 a  | 72,43 a  | 17,21 b                         | 548 b                         | 9,43 b                        |
| F (p)                   | (0,0028) | –        | (0,55)   | (0,25)   | –                               | (0,0479)                      | (0,0305)                      |
| H (p)                   | –        | (0,0463) | –        | –        | (0,0334)                        | –                             | –                             |

em que: T.E. = Teor de extrativos; T.C. = Teor de cinzas; T.L. = Teor de lignina; T.H. = Teor de holocelulose; P.C.S. = Poder calorífico superior; D.B. = Densidade básica; D.E. = Densidade energética; F = *p-value* do teste F; H = *p-value* do teste de Kruskal-Wallis. Médias seguidas por uma mesma letra em uma mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelos testes F ou Kruskal-Wallis a 5% de significância.

A natureza e a composição diversa dos extrativos, bem como as quantidades destes na madeira, determinam o valor de aquecimento do biocombustível para fins energéticos (DADILE *et al.*, 2020). Neste sentido, espécies com um alto teor desse composto, como as do presente estudo, especialmente a *E. gummiferum*, são indicadas para produção de carvão vegetal. Os resultados foram semelhantes àqueles apresentados na literatura para espécies florestais do Cerrado que variam de 4 a 10%, como por exemplo, a *Pterodon pubescens* (6,94%) e a *Anadenanthera colubrina* (4,85%) (VALE, DIAS e SANTANA, 2010; PAES *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2014).

Para o teor de cinzas também houve diferença significativa entre as espécies (Tabela 1). A *E. gummiferum* apresentou menores valores (0,61%) do que a *A. fraxinifolium* (1,54%), sendo, assim, mais favorável para a produção de carvão vegetal destinado ao setor siderúrgico, dado que um alto percentual de cinzas no carvão pode provocar o fenômeno de segregação durante o processo (PIMENTA e BARCELLOS, 2000). No entanto, ambas as espécies apresentaram valores relativamente baixos para fins energéticos e semelhantes àqueles descritos por

Vale, Brasil e Leão (2002) e Siqueira *et al.* (2020) para espécies do Cerrado que variam entre 0,27 a 2,73%.

Já em relação aos teores de lignina e de holocelulose, as madeiras de *A. fraxinifolium* e *E. gummiferum* não apresentaram diferenças significativas (Tabela 1). Seus valores foram condizentes com aqueles descritos na literatura para a composição química das madeiras de folhosas, os quais variam de 17 a 38% para lignina, e 54 a 77% para holocelulose (ALMEIDA, RODRIGUES, e CASTELO, 2015; COLDEBELLA *et al.*, 2018; LIMA *et al.*; 2020; SOUZA *et al.*, 2021). Resultados similares foram obtidos por Costa *et al.* (2014) para a *Rapanea ferruginea* do Cerrado, com 19,88% de lignina e 73,18% de holocelulose.

Para a produção de carvão vegetal é desejável que a madeira tenha maior percentual de lignina, pois altos teores desse composto implica maior quantidade de carbono no carvão e, conseqüentemente, maior poder calorífico (DADILE *et al.*,2020). Deste modo, as espécies em estudo apresentam baixos teores de lignina quando comparadas ao *Eucalyptus* (26 a 32%), (CASTRO *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2021), o que não é vantajoso, visto a sua contribuição na concentração de energia no produto final.

Significativamente a madeira de *A. fraxinifolium* apresentou maior potencial de energia do que a *E. gummiferum* (Tabela 1). Entretanto, os valores foram ligeiramente inferiores aos relatados na literatura para espécies do Cerrado, 18,12 a 20,89 MJ kg<sup>-1</sup> (VALE, BRASIL e LEÃO, 2002; OLIVEIRA, *et al.*, 2019), e também quando comparados ao *Eucalyptus*, 18,71 a 20,57 MJ kg<sup>-1</sup> (OLIVEIRA *et al.*, 2012; JUIZO, LIMA e SILVA, 2017). Isto pode estar associado ao baixo teor de lignina das madeiras, tendo em vista que o poder calorífico superior está diretamente associado ao teor de carbono fixo do material, e, conseqüentemente, ao seu potencial e concentração de energia.

Em relação à densidade básica também houve diferença significativa entres as espécies estudadas (Tabela 1). A *A. fraxinifolium* apresentou maior massa específica (632 kg m<sup>-3</sup>) em relação a *E. gummiferum* (548 kg m<sup>-3</sup>), contudo, ambas as espécies foram classificadas como de média densidade (500 a 700 kg m<sup>-3</sup>), segundo classificação de Melo, Coradin e Mendes (1992). Se analisada pontualmente este parâmetro, as espécies encontram-se na média exigida pelo setor de carvão vegetal (> 500 kg m<sup>-3</sup>), com destaque para *A. fraxinifolium*, pois quanto maior for a

densidade da madeira maior será a densidade e resistência mecânica do carvão produzido (PEREIRA *et al.*, 2012).

Uma vez que a densidade energética está diretamente correlacionada à densidade e ao poder calorífico superior da madeira, a *A. fraxinifolium* (11,12 GJ m<sup>-3</sup>) apresentou maior quantidade de calor em um determinado volume em relação à *E. gummiferum* (9,43 GJ m<sup>-3</sup>), e quando comparada ao *Eucalyptus* (7,83 a 16,16 GJ m<sup>-3</sup>), (JESUS *et al.*, 2017; SILVA, FORTES e JUNIOR, 2018). Contudo, ambas as espécies apresentaram valores satisfatórios para fins energéticos, sendo estes também condizentes com os valores das espécies nativas (7,83 a 16,16 GJ m<sup>-3</sup>), (ALMEIDA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2020).

Visto que a caracterização tecnológica das madeiras permite direcionar as espécies em estudo de acordo com o produto e a sua qualidade, tanto a *A. fraxinifolium* quanto a *E. gummiferum* apresentaram características favoráveis que as potencializam para o setor energético e produção de carvão vegetal.

### **Caracterização do carvão vegetal**

Para a umidade do carvão vegetal não houve diferença significativa entre as espécies florestais e entre as temperaturas finais de carbonização (Tabela 2). Tendo em vista que a umidade contida no interior do carvão vegetal exerce grande influência no rendimento dos processos em que este será utilizado (FERREIRA *et al.*, 2013), ambas as espécies apresentaram carvão com umidade favorável (< 5%). Resultados semelhantes foram obtidos por Arantes *et al.* (2013) para o carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* (3,54%).

Tabela 2 – Valores médios das características tecnológicas do carvão vegetal de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* produzido em duas temperaturas finais

| Parâmetros                   | Temperatura final | Espécie                 |                      | F ( $p$ ) | H ( $p$ ) |
|------------------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|-----------|-----------|
|                              |                   | <i>A. fraxinifolium</i> | <i>E. gummiferum</i> |           |           |
| Umidade (%)                  | 350°C             | 3,25 A a                | 3,54 A a             | (0,576)   | –         |
|                              | 450°C             | 3,09 A a                | 3,47 A a             | (0,527)   | –         |
| F ( $p$ )                    |                   | (0,792)                 | (0,89)               |           |           |
| Friabilidade (%)             | 350°C             | 8,39 B a                | 8,89 B a             | (0,165)   | –         |
|                              | 450°C             | 12,72 A a               | 12,22 A a            | (0,273)   | –         |
| F ( $p$ )                    |                   | (0,0273)                | (0,0016)             |           |           |
| P.C.S (MJ kg <sup>-1</sup> ) | 350°C             | 28,45 B b               | 29,84 B a            | –         | (0,0339)  |
|                              | 450°C             | 30,11 A b               | 31,56 A a            | –         | (0,0334)  |
| H ( $p$ )                    |                   | (0,0339)                | (0,0334)             |           |           |
| D.A (kg m <sup>-3</sup> )    | 350°C             | 477 A a                 | 343 A b              | (0,0002)  | –         |
|                              | 450°C             | 461 A a                 | 313 B b              | –         | (0,0495)  |
| F ( $p$ )                    |                   | (0,256)                 | (0,0004)             |           |           |
| D.E. (GJ m <sup>-3</sup> )   | 350°C             | 13,57 A a               | 10,24 A b            | (0,0004)  | –         |
|                              | 450°C             | 13,88 A a               | 9,88 B b             | –         | (0,0495)  |
| F ( $p$ )                    |                   | (0,418)                 | (0,0128)             |           |           |
| Teor de cinzas (%)           | 350°C             | 5,10 A a                | 1,09 A b             | –         | (0,0495)  |
|                              | 450°C             | 5,20 A a                | 1,13 A b             | –         | (0,0495)  |
| F ( $p$ )                    |                   | (0,252)                 | (0,0681)             |           |           |
| Materiais voláteis (%)       | 350°C             | 24,03 A a               | 24,73 A b            | –         | (0,0493)  |
|                              | 450°C             | 14,34 B a               | 12,53 B b            | (0,007)   | –         |
| H ( $p$ )                    |                   | (0,0493)                | (0,0493)             |           |           |
| Carbono fixo (%)             | 350°C             | 70,87 B b               | 74,18 B a            | –         | (0,0253)  |
|                              | 450°C             | 80,47 A b               | 86,35 A a            | –         | (0,0431)  |
| H ( $p$ )                    |                   | (0,0334)                | (0,0493)             |           |           |

em que: P.C.S. = Poder calorífico superior; D.A. = Densidade aparente; D.E. = Densidade energética; F =  $p$ -value do teste F; H =  $p$ -value do teste de Kruskal-Wallis. Médias em cada parâmetro seguidas por uma mesma letra maiúscula em uma mesma coluna e uma mesma letra minúscula em uma mesma linha não diferem estatisticamente entre si pelos testes F ou Kruskal-Wallis a 5% de significância.

Na friabilidade do carvão vegetal houve diferença significativa apenas entre as temperaturas finais de carbonização (Tabela 2). Uma vez que a friabilidade do carvão está correlacionada com a sua resistência mecânica, a menor temperatura (350°C) apresentou resultados desejáveis para fins industriais, pois um carvão vegetal friável provoca perdas econômicas pelo excesso de finos gerados durante a produção e manuseio (SILVA *et al.*, 2007). Figueiredo *et al.* (2018) e De Abreu Neto *et al.* (2020) também verificaram em seus estudos que o aumento da temperatura final de carbonização influencia nas propriedades mecânicas do carvão vegetal, tornando-o, assim, menos resistente.

Para o poder calorífico superior houve diferença estatística em todos os tratamentos (Tabela 2). O maior potencial energético foi observado para o carvão vegetal de *E. gummiferum* (31,56 MJ kg<sup>-1</sup>), seguido pelo carvão de *A. fraxinifolium* (30,11 MJ kg<sup>-1</sup>), na temperatura final de carbonização de 450°C. Os valores foram condizentes com aqueles descritos na literatura para o carvão de espécies do Cerrado, que variam entre 27,94 a 33,36 MJ kg<sup>-1</sup> (BARCELLOS, 2007; FIGUEIREDO *et al.*, 2018; SIQUEIRA *et al.*, 2020), e aos do gênero *Eucalyptus*, 29,57 a 31,96 MJ kg<sup>-1</sup> (OLIVEIRA *et al.*, 2012; SOARES *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2021).

As elevadas temperaturas finais de carbonização produzirão carvão vegetal com maior poder calorífico, devido à maior concentração de carbono na sua estrutura ao ser convertido em dióxido de carbono durante a combustão (BARCELLOS, 2007). No entanto, devem-se considerar outros parâmetros, como o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, para constatar se compensa utilizar temperaturas mais elevadas para carbonizar a madeira.

Em relação à densidade aparente do carvão vegetal, só não houve diferença significativa entre as temperaturas finais de carbonização da *Astronium fraxinifolium* (Tabela 2). Contudo, em ambas as espécies, foi observada uma redução da densidade do carvão com o aumento da temperatura final de carbonização. Este fato está relacionado à maior perda de massa do material com o aumento da temperatura e tempo durante o processo, refletindo na diminuição da densidade e resistência do carvão vegetal.

Nas duas temperaturas finais de carbonização, a *A. fraxinifolium* apresentou carvão vegetal com maior densidade aparente em relação a *Enterolobium gummiferum*. Isto está associado à maior densidade básica da sua madeira, pois, de acordo Vale, Dias e Santana (2010) existe alta correlação entre os parâmetros. No

entanto, para ambas, os valores médios foram semelhantes àqueles descritos na literatura para o carvão de espécies do Cerrado produzidos a 450°C, que variam entre 255 a 475 kg m<sup>-3</sup> (VALE, DIAS e SANTANA, 2010; COSTA *et al.*, 2014; SIGUEIRA *et al.*, 2020), e também quando comparados ao carvão de *Eucalyptus*, 255 a 425 kg m<sup>-3</sup> (CASTRO *et al.*, 2013; PROTÁSIO *et al.*, 2021).

A densidade energética dos carvões apresentou a mesma linha de significância que a densidade aparente, posto que estes parâmetros estão diretamente correlacionados (Tabela 2). A *A. fraxinifolium*, em ambas temperaturas finais de carbonização, se destacou com maior quantidade de calor em um dado volume em relação a *E. gummiferum*, e ao gênero *Eucalyptus*, 8,37 a 12,61 GJ m<sup>-3</sup> (PROTÁSIO *et al.*, 2015; PROTÁSIO *et al.*, 2021). Visto que, para os setores siderúrgico e doméstico, é desejável um carvão vegetal de maior densidade, pois, além de ser mais resistente, esta propriedade resultará em uma maior capacidade calorífica por unidade de volume (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2015; SILVA e ATAÍDE, 2019).

Em relação à química imediata do carvão vegetal, a análise estatística indicou que entre as espécies florestais houve diferença significativa em todos os parâmetros analisados, já a temperatura final de carbonização só não influenciou no teor de cinzas (Tabela 2). O carvão vegetal da *A. fraxinifolium* apresentou maior teor de cinzas que o da *E. gummiferum* em ambas as temperaturas finais de carbonização. Isto está associado ao maior teor de cinzas da madeira da *A. fraxinifolium* que contribui para o elevado conteúdo de minerais no carvão produzido, o qual apresentou valores acima do recomendado para o setor siderúrgico (< 3%).

Carvão vegetal com elevado conteúdo de minerais pode afetar as propriedades mecânicas do ferro gusa, aumentar a corrosão dos equipamentos e diminuir o poder calorífico do combustível (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2014). Por isso, se analisado pontualmente este parâmetro, apenas o carvão da *E. gummiferum* é indicado para a siderurgia.

Estudos de Barcellos (2007) indicou que a temperatura final de carbonização também não influenciou no teor de cinzas do carvão vegetal, sendo que seus valores para espécies do Cerrado, como *Qualea grandiflora* (5,66%), *Bowdichia virgiloides* (5,26%) e *Magonia pubescens* (5,22%), foram similares aos da *A. fraxinifolium*. Já os valores da *E. gummiferum* foram similares aos da *Tachigali vulgaris* (1,14%),

(SIQUEIRA *et al.*, 2020); e ao clone de *E. grandis* x *E. urophylla* (1,24%), (CASTRO *et al.*, 2013).

Para o teor de materiais voláteis do carvão vegetal verificou-se, em ambas as espécies, a redução dos seus valores com o aumento da temperatura final de carbonização (Tabela 2). Isto se deve à maior concentração de carbono no carvão vegetal pelo aumento da temperatura final de carbonização, uma vez que o percentual de carbono fixo possui correlação negativa com o teor de matérias voláteis (SOARES *et al.*, 2014). Resultados semelhantes foram apresentados na literatura para o carvão produzido a 450°C, como por exemplo, a *Amburana cearensis* (24,72%), (SIQUEIRA *et al.*, 2020) nativa do Cerrado, e o clone *E. urophylla* x *E. camaldulensis* (24%) (PROTÁSIO *et al.*, 2021), utilizado para fins energéticos.

Em relação ao teor de carbono fixo, parâmetro este considerado um dos mais importantes por estar correlacionado com o poder calorífico do material, os maiores percentuais foram observados nos carvões produzidos na maior temperatura final de carbonização, especialmente o da *E. gummiferum* (Tabela 2). Isto porque, além do aumento da temperatura proporcionar maior concentração de carbono no carvão, a madeira de *E. gummiferum* apresentou teores de extrativos e cinzas mais favoráveis que a potencializam para fins energéticos. Valores similares foram observados na literatura para o carvão produzido a 450°C, como a *Cenostigma macrophyllum* (78,17%) e *Guazuma ulmifolia* (81%) (COSTA *et al.*, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2018), e ao *E. urophylla* (76,1%) (PROTÁSIO *et al.*, 2021).

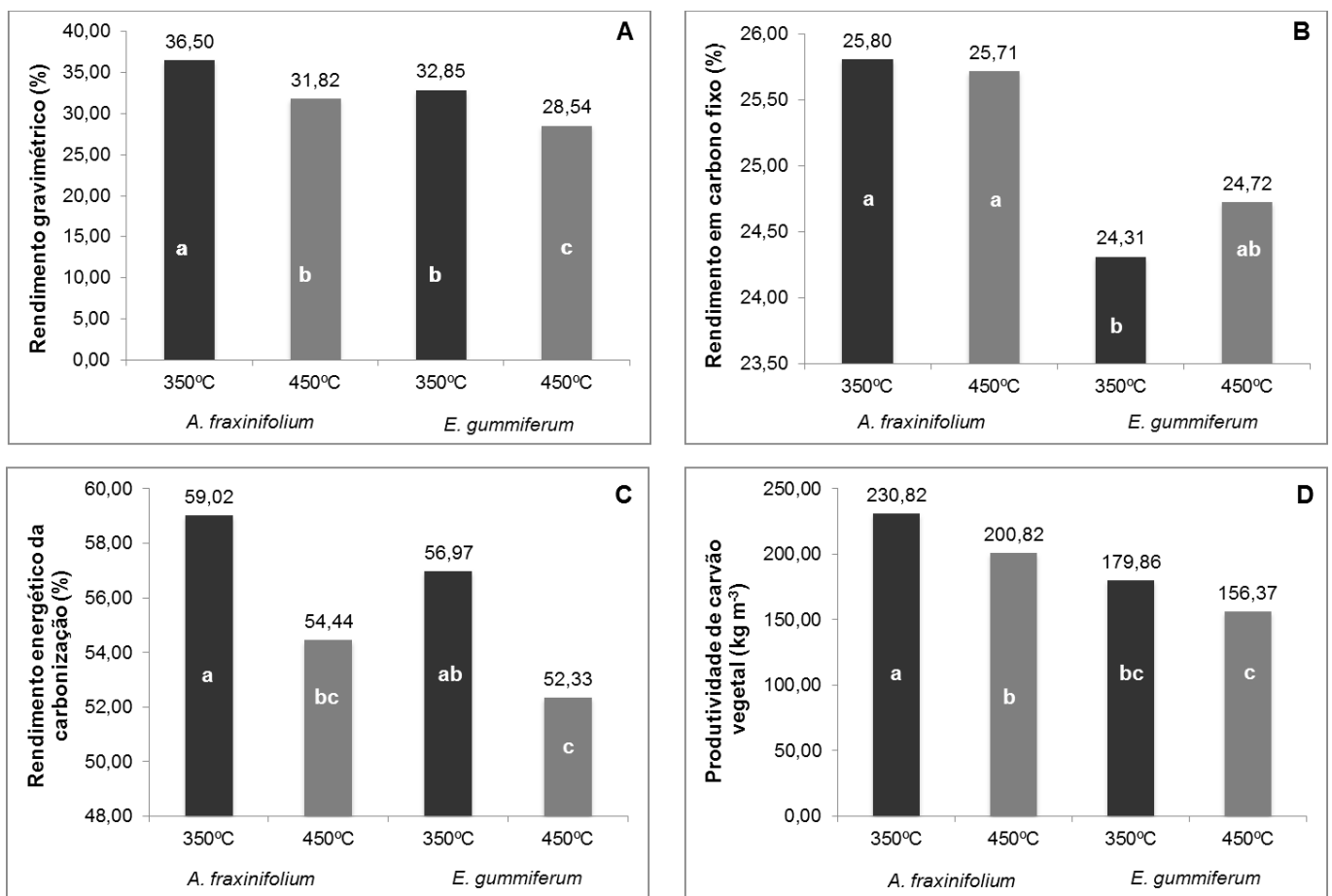
Para os setores siderúrgico e doméstico, é desejável que o carvão vegetal apresente teor de carbono fixo variando de 73 a 77% e teor de material volátil entre 22 e 25,5% (SÃO PAULO, 2015; ASSIS *et al.*, 2016). Desta forma, o carvão da *A. fraxinifolium* e da *E. gummiferum*, mesmo quando produzidos em menores temperaturas finais de carbonização, são indicados para estes setores. Uma vez que estes parâmetros são inversamente proporcionais, Couto *et al.* (2015) e Dufourny *et al.* (2019) também constataram em seus estudos que quanto mais elevada a temperatura final de carbonização menor será o percentual de materiais voláteis e maior será a concentração de carbono fixo no carvão vegetal.

Neste contexto, para constatar se é viável a utilização de temperaturas finais mais altas para a produção de carvão vegetal, foi analisado no presente estudo os



rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, em carbono fixo e o energético da carbonização, bem como a produtividade de carvão vegetal por volume de madeira. Assim, espera-se constatar qual temperatura final de carbonização e qual espécie florestal produz um carvão vegetal mais rentável (Figura 1).

Figura 1 – Valores médios do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (A), rendimento em carbono fixo (B), rendimento energético da carbonização (C) e produtividade do carvão vegetal por unidade de volume de madeira (D) de *Astronium fraxinifolium* e *Enterolobium gummiferum* produzido em duas temperaturas finais.



em que: Médias seguidas com a mesma letra em cada gráfico não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O aumento da temperatura final de carbonização proporcionou a redução do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, do rendimento energético da carbonização e da produtividade do carvão em volume de madeira (Figura 1). Este fenômeno está relacionado à perda de massa resultante da degradação térmica dos

constituintes da madeira a partir do incremento da temperatura, como as hemiceluloses que, simultaneamente, proporcionam concentração de carbono no produto final (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Com relação às espécies florestais, a diferença entre os valores médios dos parâmetros estudados está associada às características específicas da madeira. A *A. fraxinifolium*, por exemplo, se destacou em todos os rendimentos da carbonização e produtividade do carvão em volume de madeira por seu lenho apresentar maior densidade básica e maior poder calorífico superior em relação a *E. gummiferum*.

Os valores médios para os rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo foram condizentes com aqueles descritos na literatura para o carvão de espécies do Cerrado produzidos a 450°C, que variam entre 24,87 a 35,34% para o rendimento gravimétrico, e 23,26 a 26,54% para o rendimento em carbono fixo (VALE, DIAS e SANTANA, 2010; FIGUEIREDO *et al.*, 2018; SIQUEIRA *et al.*, 2020). Contudo, apenas o carvão da *A. fraxinifolium* demonstrou semelhança de rendimento gravimétrico em carvão vegetal com o do gênero *Eucalyptus* produzido a 450°C, 28,68 a 35,75% (PEREIRA *et al.*, 2012; CASTRO *et al.*, 2013; COSTA, TRUGILHO e HEIN, 2018).

Já para o rendimento energético da carbonização e a produtividade do carvão vegetal em volume de madeira, na temperatura de 350°C, a *A. fraxinifolium* superou o carvão vegetal de *Eucalyptus* produzido a 450°C por Protásio *et al.* (2015), de 51 a 53% de rendimento energético, e 159 a 201 kg m<sup>-3</sup> de produtividade de carvão em volume de madeira. Estes resultados estão associados à maior densidade básica da madeira de *A. fraxinifolium* (632 kg m<sup>-3</sup>) quando comparada aquelas utilizadas no setor energético, proporcionando, assim, maior produção de massa em carvão vegetal.

Diante do estudo realizado, recomenda-se a utilização da temperatura final de carbonização de 350°C para a produção de carvão vegetal de *A. fraxinifolium* e *E. gummiferum*, pois, além de apresentar resultados mais rentáveis, o carvão produzido nesta faixa de temperatura apresentou características satisfatórias tanto para o uso doméstico quanto para o setor siderúrgico. Os autores ainda ressaltam que, embora o setor energético prefira a utilização de espécies do gênero *Eucalyptus*, a investigação e estudos de materiais alternativos, visando a diversificação futura de matéria-prima e, por outro viés, sugerindo uso múltiplo e sustentável de espécies florestais, são essenciais.

## CONCLUSÕES

- As madeiras das espécies florestais em estudo apresentaram características satisfatórias que as potencializam para fins energéticos. A *Enterolobium gummiferum* indicou menor teor de cinzas e maior teor de extrativos, enquanto que a *Astronium fraxinifolium* apresentou maior densidade básica e poder calorífico superior.
- O carvão vegetal produzido com madeira de *E. gummiferum* tem como característica baixo teor de cinzas, maior poder calorífico superior e carbono fixo. Já o de *A. fraxinifolium* apresentou maior densidade aparente e, conseqüentemente, maiores rendimentos da carbonização e produtividade de carvão vegetal por unidade de volume de madeira.
- Em relação às temperaturas finais de carbonização, ambos os carvões analisados apresentaram parâmetros adequados para uso doméstico e setor siderúrgico, sendo, assim, indicada a utilização da temperatura final de 350°C por apresentar maiores rendimentos gravimétricos e energéticos da carbonização.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-15**: Método Brasileiro - Análise Imediata do Carvão, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: Determinação da densidade básica da madeira. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ALMEIDA, A. P. S.; RODRIGUES, D. A.; CASTELO, P. A. R. Determinação das Propriedades Químicas de Madeiras da Amazônia Meridional. **Scientific Electronic Archives**, 2015.

ALMEIDA, C. C. F.; BRAND, M. A.; BALDUINO, A. L. J; CUNHA, A. B. Qualidade energética da madeira e de briquetes produzidos a partir de *Cupressus lusitanica* Mill. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 1003-1011, dez. 2015.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CARNEIRO, A. C. O.; ALVES, E. GUERREIRO, M. C. Longitudinal and radial variation of extractives and total lignin contents in a clone of *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras. vol.17, 2011.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; DA SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x 423 *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, jul./set. 2013.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; NETO, R. M. G.; ROCHA, M. F. V. R.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, e201701546, p. 1-9, 2018.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, 2016.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 163 f. Tese (Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese – Ano base 2019**. Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Rio de Janeiro, 2020.

CALGARO, H. F.; BUZETTI, S.; SILVA, L. R.; STEFANINI, L.; MIRANDA, L. P. M.; MORAES, M. A.; MORAES, M. L. T. Distribuição natural de espécies arbóreas em áreas com diferentes níveis de antropização e relação com os atributos químicos do solo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n. 2, p. 233-243, 2015.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; DOS SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. A. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.627-635, jun. 2013.

CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**, 2021. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>> Acesso em: 05 de abril de 2021.

COLDEBELLA, R.; GIESBRECHT, B. M.; SACCOL, A. F. O.; GENTIL, M.; PEDRAZZI, C. Propriedades físicas e químicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don ex Steud. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), Porto Alegre, RS, 2018.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46. 2014.

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

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

DADILE, A. M.; SOTANND, O. A.; ZIRA, B. D.; GARBA, M.; YAKUBU, I. Evaluation of Elemental and Chemical Compositions of Some Fuelwood Species for Energy Value. **International Journal of Forestry Research**, 2020.

DE ABREU NETO, R.; DE ASSIS, A. A. ; BALLARIN, A. W.; HEIN, P. R. G. . Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1, 2020.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22, 2015.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, volume 137, 2019.

FERREIRA, H. R.; MACHADO, G. O.; SILVA, M. R.; VOGEL, F. HILLIG, E. Análise da qualidade do carvão vegetal proveniente da região Sul do Brasil. **Revista Acadêmica, Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 11, 2013.

FIGUEIREDO, M. E. O.; JÚNIOR LONGUE, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S. Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 420-431, jan.- mar., 2018.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2020 – Ano base 2019**. São Paulo, SP, 2020.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 11 - 16, jan. / mar. 2017.

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

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; JÚNIOR, E. O. B.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINE, F.; 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**, United Kingdom. vol. 140, 2020.

MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. M. Propriedades Termoquímicas dos Finos de Carvão Vegetal e de Carvão mineral para a Injeção nas Ventaneiras de Altos-Fornos Siderúrgicos. **Revista Biomassa e Energia**, v. 1, n.4, p. 353-363, 2004.

MELO, J. E.; CORADIN V. T. R.; MENDES J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. **Silvicultura**, São Paulo, v. 12, n. 42, p. 695-699, 1992.

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 1, p. 59 - 68, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA, G. M. V. **Densidade da madeira em Minas Gerais: Amostragem, espacialização e relação com variáveis ambientais**. 2014. 125 p. Tese (Ciências Florestais). Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. 2014

OLIVEIRA, H. G. B.; SOUSA, M. V. C.; SILVA, L. S.; FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A. Propriedades energéticas da madeira e casca de *Dalbergia cearensis* Ducke. **Agropecuária Científica no Semiárido**. Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Patos-PB, v.15, n.3, p. 232-237. Edição Especial VI CONEFLO, 2019.

ONU Brasil. **Adoção do Acordo de Paris**. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima — Conferência das Partes, Vigésima primeira sessão. Paris, 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>>. Acesso em: 18 de fev. de 2021.

PAES, J. B.; LIMA, C. R. L.; OLIVEIRA, E.; NETO, P. N. M. Características físico-química, energética e dimensões das fibras de três espécies florestais do semiárido brasileiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica. 2013.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus Clones* for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research**, 2012.

PILON, N. A. L.; DURIGAN, G. Critérios para indicação de espécies prioritárias para a restauração da vegetação de cerrado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 389-399, set. 2013.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. S. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 76, 2000.

PINHEIRO, P. C. C. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 1ª ed. Belo Horizonte: Autores, 2006.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Qualidade e avaliação energética do carvão vegetal dos resíduos do coco babaçu para uso siderúrgico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 435-444, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 801-816, dez. 2015.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. G. R.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021.

R CORE TEAM (2019). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; DE SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, vol. 92, 2011.

SANTOS, C. P. S.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. J. E.; CASTRO, R. V.; O.; COSTA, S. E. L.; LOPES, L. I.; PAREYN, F. G. C.; JUNIOR, A. F. D.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, N. F.O.; MAGALHÃES, M. A. Estoque de energia da madeira em áreas sob manejo florestal no Rio Grande do Norte. **Scientia Forestalis**, 2020.

SÃO PAULO: Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. **Resolução nº 40 SAA**, de 14 de dezembro de 2015.

SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M.; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência da temperatura e das taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão vegetal de *Eucalyptus cloeziana*. **Ciência da Madeira**, vol. 8, 2017.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; JUNIOR, C. R. S. Characteristics of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, v. 25, p. 1-10, 2018.

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, mar. 2007.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, volume 172, 2019.

SIQUEIRA, H. F.; PATRÍCIO, E. P. S.; LIMA, M. D. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Avaliação de três madeiras nativas do cerrado goiano visando à utilização energética. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 5, p. 615-624, set./out. 2020.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFLE, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.3, p.543-549, 2014.

SOUZA, H. J. P. L.; MUNOZ, F.; MENDONÇA, R. T.; SÁEZ, K.; OLAVE, R.; SEGURA, C.; SOUZA, D. P. L.; PROTÁSIO, T. P.; RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. **Renewable Energy**, volume 163, 2021.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 264om-88**: Preparation of Wood for Chemical Analysis. Atlanta: TAPPI Press, 1997a.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 204 cm-97**: Solvent extractives of wood and pulp: Standards Regulations and Style Guidelines. Atlanta: TAPPI Press, 1997b.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 211 om-93**: Ash in Wood, Pulp, Paper and Paperboard: Combustion at 525°C. Atlanta: TAPPI Press, 1997c.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 222om-98**: Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997d.

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

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80. 2002.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145. 2010.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que a *Astronium fraxinifolium* e a *Enterolobium gummiferum* apresentam madeira com potencial e qualidade para fins energéticos. O carvão vegetal da *E. gummiferum*, por exemplo, se destacou pelo baixo teor de cinzas e maior poder calorífico superior e carbono fixo. Enquanto a *A. fraxinifolium* apresentou maior densidade aparente, e conseqüentemente, maiores rendimentos da carbonização e produtividade de carvão vegetal por unidade de volume de madeira.

Com relação às temperaturas finais de carbonização, ambos os carvões analisados apresentaram parâmetros adequados para uso doméstico e setor siderúrgico, sendo assim indicada a utilização da temperatura final de 350°C por apresentar maiores rendimentos gravimétricos e energéticos da carbonização.