



**Universidade do Estado do Pará  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia  
Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e  
Sustentabilidade na Amazônia PPGTEC – Mestrado**

**Alana Assunção da Silva**

**Anatomia da madeira e do carvão vegetal de  
espécies comerciais da Amazônia brasileira como  
subsídio para fiscalização e controle de qualidade**

Belém  
2023



Universidade do Estado do Pará  
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e  
Sustentabilidade na Amazônia PPGTEC – Mestrado  
Tv. Enéas Pinheiro, 2626, Marco, Belém-PA, CEP: 66095-100  
<http://ccnt.uepa.br/ppgtec/>



**Alana Assunção da Silva**

**Anatomia da madeira e do carvão vegetal de espécies comerciais da Amazônia brasileira como subsídio para fiscalização e controle de qualidade**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará.  
Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Eduardo de Lima Melo

Belém  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP),  
Biblioteca do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém - PA.

---

S586a Silva, Alana Assunção da

Anatomia da madeira e do carvão vegetal de espécies comerciais da Amazônia brasileira como subsídio para fiscalização e controle de qualidade. / Alana Assunção da Silva; Orientador Luiz Eduardo de Lima Melo. -- Belém, 2023.

126 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém, 2023.

1. Madeira - Anatomia. 2. Madeira - Identificação. 3. Carvão vegetal - Amazônia. 4. Florestas - Manejo. 5. Florestas - Conservação - Amazônia. I. Melo, Luiz Eduardo de Lima. II. Título.

**CDD 674.09811**

---



Alana Assunção da Silva

**Anatomia da madeira e do carvão vegetal de espécies comerciais da Amazônia brasileira como subsídio para fiscalização e controle de qualidade**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará.

Data da aprovação: 30 de junho de 2023

Banca Examinadora



– Orientador

Profº Drº Luiz Eduardo de Lima Melo  
Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira  
Universidade do Estado do Pará



– 1º Examinador

Profº Drº João Rodrigo Coimbra Nobre  
Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira  
Universidade do Estado do Pará



– 2º Examinadora

Drª Fernanda Ilkiu Borges de Souza  
Doutor(a) em Ciências Biológicas  
Embrapa Amazônia Oriental



– 3º Examinador

Profº Drº Thiago de Paula Protásio  
Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira  
Universidade Federal Rural da Amazônia

– Suplente

Profº Drº Iedo Souza Santos  
Doutor em Engenharia da Produção  
Universidade do Estado do Pará

– Suplente

Drª Juliana Livian Lima de Abreu  
Doutor(a) em Ciências Florestais  
Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo ao longo de minha trajetória acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, o mantenedor da minha vida, pela Sua presença constante, graça e misericórdia ao longo de todo o meu percurso acadêmico.

Aos meus amados pais, Maria das Graças e José Aldo, não existem palavras suficientes para expressar o quanto sou grata por todo o apoio, amor incondicional e incentivo que me proporcionaram ao longo dessa jornada.

À minha tia Rosa Maria (*in memoriam*), que sempre me apoiou e torceu pelo meu sucesso. Ao meu irmão Alan, pela amizade, companheirismo e encorajamento.

Ao professor Luiz Eduardo, meu orientador neste estudo, expresso minha imensa gratidão por toda a assistência e encorajamento ao longo dessa trajetória, proporcionando-me a oportunidade de adquirir conhecimento e evoluir.

Aos professores Thiago Protásio, João Rodrigo e Fernanda Ilkiu, agradeço sinceramente todo o apoio e colaboração para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Marta Freire, pelo auxílio na confecção das lâminas histológicas e por estar sempre disponível para me ajudar quando necessário. À Ana Paula Corrêa, pela ajuda na geração das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ao Fernando Rodrigues, por se disponibilizar a me ajudar na carbonização das madeiras. Agradeço também ao Wendell Vilhena e ao Pedro Glecio pelo auxílio na obtenção das imagens macroscópicas do carvão.

Aos meus amigos que tiveram participação direta ou indireta neste trabalho, em especial a Nathalia Cardoso, amiga querida que esteve comigo desde a graduação até aqui. Agradeço o companheirismo, bons conselhos e ajuda em todos os momentos que precisei. Aos meus amigos de mestrado, Tatiana Lima, Juliana Paiva, Thiago Martins, Cícero Júnior e Eli Franco. Aos amigos que fiz no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira, em especial ao Kaick Coelho, Lohana Vieira e Thaís Freitas. Agradeço também a Juliana Abreu, que foi minha coorientadora no PIBIC e continuou a me auxiliar, sanando dúvidas. Agradeço a amizade e os bons conselhos.

Ao Grupo Keilla pela doação das amostras de madeira utilizadas neste estudo e ao Banco da Amazônia pelo financiamento do projeto “Valorização de biomassas residuais, provenientes de manejo florestal sustentável, para geração de bioenergia na Amazônia legal”, coordenado pelo Prof. Thiago Protásio.

Agradeço à Universidade do Estado do Pará e ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia por fornecerem o ambiente propício para o desenvolvimento deste trabalho.

## EPÍGRAFE

(Confia no Senhor de todo o teu coração e não te estribes no teu próprio entendimento.

**Provérbios 3:5)**

## RESUMO

A floresta amazônica possui uma alta diversidade de espécies florestais. Contudo, a exploração ilegal para produção da madeira e do carvão vegetal tem contribuído para o aumento do desmatamento e a degradação das florestas naturais. Medidas vem sendo tomadas para reverter esta realidade. Como parte destes esforços, a identificação da madeira e do carvão vegetal têm ajudado no controle de espécies comercializadas ilegalmente. Além disso, a antracologia, pode dar direcionamento para melhorar a produção e a qualidade do biorredutor, já que há grande heterogeneidade de espécies e, conseqüentemente, de qualidade da madeira. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi estudar a anatomia da madeira e do carvão vegetal de quinze espécies incluídas em planos de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira. Amostras foram retiradas para a identificação macroscópica e microscópica da madeira, macroscópica e microscópica (MEV) do carvão vegetal e para a obtenção da densidade básica e aparente. Esta pesquisa foi dividida em dois capítulos. O primeiro artigo descreve a anatomia macroscópica e microscópica da madeira e do carvão para contribuir com um banco de dados na identificação anatômica da madeira e do carvão vegetal e subsidiar a fiscalização ilegal de espécies florestais. As características diagnosticáveis como agrupamentos de vasos, tipo de parênquima axial e em alguns casos placas de perfuração, raios exclusivamente unisseriados foram fundamentais para subsidiar e identificar a madeira e carvão. Estudo vem colaborar para o monitoramento do comércio ilegal da madeira e do carvão e contribuir com um banco de dados e coleções de referência de carvão vegetal disponíveis para pesquisa, treinamento e consultoria de supervisores florestais, anatomista e antracologista da madeira. O segundo artigo avalia o efeito da pirólise nas características anatômicas do xilema secundário em espécies de diferentes densidades e tipos de parênquima axial. A análise das alterações foi realizada por meio da anatomia microscópica da madeira e do carvão vegetal. Para avaliar as alterações da madeira após a carbonização, foram feitos testes de comparação de média. Além disso, realizou-se uma análise multivariada de agrupamento de espécies utilizando a técnica de análise de componentes principais. Após a carbonização o diâmetro de vaso reduziu em 11 espécies. A frequência de vasos aumentou na maioria dos indivíduos analisados. O rendimento gravimétrico variou entre 31.04 e 39.05%. As espécies com menores rendimentos foram *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* e *Dinizia excelsa* com 39,45%, 36,33%, 36,25% respectivamente. Não foi observado padrão de contração ou aumento para os parâmetros quantitativos da madeira após a carbonização, considerando espécies de média e alta densidade e abundância de parênquima. De maneira geral, o efeito da carbonização foi bastante variável, mesmo em espécies do mesmo gênero. Estudos posteriores precisam ser realizados para compreender melhor o efeito da carbonização na anatomia da madeira.

**Palavras-chaves:** Conservação florestal; florestas tropicais; identificação anatômica; alterações morfométricas.

## ABSTRACT

The Amazon rainforest has a high diversity of forest species. However, illegal exploitation for timber and charcoal production has contributed to increased deforestation and degradation of natural forests. Measures have been taken to reverse this reality. As part of these efforts, the identification of wood and charcoal has helped to control illegally traded species. In addition, anthracology can provide guidance to improve the production and quality of the bio-reductor, since there is great heterogeneity of species and, consequently, of wood quality. In this sense, the objective of this work was to study the wood and charcoal anatomy of fifteen species included in sustainable forest management plans in the Brazilian Amazon. Samples were taken for macroscopic and microscopic identification of wood, macroscopic and microscopic (SEM) of charcoal and for obtaining basic and apparent density. This research was divided into two chapters. The first article describes the macroscopic and microscopic anatomy of wood and charcoal to contribute to a database in the anatomical identification of wood and charcoal and to subsidize the illegal inspection of forest species. Diagnosable characteristics such as vessel clusters, axial parenchyma type and in some cases perforation plates, exclusively uniseriate rays were fundamental to subsidize and identify wood and charcoal. This study contributes to the monitoring of the illegal trade of wood and charcoal and contributes to a database and reference collections of charcoal available for research, training and consultancy of forest supervisors, wood anatomist and anthracologist. The second article evaluates the effect of pyrolysis on the anatomical characteristics of secondary xylem in species of different densities and types of axial parenchyma. The analysis of the changes was carried out by means of microscopic anatomy of wood and charcoal. To evaluate the changes in wood after carbonization, mean comparison tests were performed. In addition, a multivariate analysis of species clustering was performed using the principal component analysis technique. After carbonization vessel diameter decreased in 11 species. Vessel frequency increased in most of the individuals analyzed. Gravimetric yield ranged from 31.04 to 39.05%. The species with the highest yields were *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* and *Dinizia excelsa* with 39.45%, 36.33%, 36.25% respectively. No pattern of contraction or increase was observed for the quantitative parameters of wood after carbonization, considering medium and high density species and parenchyma abundance. In general, the effect of carbonization was quite variable, even in species of the same genus. Further studies need to be conducted to better understand the effect of carbonization on wood anatomy.

**Keywords:** Forest conservation; tropical forests; anatomical identification; morphometric alterations.

## LISTA DE TABELAS

<b>Table 1.</b> List of analyzed species Scientific nomenclature and geographic distribution follow the information in the book Flora do Brasil ( <a href="http://reflora.jbrj.gov.br">reflora.jbrj.gov.br</a> , accessed June 2021).....	27
<b>Table 2.</b> Principal microscopic anatomic characteristics of wood and charcoal. ....	31
<b>Tabela 3.</b> Espécies coletadas na AMF Rio Capim, município de Paragominas, Estado Pará, Brasil.....	92
<b>Tabela 4.</b> Dados do diâmetro médio tangencial, frequência e pontoação intervascular dos vasos das espécies estudadas.....	100
<b>Tabela 5.</b> Dados da largura, altura e frequência dos raios das espécies estudadas. ....	103
<b>Tabela 6.</b> Dados da densidade básica das espécies estudadas.....	106
<b>Tabela 7.</b> Valores médios dos parâmetros quantitativos da madeira.....	111
<b>Tabela 8.</b> Autovetores dos três primeiros componentes principais para as características da madeira. ....	112
<b>Tabela 9.</b> Valores médios dos parâmetros quantitativos do carvão.....	114
<b>Tabela 10.</b> Autovetores dos três primeiros componentes principais para o carvão vegetal.....	115



## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.** Location of the Rio Capim FMA, Paragominas, Pará, Brazil.....27
- Fig. 2.** Macrographic images of the transversal surface of wood (amplified 10x). (a) *Protium altissimum*, (b) *Caryocar glabrum*, (c) *Caryocar villosum*, (d) *Licania canescens*, (e) *Parinari rodolphii*, (f) *Goupia glabra*, (g) *Couratari guianensis*, (h) *Couratari oblongifolia*, (i) *Eschweilera grandiflora*. Scale bar: 1mm. ....33
- Fig. 3.** Macrographic images of the transversal surface of wood (amplified 10x). (a) *Lecythis pisonis*, (b) *Lecythis lurida*, (c) *Dinizia excelsa*, (d) *Pseudopiptadenia suaveolens*, (e) *Manilkara elata*, (f) *Pouteria oblanceolata*. Scale bar: 1mm.....35
- Fig. 4.** Macrographic images of the transversal surface of charcoal (amplified 10x). (a) *Protium altissimum*, (b) *Caryocar glabrum*, (c) *Caryocar villosum*, (d) *Licania canescens*, (e) *Parinari rodolphii*, (f) *Goupia glabra*, (g) *Couratari guianensis*, (h) *Couratari oblongifolia*, (i) *Eschweilera grandiflora*. Scale bar: 1 mm. ....36
- Fig. 5.** Macrographic images of the transversal surface of charcoal (amplified 10x). (a) *Lecythis pisonis*, (b) *Lecythis lurida*, (c) *Dinizia excelsa*, (d) *Pseudopiptadenia suaveolens*, (e) *Manilkara elata*, (f) *Pouteria oblanceolata*. Scale bar: 1mm.....38
- Fig. 6.** Wood micrographs. (a-c) *Protium altissimum*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Caryocar glabrum*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Caryocar villosum*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i). ....38
- Fig. 7.** Wood micrographs. (a-c) *Licania canescens*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Parinari rodolphii*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Goupia glabra*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i). ....40
- Fig. 8.** Wood micrographs. (a-c) *Couratari guianensis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Couratari oblongifolia*. (d) ST; (e) SLT; (f) LRS. (g-i) *Eschweilera grandiflora*. (g) TS; (h) LTS; (i) SLR. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i). ....42
- Fig. 9.** Wood micrographs. (a-c) *Lecythis pisonis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Lecythis lurida*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Dinizia excelsa*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i). ....44

<b>Fig. 10.</b> Wood micrographs. (a-c) <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Manillkara elata</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Pouteria oblanceolata</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i).....	46
<b>Fig. 11.</b> SEM charcoal micrographs. (a-c) <i>Protium altissimum</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Caryocar glabrum</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Caryocar villosum</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i).....	48
<b>Fig. 12.</b> SEM charcoal micrographs. (a-c) <i>Licania canescens</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Parinari rodolphii</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Goupia glabra</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i). ....	50
<b>Fig. 13.</b> SEM charcoal micrographs. (a-c) <i>Couratari guianensis</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Couratari oblongifolia</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Eschweilera grandiflora</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i). ....	51
<b>Fig. 14.</b> SEM charcoal micrographs. (a-c) <i>Lecythis pisonis</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Lecythis lurida</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Dinizia excelsa</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i). ....	52
<b>Fig. 15.</b> SEM charcoal micrographs (a-c) <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> . (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) <i>Manillkara elata</i> . (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) <i>Pouteria oblanceolata</i> . (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 $\mu\text{m}$ (a,d,g); 100 $\mu\text{m}$ (b, c, e, f, h, i). ....	53
<b>Fig. 16.</b> Scanning electron microscopy and EDS graphs for <i>Protium altissimum</i> . a – crystals of calcium oxalate in ray cells, radial section.....	61
<b>Fig. 17.</b> Scanning electron microscopy and EDS graphs for <i>Couratari guianensis</i> . a – crystals of calcium oxalate in axial parenchymal cells, radial section. b – silica bodies in ray cells, radial section. ....	62
<b>Fig. 18.</b> Scanning electron microscopy and EDS graphs for <i>Parinari rodolphii</i> . a – silica bodies in ray cells, radial section.....	62

<b>Figura 19.</b> Mapa de localização da AMF Rio Capim, em Paragominas, Estado do Pará. .....	90
<b>Figura 20.</b> Discos de madeira de resíduo florestal da AMF Rio Capim, município de Paragominas, Pará, Brasil.....	91
<b>Figura 21.</b> (a, c) <i>Goupia glabra</i> ; (b, d) <i>Dinizia excelsa</i> . Micrografias na seção transversal da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala- <i>G. glabra</i> : 100 $\mu\text{m}$ ; <i>D. excelsa</i> : 200 $\mu\text{m}$ .....	97
<b>Figura 22.</b> (a, d) <i>Goupia glabra</i> ; (b, e) <i>Pouteria oblanceolata</i> ; (c, f) <i>Protium altissimum</i> . Micrografias na seção tangencial da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala: 200 $\mu\text{m}$ . ....	98
<b>Figura 23.</b> (a, d) <i>Lecythis pisonis</i> ; (b, e) <i>Caryocar villosum</i> ; (c, f) <i>Manilkara elata</i> . Micrografias na seção transversal da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala: 200 $\mu\text{m}$ . ....	101
<b>Figura 24.</b> (a, d) <i>Caryocar glabrum</i> ; (b, e) <i>Caryocar villosum</i> ; (c, f) <i>Goupia glabra</i> . Micrografias na seção tangencial da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala- <i>C. glabrum</i> e <i>C. villosum</i> : 200 $\mu\text{m}$ ; <i>G. glabra</i> : 100 $\mu\text{m}$ . ....	105
<b>Figura 25.</b> Densidade da madeira e do carvão vegetal. ....	107
<b>Figura 26.</b> Densidade aparente do carvão vegetal das espécies estudadas.....	109
<b>Figura 27.</b> Rendimento gravimétrico do carvão vegetal das espécies estudadas. .	110
<b>Figura 28.</b> Agrupamento multivariado dos constituintes da madeira das espécies estudadas.....	113
<b>Figura 29.</b> Agrupamento multivariado dos constituintes do carvão das espécies estudadas.....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(AMF) (Área de Manejo Florestal)

(Da) Densidade aparente

(Db) Densidade básica

(DOF) (Documento de Origem Florestal)

(EDS) (Energy Dispersive Spectroscopy)

(FMA) Forest Management Area

(IAN) (Instituto Agronômico do Norte)

(IAWA) (International Association of Wood Anatomists)

(LCTM) (Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira)

(MFS) Manejo Florestal Sustentável

(MEV) (Microscopia Eletrônica de Varredura)

(NIR) Near Infrared Spectrometry

(SEM) Scanning Electron Microscope

(SLR) Seção Longitudinal Radial)

(SLT) Seção Longitudinal Tangencial)

(ST) (Seção Transversal)

UEPA (Universidade do Estado do Pará)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>2 OBEJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>ARTIGO 1: Forestry control in the Brazilian Amazon III: anatomy of wood and charcoal of tree species from sustainable forest management .....</b>	<b>21</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>23</b>
<b>MATERIAL AND METHODS .....</b>	<b>26</b>
<b>RESULTS.....</b>	<b>30</b>
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>55</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>64</b>
<b>ARTIGO 2: Impacto da carbonização na estrutura anatômica de carvões produzidos a partir de resíduos lenhosos do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira .....</b>	<b>85</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>87</b>
<b>2. Material e métodos.....</b>	<b>89</b>
2.1. Origem dos resíduos de madeira.....	90
2.2. Coleta, amostragem e identificação botânica .....	90
2.3. Análise anatômica da madeira.....	92
2.4. Carbonização da madeira e análise anatômica do carvão.....	92
2.5. Análise qualitativa e quantitativa da madeira e do carvão vegetal.....	93
2.6. Densidade básica da madeira.....	93
2.7. Densidade aparente rendimento gravimétrico do carvão vegetal .....	94
2.8. Análise estatística .....	94
<b>3. Resultados e discussão .....</b>	<b>95</b>
3.1. Diâmetro médio tangencial, frequência e pontoação intervascular dos vasos....	95
3.2. Largura, altura e frequência dos raios .....	102
3.3. Densidade da madeira e do carvão vegetal .....	105
3.4. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	109
3.5. Agrupamento das espécies para madeira e o carvão vegetal.....	110
<b>4. Conclusão.....</b>	<b>116</b>

<b>Referências .....</b>	<b>118</b>
<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A floresta amazônica desempenha papel crucial no fornecimento de serviços ecossistêmicos para a população local e mundial. Além disso, esse bioma contribui significativamente para combater as mudanças climáticas, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. No entanto, apesar dos inúmeros benefícios que a Amazônia proporciona, essa região enfrenta desafios significativos decorrentes do desmatamento e da degradação ambiental, predominantemente atribuído à atividade humana (Fernside, 2017; Carvalho et al., 2019; Albert et al., 2023; Lapola et al., 2023).

As principais atividades antrópicas que têm se destacado na região amazônica, incluem o uso da terra para agricultura e pecuária, os incêndios florestais e a extração ilegal de madeira (Alves et al., 2009; Fernside, 2017; Hasan et al., 2019; Lapola et al., 2023). A exploração ilegal de madeira é um problema global, caracterizada pela colheita, transporte, compra ou venda de madeira em violação às leis nacionais e locais, resultando na degradação dos ecossistemas florestais, perda de biodiversidade, impactos econômicos negativos, além de promover o crime organizado, corrupção e práticas ilegais (Atzberger et al., 2020; Bourgoin et al., 2018).

A produção e comercialização ilegal de carvão vegetal estão intimamente ligadas à extração seletiva de madeira. O elevado consumo de carvão vegetal para atender à demanda das indústrias contribui para o desmatamento, uma vez que as florestas plantadas não são capazes de suprir essa demanda, levando à exploração seletiva de madeira nas florestas nativas (Costa et al., 2014).

Para reverter essa realidade, tem sido implementadas diversas iniciativas de fiscalização ambiental e aplicação de leis (Jesus et al., 2017; Hillig et al., 2018; Silva et al., 2020). Entre os esforços, a análise da anatomia da madeira é uma ferramenta estabelecida e utilizada para a identificação de espécies comercializadas ilegalmente (Dormontte et al., 2015; Lowe et al., 2016). Além disso, nos últimos anos, esse método está sendo empregado no âmbito da antracologia, um campo de estudo dedicado à análise da madeira carbonizada, especificamente no estudo do carvão vegetal (Bodin et al., 2019).

A antracologia desempenha um papel crucial no combate ao comércio ilegal de carvão, contribuindo para a conservação das florestas tropicais e pode

fornecer orientações para produção e qualidade do carvão vegetal (Paula, 2005; Gonçalves et al., 2012; Perdigão et al., 2020; Braga Júnior et al., 2021). Estudos anteriores analisaram as alterações estruturais do carvão em diferentes temperaturas, com foco na perda de massa e retração volumétrica (Mcginnes et al., 1971; Kim e Hanna, 2006). Além disso, análises foram realizadas para investigar os efeitos da carbonização na estrutura anatômica da madeira de espécies nativas da Amazônia (Perdigão et al., 2020).

Outras pesquisas têm se concentrado na identificação taxonômica, demonstrando que as características anatômicas qualitativas são preservadas após a carbonização, embora ocorram mudanças morfométricas na estrutura da madeira, permitindo ainda a identificação do carvão (Prior e Gasson, 1993; Kim e Hanna, 2006; Gonçalves et al., 2012; Perdigão et al., 2020; Braga Júnior, 2021).

A utilização de madeira descartada durante a extração em áreas submetidas a planos de manejo florestal sustentável (PMFS), apresenta potencial para a produção de carvão (Lima et al., 2022a). Além dessa fonte, os resíduos de madeira são provenientes de serrarias, movelarias, indústrias de painéis e atividades de poda (Silva et al., 2020; Moreno e Font, 2015, Mancini e Rinnan, 2021; Meira et al., 2021). A utilização dos resíduos de madeira para a produção de energia, promoveria a sustentabilidade das florestas manejadas e ajudaria a combater o comércio ilegal de madeira na indústria do carvão vegetal, ao mesmo tempo em que ampliaria a variabilidade de fontes de energia disponíveis no país (Lima et al., 2022b).

Além disso, ao aproveitar os resíduos de madeira, evita-se o descarte inadequado e, conseqüentemente, reduz-se o impacto negativo gerado. A geração de energia a partir dos resíduos florestais contribui para diminuir a dependência de fontes energéticas não renováveis, como os combustíveis fósseis, e auxilia na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem promove a sustentabilidade e o uso mais eficiente dos recursos naturais (Lima et al., 2022a) .

Nesse contexto, a busca pela qualidade do carvão vegetal impulsiona estudos relacionados à física, química, devido à compreensão de que o conhecimento da matéria-prima permite a otimização das propriedades comerciais do produto (Lima et al., 2020). No entanto, como a região amazônica



apresenta diversidade de espécies e alta disponibilidade de resíduos provenientes do manejo florestal sustentável, há uma significativa heterogeneidade, pois, esses resíduos derivam de diferentes espécies florestais com propriedades tecnológicas distintas. Essa variação pode impactar a eficiência e a qualidade do carvão produzido a partir desses materiais.

Dessa forma, há uma lacuna de conhecimento a ser preenchida sobre as propriedades da madeira, a fim de melhorar o aproveitamento desses resíduos no processo de carbonização. Compreender o comportamento da madeira de floresta nativa nesse processo é fundamental para obter uma matéria-prima mais uniforme e aumentar a eficiência do produto (Assis et al., 2016; Souza Reis et al., 2022). Além disso, o conhecimento das estruturas anatômicas do carvão proveniente de espécies comerciais da Amazônia contribui para combater a comercialização de espécies de procedência ilegal.

## **2 OBEJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar a estrutura anatômica da madeira e do carvão de quinze espécies incluídas em planos de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Contribuir com um banco de dados para a identificação anatômica da madeira e do carvão vegetal de espécies comerciais da Amazônia.
  
- Avaliar o efeito da pirólise nas características anatômicas do xilema secundário em espécies de diferentes densidades e tipos de parênquima axial.

**ARTIGO 1: Forestry control in the Brazilian Amazon III: anatomy of wood and charcoal of tree species from sustainable forest management**

**Este artigo foi submetido na revista IAWA Journal, com qualis A1 nas classificações de periódico quadriênio 2017-2020**

**Forestry control in the Brazilian Amazonia III: anatomy of wood and charcoal of tree species from sustainable forest management**

Alana Assunção da Silva <sup>1\*</sup>, Kaick Coelho de Sousa<sup>2</sup>, Fernanda Ilkiu Borges de Souza<sup>3</sup>, João Rodrigo Coimbra Nobre<sup>4</sup>, Thiago de Paula Protásio<sup>5</sup>, Luiz Eduardo de Lima Melo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará – Campus V, 66095-015, Belém, PA, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, 68503-120 Marabá, PA, Brasil

<sup>3</sup>Laboratório de Botânica, Embrapa Amazônia Oriental, 66095-100 Belém, PA, Brazil.

<sup>4</sup>Departamento de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará – Campus VI, 68625-000 Paragominas, PA, Brasil

<sup>5</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Parauapebas, 685115-000, PA, Brasil

\*corresponding author: [alana0463@gmail.com](mailto:alana0463@gmail.com)

**ABSTRACT**

The illegal harvest of timber and the subsequent production of charcoal has been contributing to deforestation of the Brazilian Amazon and its degradation. Analysis of wood anatomy is a well-established tool used to detect illegally harvested wood and is commonly employed in the control of illegal forestry activities. The objective of this study was to contribute to a database used for the anatomical identification of wood and charcoal from tree species that are commonly harvested and marketed in the Amazon. The macro- and microscopic characteristics of wood and charcoal for 15 forest species were described. Characteristics that could be described in detail such as vessel grouping, type of axial parenchyma, and in some cases, perforation plates and uniseriate rays, are fundamental to the identification of wood and charcoal that are illegally, or even legally,

marketed. The study aids in the monitoring of the illegal marketing of wood and charcoal and will contribute to the construction of a database and reference collections that will be available for research, training, and use by forest managers, anatomists and anthracologists who study both wood and charcoal.

**Keywords:** Anatomical identification; tropical species; forest inspection; Brazil

## INTRODUCTION

Native forests have suffered deforestation and degradation in a large range of ecosystems across the planet. In the Amazon biome, land use change including expansion of urban areas, agriculture, and cattle ranching, along with forest fires and illegal and selective timber harvesting for charcoal production are factors that have contributed to the decline of forests (Martinelli & Moraes, 2013; Koch *et al.* 2015; Lowe *et al.* 2016; Fearnside, 2017; Noguerón *et al.* 2018; Scarano & Silva, 2018, Braga Junior *et al.* 2021a).

The illegal extraction of wood is a global problem, and it has caused significant losses of biodiversity which has generated negative socioeconomic consequences (Lowe *et al.* 2016). In tropical ecosystems, it is estimated that 50 to 90% of marketed wood is illegal, and this practice is commonly associated with criminal activity such as land squatting and violence perpetrated against indigenous and traditional communities, besides causing a reduction in revenue received by governments and local communities (Nellemann 2012; Ferrante *et al.* 2021; Villén-Pérez *et al.* 2022).

As part of this scenario of deforestation and subsequent degradation, the illegal production and sale of charcoal and its indiscriminate use is directly related to the selective harvest of timber, which makes it a lucrative activity for criminal organizations on several continents (Nellemann 2012; Nellemann *et al.* 2018). European countries, for example, acquire illegal charcoal from subtropical and tropical countries in Africa and

Latin America (Haag et al., 2020). In these places, environmental degradation, over-exploitation of forest resources, and the emergence of serious humanitarian and social problems are constant occurrences (Interpol 2015).

The control and monitoring of the network of production and supply of wood and charcoal is a challenge in Brazil (Solinge *et al.* 2016; Gonçalves *et al.* 2018). Even though the Brazilian federal government requires a Document of Forest Origin (DOF), a permit used nationally and internationally to transport and store forest products which indicates species, quantity, commercial use and origin and destination of forest products, criminals operating in the forest sector employ a diversity of methods to fraud the DOF system. This problem is made worse because of the enormous forest area in the Amazon, high species diversity, and deficiency of agents trained in forest monitoring and protection (Schmitt & Scardua, 2015; Carvalho et al., 2019; Reydon *et al.* 2020). Consequently, there is no real control over the species used as raw material and their origin, which allows for charcoal, for example, to be produced from residual materials from sawmills, many of which are unauthorized and do not have documentation that demonstrates the origin of the wood sawn at the mill (Oliveira *et al.* 2019; Silva *et al.* 2018).

Regulation of the marketing of wood, application of laws, and national and international agreements are methods used to combat the advance of the illegal harvest and commercialization of wood and derived products (Solinge *et al.* 2016). As part of these efforts, the use of tools that identify tree species with greater confidence and precision are essential. Among these forensic techniques are wood anatomy, dendrochronology, mass spectrometry, Near Infrared Spectrometry (NIR), DNA analysis, stable isotopes, and radiocarbon analysis. However, there is not one scientific method, that when used alone, can address all possible questions related to the identification and forensic diagnosis of wood (Dormontte *et al.* 2015; Lowe *et al.* 2016). Previous studies

have been conducted to identify and classify Amazonian wood using NIR. Although these studies reported high rates of precision, for example 99.2% and 95.2% (Novaes *et al.*, 2022) and 97.9% (Lima *et al.*, 2022), these results need to be validated based on lignin characteristics.

Wood anatomy, based on macroscopic and microscopic analyses, is the method that is most accepted and widely used to identify wood types because it enables wood identification at the genus level, and in some cases, that of species. Despite depending on the expertise of professional anatomists and highly trained technicians, this tool provides a relatively quick diagnosis and has low costs associated with its use. Furthermore, all forensic techniques developed for wood identification require reference material that is found in xylotheques, with the exception of genetic analysis, which can generate DNA profiles from other plant parts such as leaves and cambium (Dormontte *et al.* 2015; Koch *et al.* 2015; Solinge *et al.* 2016; UNODC 2016; Brandes *et al.* 2020).

During recent decades, the anatomical identification of charcoal has become a frequently used tool to identify tree species from illegal sources with the objective of controlling the commercialization of this fuel source (Gonçalves *et al.* 2014; Gonçalves and Scheel-Ybert, 2016; Gonçalves *et al.* 2016). This is only possible because after carbonization, qualitative anatomical characteristics are well preserved, with the principal changes wood structure being morphometric in nature (Prior; Gasson 1993; Kim; Hanna 2006; Gonçalves *et al.* 2012; Perdigão *et al.*, 2020; Braga Junior *et al.* 2021a). In this context, databases used for wood identification such as Inside Wood, tools used for description of Brazilian species (Coradin *et al.* 2010), and specialized literature (IAWA Committee, 1989, Ruffinatto *et al.* 2015), can aid in the identification of charcoal. However, the most reliable method to identify charcoal is by using comparative material,

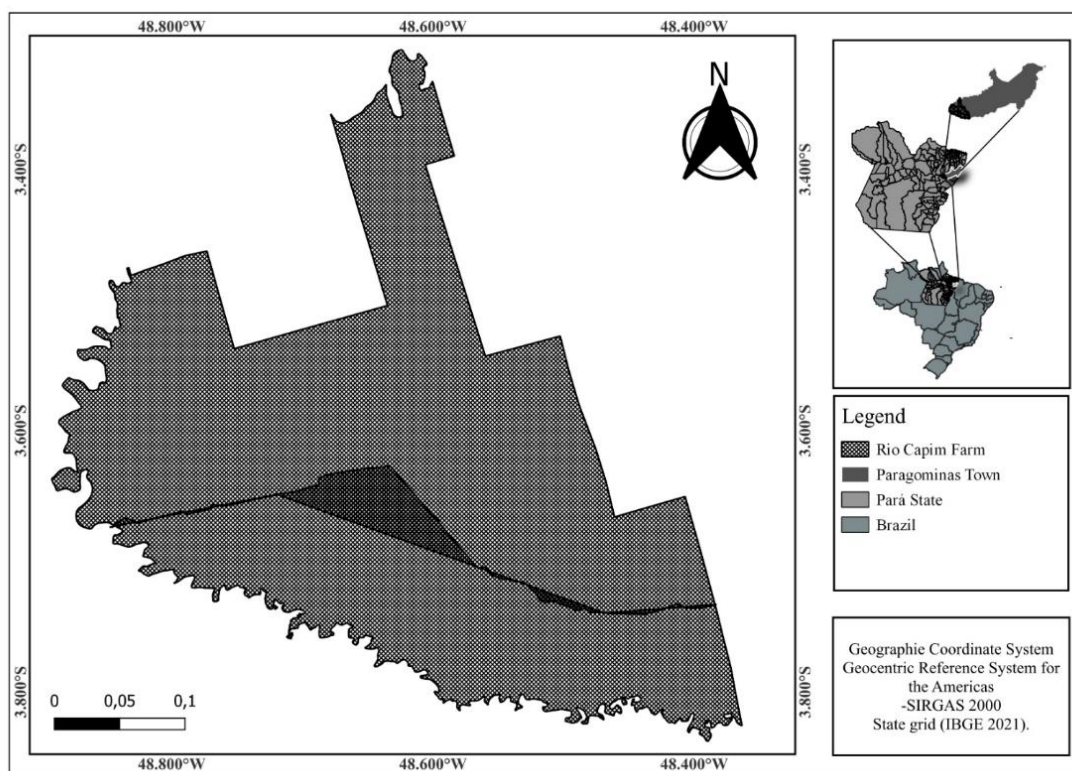
samples, descriptions, and photographs (Gonçalves & Scheel-Ybert 2016; Scheel- Ybert 2016; Bodin *et al.* 2019).

Species description from wood from carbonized samples is often complicated by the lack of information in the literature. Therefore, there is a great need to develop comparative wood and charcoal collections in tropical regions, considering their great biodiversity. In this study, the macroscopic and microscopic anatomy of wood from Brazilian Amazonian tree species that are commonly harvested and marketed are described, with the objective of contributing to databases used for identification of forest species in support of forest monitoring activities.

### **MATERIAL AND METHODS**

The wood used in this study was obtained from residuals from a sustainable forest management operation in the Rio Capim Forest Management Area (FMA), in the municipality of Paragominas, Southeast mesoregion of the state of Pará (coordinates: 3° 30' 45" S and 48° 30' 45" W), with a territorial extension of 209,130.54 hectares (Figure 1). Therefore, the wood samples used in this study were obtained from legal sources that had forest certification.

**Fig. 1.** Location of the Rio Capim FMA, Paragominas, Pará, Brazil.



Sample collection was done in October 2018, during which samples from 15 species were collected for analysis in this study (Table 1). Sample collection was done by randomly selecting large diameter branches from the crowns of three trees from each species. Three days after tree harvest at the Rio Capim FMA, three wood disks were taken from each branch for laboratory analysis and species identification.

**Table 1.** List of analyzed species Scientific nomenclature and geographic distribution follow the information in the book Flora do Brasil ([reflora.jbrj.gov.br](http://reflora.jbrj.gov.br), accessed June 2021).

Family	Species	Xylotheque number (XILO)	Herbarium number (IANxilo)	Phytogeographic dominion
Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	8712	198000	Amazonia



Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	8725	198001	Amazonia
	<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	8717	197990	Amazonia
Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	8713	197991	Amazonia, Atlantic Rain Forest
	<i>Parinari rodolphii</i> Huber		197997	Amazonia
Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	8715	197994	Amazonia
Lecythidaceae	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	8724	197992	Amazonia
	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	8726	197996	Amazonia
	<i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith	8721	197987	Amazonia
	<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	8723	197988	Amazonia, Atlantic Rain Forest
	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	8714	197995	Amazonia, Atlantic Rain Forest
Leguminosae- Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	8718	197998	Amazonia
	<i>Pseudopiptadenia</i> <i>suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	8711	197989	Amazonia
Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	8720	197993	Amazonia, Atlantic Rain Forest
	<i>Pouteria oblanceolata</i> Pires	8722	197999	Amazonia, Atlantic Rain Forest

Acronyms: XILO (xylaria) and IAN (herbarium) of ‘Instituto Agrônômico do Norte’ of the “Embrapa Amazônia Oriental”.

Fertility samples were also obtained (flower and/or fruit) for botanical confirmation of the species present in the inventory, and the exsiccates were deposited in the IAN herbarium at EMBRAPA Eastern Amazon, Belém, Pará, Brazil. Representative samples of wood from each tree were deposited in the xylotheque at EMBRAPA Eastern Amazon and in the ‘Joaquim Ivanir Gomes xylotheque at the State University of Pará (UEPA), Marabá, Pará, Brazil.

The wood samples were divided into two subsamples for macroscopic and microscopic anatomic analysis of wood and charcoal.

For the macroscopic analysis of the wood, test specimens were taken from the wood discs in the transversal plane, planed and smoothed with sandpaper with grit ranging from 80 to 1200 until the test specimens were completely smooth and polished. Analysis of macroscopic anatomic characteristics was done using a 10x magnifying thread counter (Coradin *et al.* 2010). Subsequently, anatomic characteristics were photographed using a light stereo microscope with a coupled digital camera using a magnification of 10x, which simulated the lens of a portable magnifying glass; this was done to demonstrate the capability of macroscopic diagnosis. The anatomic characteristics were described according to the classification proposed by Ruffinatto *et al.* (2015).

For the microscopic analysis, 2 cm<sup>3</sup> test specimens from each species were taken from the transversal, tangential and radial directions. These specimens were softened in boiling water and then sectioned to a thickness of 16 to 30 µm using a sliding microtome. A portion of the histological slides remained natural while the remainder were clarified using a solution of sodium hypochlorite, colored with Safranin and dehydrated in an alcohol dehydration series (Johansen 1940) and mounted with Entellan® synthetic resin. The maceration process involved transferring longitudinal wood strips to hermetically sealed glass flasks with glacial acetic acid and hydrogen peroxide in a 1:1 ratio, dried in an oven at 60 °C for 24 hours, washed in running water, and colored with Safranin (Franklin 1945). The images were taken and analyzed using a light microscope with a coupled digital camera.

For the anatomical analysis of charcoal, wood subsamples with an approximate size of 1.5 x 1.5 x 3.0 cm were placed in an electric muffle furnace with a water-cooled condenser and a flask to collect condensable gasses (Lima *et al.* 2020). The carbonization

process lasted approximately 5 hours at a heating rate of 1.66 °C/min, reaching a final temperature of 450 °C, with a residence time at the final temperature of 2 hours (Muñiz *et al.* 2012).

The resulting charcoal samples were manually fragmented and analyzed using a scanning electron microscope (SEM), to obtain electrophotomicroscopic images. To diagnose the type of mineral inclusion in the charcoal, Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), coupled to the SEM, was used under the following operating conditions: electron beam current = 80 µA, voltage of constant acceleration = 20 kv, work distance = 8.5 mm, count time for elemental analysis = 30 s.

Macroscopic images of the charcoal were taken using a light stereo microscope with a coupled digital camera using a magnification of 10x. The samples were deposited in the charcoal collection of the Wood Science and Technology Laboratory of the State University of Pará (LCTM / UEPA) in Marabá, state of Pará, Brazil.

The microscopic anatomical descriptions of wood and charcoal were done according to the recommendations of the IAWA Committee (1989). The macroscopic description of charcoal was done following the classification criteria in Ruffinatto *et al.* (2015).

Wood and charcoal were quantitatively analyzed by making 30 measurements of vessel density (number/mm<sup>2</sup>), tangential diameter of the vessel lumens (µm), rays per linear millimeter, ray width and height, diameter of vessel-ray pits (µm). All measurements were done using the software Image Pro Express version 6.0.

## RESULTS

The anatomical descriptions of wood and charcoal for each species are presented below. The symbol “\*” designates characterization only for wood, while “+” designates information only for charcoal. Following the images are macroscopic and microscopic

images of wood and charcoal and the principal useful anatomic characteristics used to separate and identify each species (Table 2).

**Table 2.** Principal microscopic anatomic characteristics of wood and charcoal.

Qualitative data: (+) presence; (-) absence; Vs: Exclusively solitary vessels; Sp: Simple perforation plate; Sc: Scalariform perforation plate; Vessel-ray pits – a: Vessel-ray pits with distinct areolas; similar to intervacular pits in size and form in the entire ray cell; b: Vessel-ray pits with small and apparently simple areolas; round or angular pits; c: Vessel-ray pits with small and apparently simple areolas: horizontal pits (scalariform, similar to a gash) and vertical (palisade); d: Vessel-ray pits with small and apparently simple areolas with two sizes and distinct types in each ray cell; e: Vessel-ray pits unilaterally composed and thick (> 10 µm); f: Vessel-ray pits restricted to marginal rows; ray composition – a: all ray cells are procumbent; b: ray cells of the procumbent body with a row of erect or square marginal cells; c: Ray cells of the procumbent body with principally 2-4 rows of erect or square marginal cells; d: Ray cells of the procumbent body with more than 4 rows of erect or square marginal cells; Vc: Vessels of two distinct diameter classes, porous wood with no rings; Rc: Exclusively uniseriate rays ; Cr: Radial canal; Ve: Vestured pits.

Species	Vs	Sp	Sc	Vessel-ray pits						Type of axial parenchyma	Rays composition				Vc	Rc	Cr	Ve
				a	b	c	d	e	f		a	b	c	d				
<i>Protium altissimum</i>	-	+	-	-	-	+	-	-	-	Paratracheal rare	-	+	-	-	-	-	+	-
<i>Caryocar glabrum</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	Apotracheal diffuse and diffuse in aggregate	-	-	-	+	-	-	-	-

<i>Caryocar villosum</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	Apotracheal diffuse and diffuse in aggregate	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Licania canescens</i>	+	+	-	-	-	-	-	-	+	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	-	-	+	-	+	+	-	-
<i>Parinari rodolphii</i>	+	+	-	-	-	+	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	-	-	+	-	+	-	-	-
<i>Goupia glabra</i>	+	-	+	+	-	-	-	-	-	Apotracheal diffuse and diffuse in aggregate	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Couratari guianensis</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Couratari oblongifolia</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Eschweilera grandiflora</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lecythis pisonis</i>	-	+	-	-	-	-	+	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	-	+	-	-	-	-	-	-

<i>Lecythis lurida</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width, reticulate	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Dinizia excelsa</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Aliform, aliform losangular, confluent	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Vasicentric, aliform, aliform losangular, unilateral	+	-	-	-	-	+	-	+
<i>Manilkara elata</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width,	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Pouteria oblanceolata</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Narrow band of up to three cells in width,	-	-	+	-	-	-	-	-

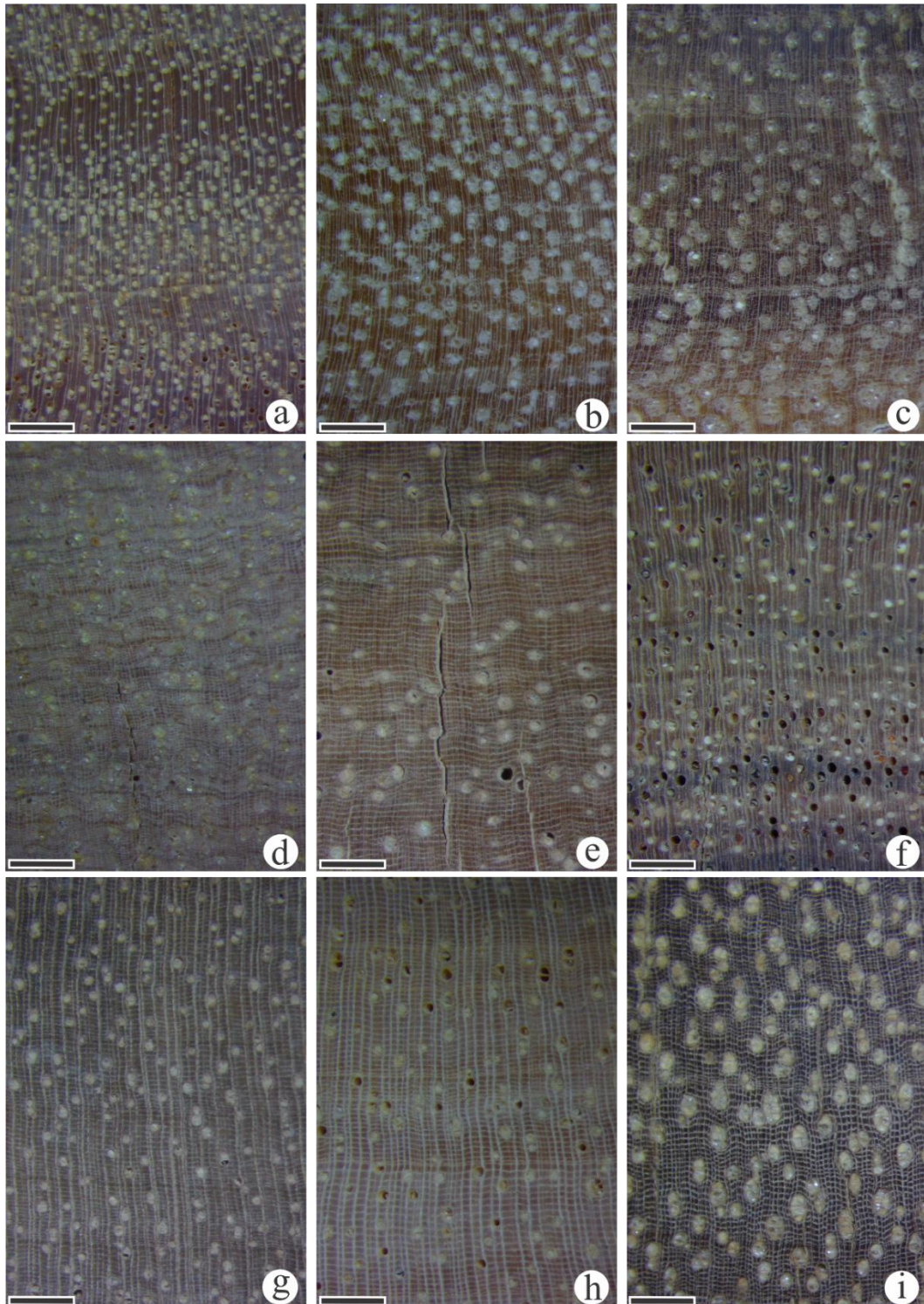
***Protium altissimum* (Aubl.) Marchand** (Figs 2a, 4a, 6a, b, c, 11a, b, c, 16)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1(a)\*, 3, 12, 18, 19<sup>+</sup>, 20\*, 24, 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5-12/mm), 60\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 25, 32, 41, 48, 52\*, 56, 61, 65, 69, 71\*, 75, 78, 92, 97, 106, 115, 130, 135\*, 136, 137, 183, 186, 189, 192, 194, 197\*.

**Fig. 2.** Macrographic images of the transversal surface of wood (amplified 10x). (a) *Protium altissimum*, (b) *Caryocar glabrum*, (c) *Caryocar villosum*, (d) *Licania*

*canescens*, (e) *Parinari rodolphii*, (f) *Goupia glabra*, (g) *Couratari guianensis*, (h) *Couratari oblongifolia*, (i) *Eschweilera grandiflora*. Scale bar: 1mm.



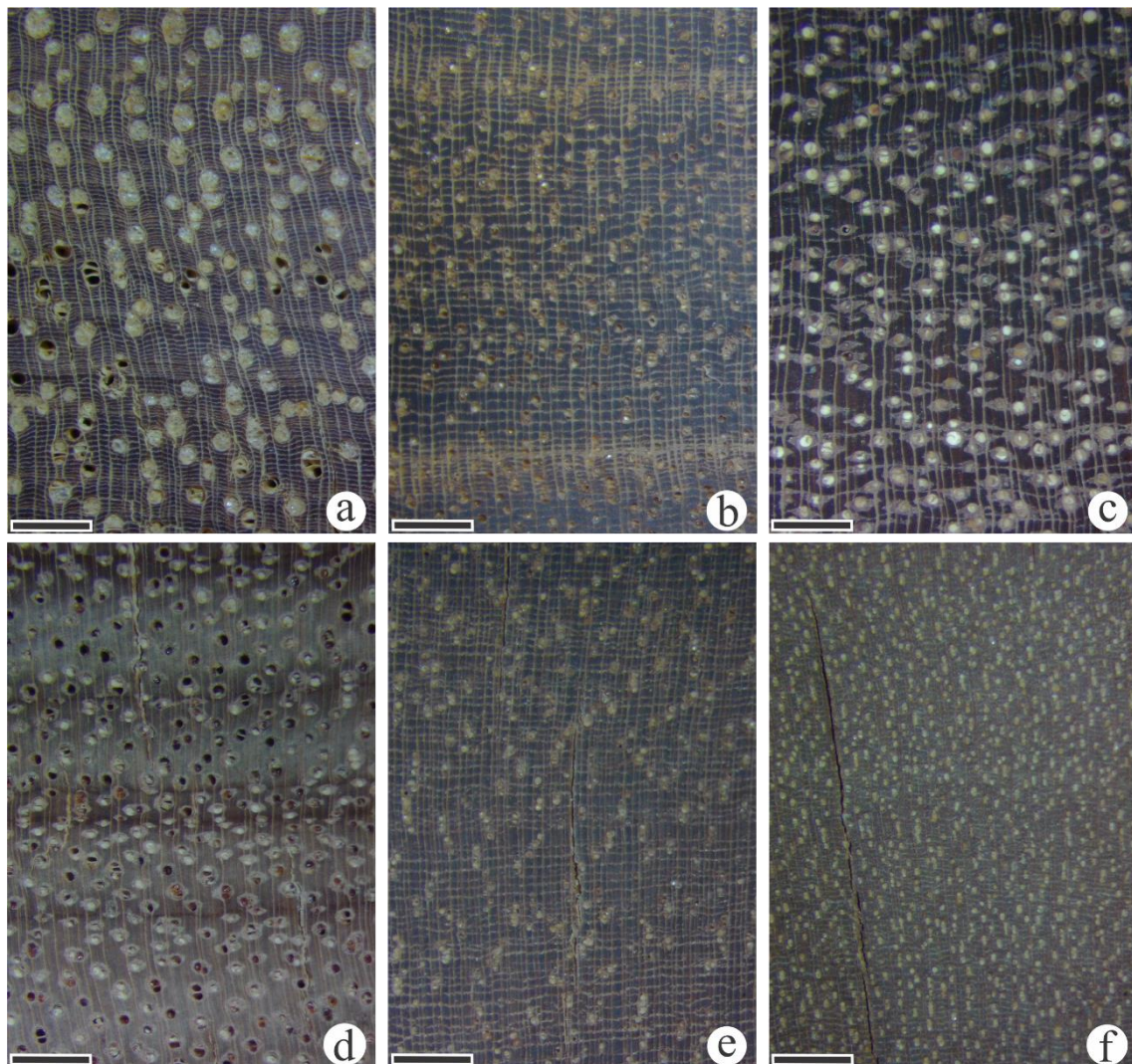
***Caryocar glabrum* (Aubl.) Pers.** (Figs 2b, 4b, 6 d, e, f, 11 d, e, f)



Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (e)\*, 3, 17, 20<sup>+</sup>, 21\*, 24, 29, 30, 42 (diffuse-in-aggregate), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm)<sup>+</sup>, 49 (> 12/mm)\*, 62\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 24<sup>+</sup>, 25\*, 31, 42, 47, 53\*, 56, 61, 66, 70, 72\*, 76, 77, 93, 97, 100, 108, 115<sup>+</sup>, 116\*, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194, 199\*.

**Fig. 3.** Macrographic images of the transversal surface of wood (amplified 10x). (a) *Lecythis pisonis*, (b) *Lecythis lurida*, (c) *Dinizia excelsa*, (d) *Pseudopiptadenia suaveolens*, (e) *Manilkara elata*, (f) *Pouteria oblanceolata*. Scale bar: 1mm.



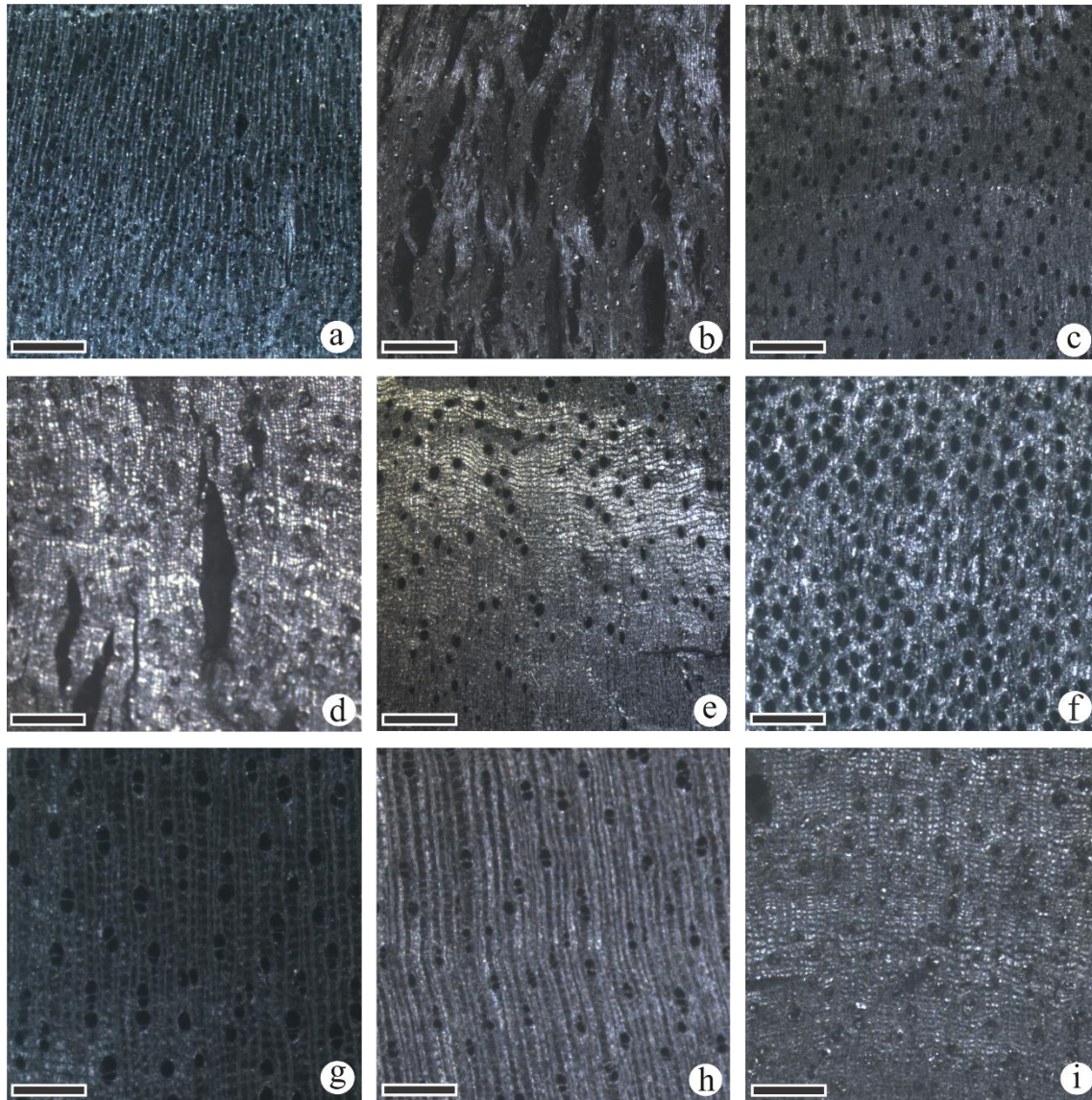
*Caryocar villosum* (Aubl.) Pers. (Figs 2c, 4c, 6 g, h, i, 11 g, h, i)



Macroscopic code (wood and charcoal): 1(e)\*, 3, 16<sup>+</sup>, 17\*, 21, 24, 29, 30, 42 (diffuse-in-aggregate), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (high > 0,75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40-0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 24<sup>+</sup>, 25\*, 31, 42, 46<sup>+</sup>, 47\*, 53\*, 56, 61, 66, 70, 72\*, 76, 77, 93, 97, 100, 108, 115<sup>+</sup>, 116\*, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194<sup>+</sup>, 195\*, 200\*.

**Fig. 4.** Macrographic images of the transversal surface of charcoal (amplified 10x). (a) *Protium altissimum*, (b) *Caryocar glabrum*, (c) *Caryocar villosum*, (d) *Licania canescens*, (e) *Parinari rodolphii*, (f) *Goupia glabra*, (g) *Couratari guianensis*, (h) *Couratari oblongifolia*, (i) *Eschweilera grandiflora*. Scale bar: 1 mm.

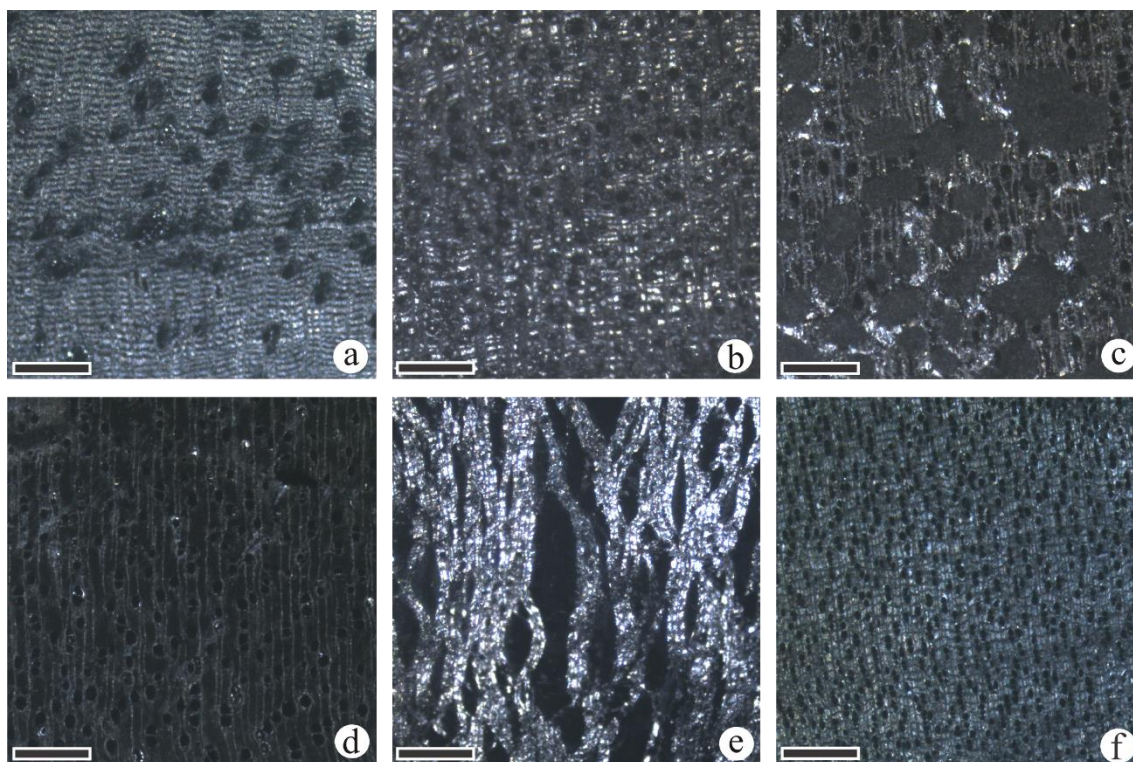


***Licania canescens* Benoist** (Figs 2d, 4d, 7 a, b, c 12 a, b, c)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 13, 16, 20<sup>+</sup>, 21\*, 24, 35 (majority narrow), 40, 42 (band), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (> 12/mm), 63\*, 65 (high > 0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40-0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 9, 13, 22, 24, 34, 42, 45, 46, 52\*, 56, 63, 66, 70, 73\*, 86, 87, 92, 96, 107, 116, 159, 160, 183, 186, 189, 192, 194<sup>+</sup>, 195\*, 200\*.

**Fig. 5.** Macrographic images of the transversal surface of charcoal (amplified 10x). (a) *Lecythis pisonis*, (b) *Lecythis lurida*, (c) *Dinizia excelsa*, (d) *Pseudopiptadenia suaveolens*, (e) *Manilkara elata*, (f) *Pouteria oblanceolata*. Scale bar: 1mm.



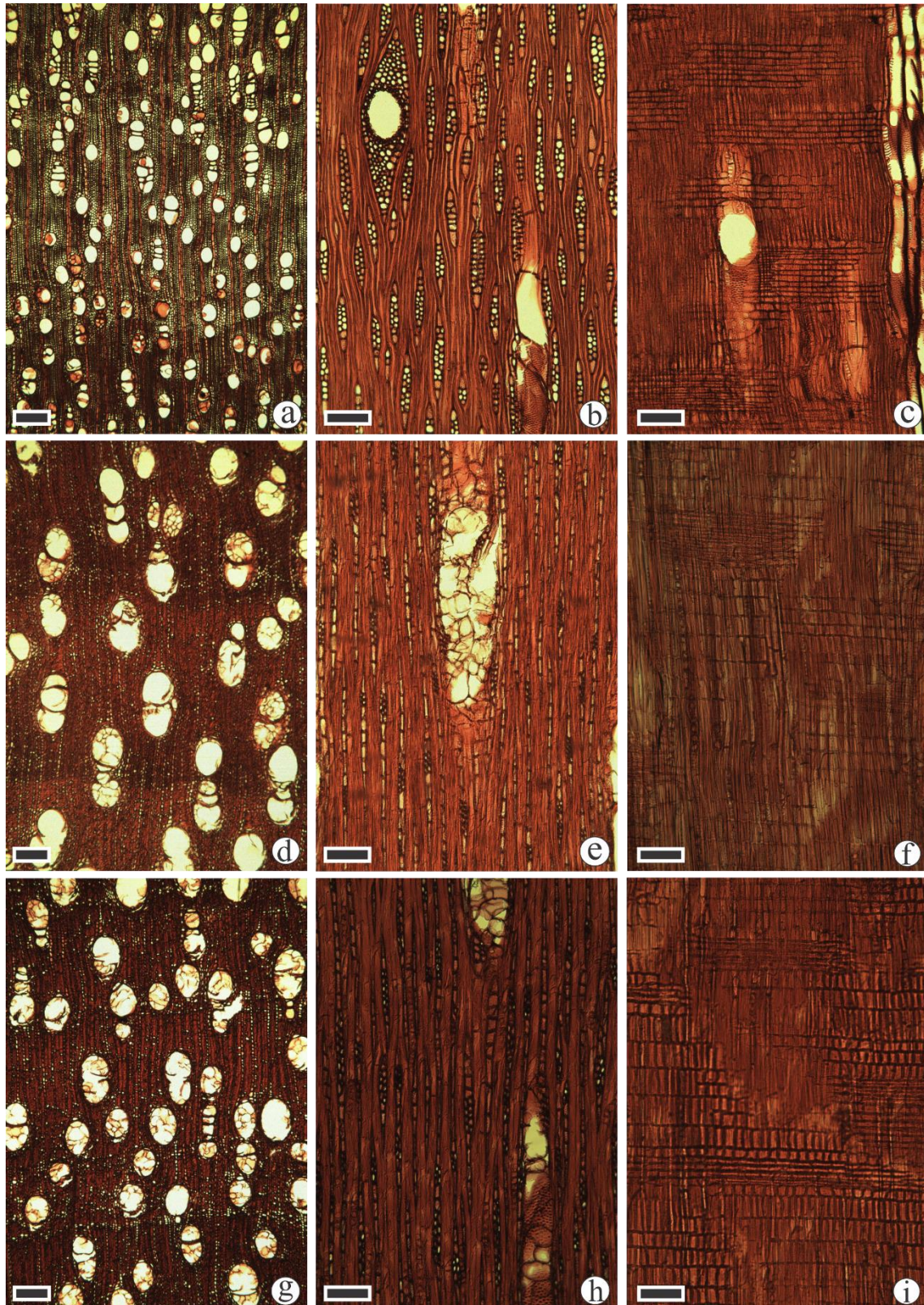
***Parinari rodolphii* Huber** (Figs 2e, 4e, 7 d, e, f, 12d, e, f, 18)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1(absent), 3, 13, 16, 21, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (> 12/mm)<sup>+</sup>, 49 (5–12/mm)\*, 63\*, 65 (high > 0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40-0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.  
 Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 9, 13, 22, 25, 32, 42<sup>+</sup>, 43\*, 44, 46, 53\*, 63, 66, 69, 72\*, 86, 87, 94, 96, 97, 107, 115\*, 116<sup>+</sup>, 159, 160, 183, 186, 189, 192, 194<sup>+</sup>, 195\*, 200<sup>+</sup>.

**Fig. 6.** Wood micrographs. (a-c) *Protium altissimum*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f)



*Caryocar glabrum*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Caryocar villosum*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu$ m (a,d,g); 100  $\mu$ m (b, c, e, f, h, i).



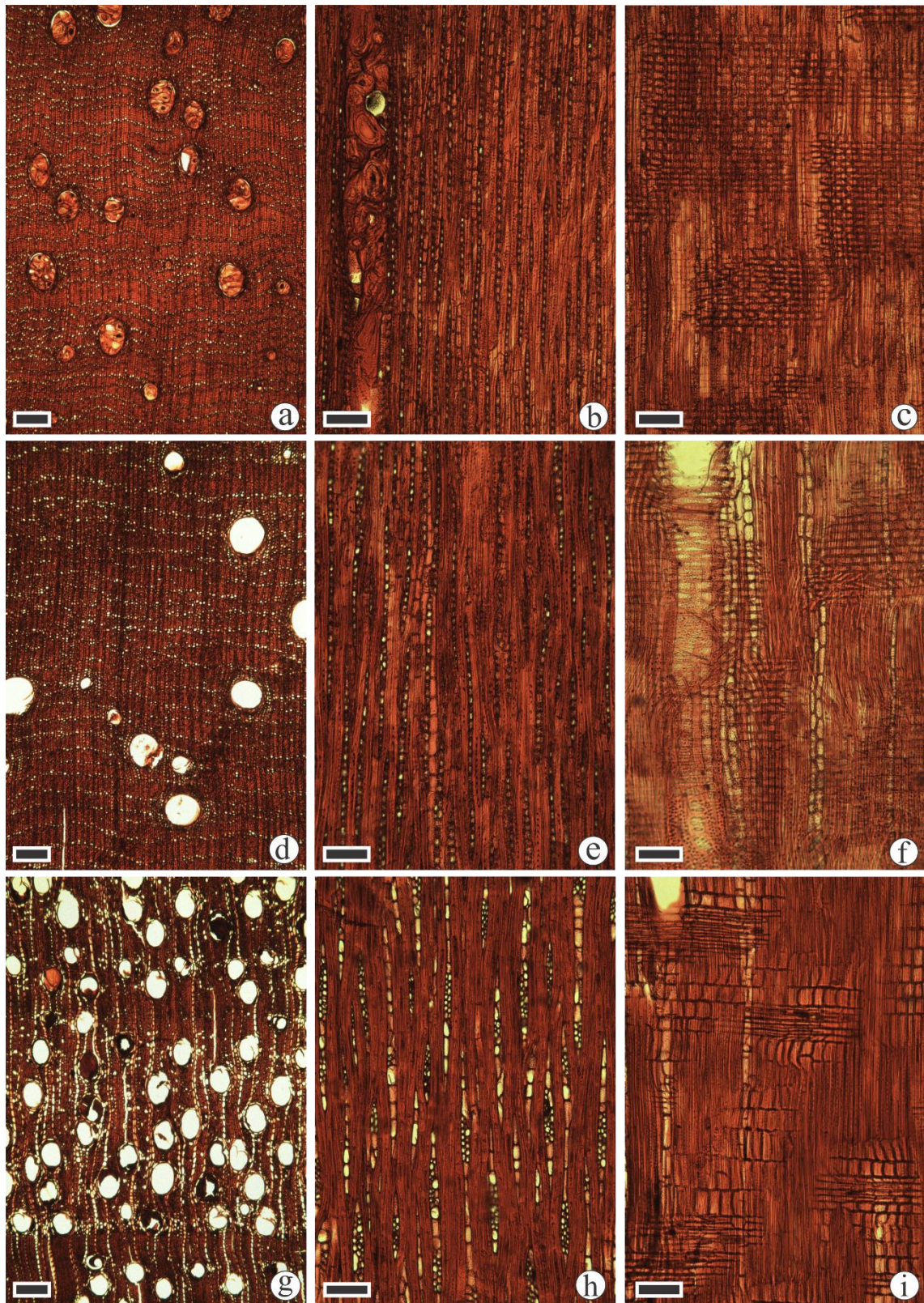
***Goupia glabra* Aubl.** (Figs 2f, 4f, 7g, h, i, 12g, h, i)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 13, 17, 20<sup>+</sup>, 21\*, 29, 30, 42 (diffuse), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 61\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (distinct and disagreeable (fetid))\* , 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 9, 14, 15, 22, 24, 30, 41<sup>+</sup> 42\*, 47, 53\*, 58, 63, 66, 69, 72\*, 76, 77, 93, 97, 100, 108, 115, 136, 137, 183, 186, 189, 192, 194, 198\*.

**Fig. 7.** Wood micrographs. (a-c) *Licania canescens*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Parinari rodolphii*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Goupia glabra*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).





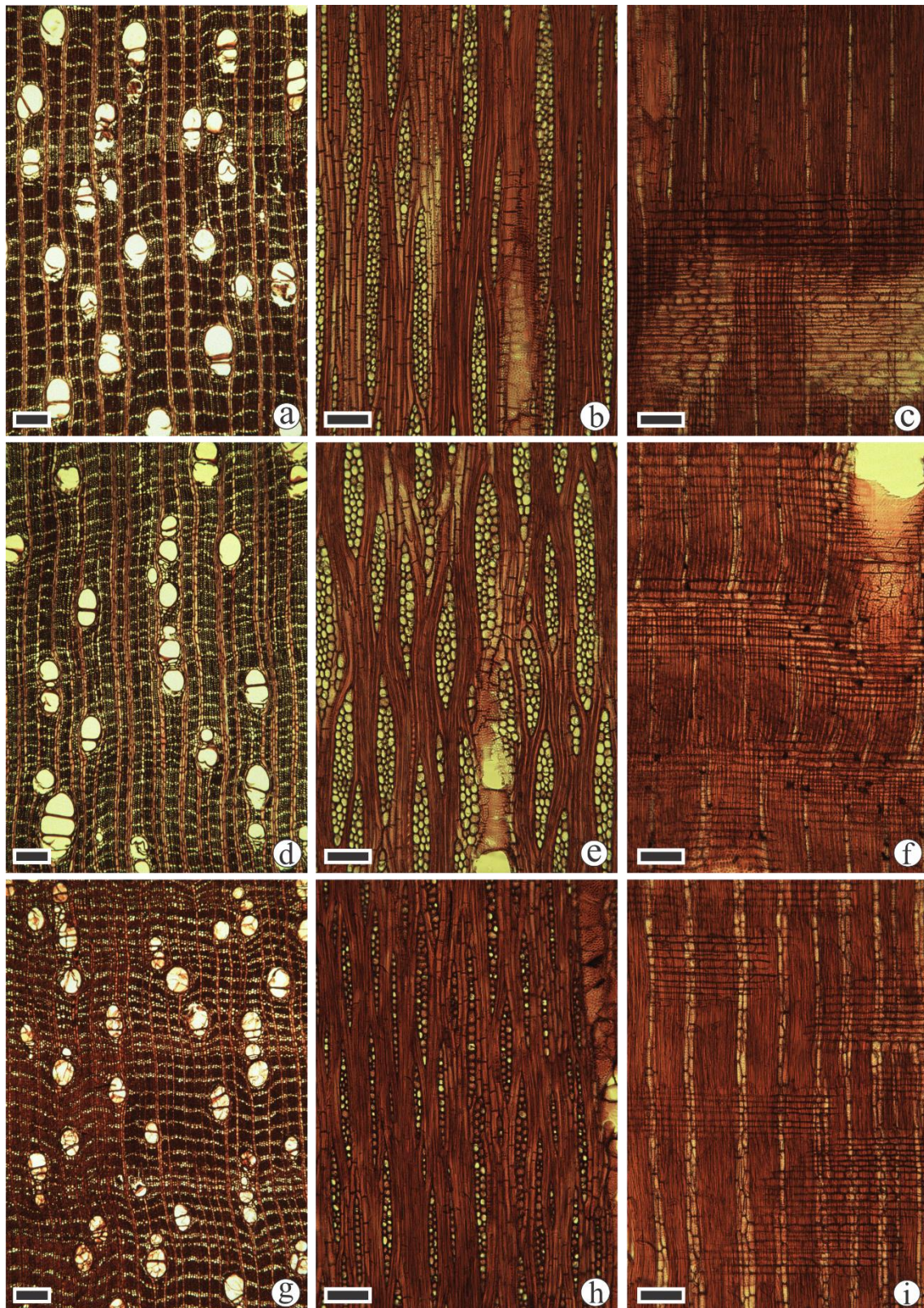
*Couratari guianensis* Aubl. (Figs 2g, 4g, 8a, b, c, 13a, b, c, 17)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 17, 20<sup>+</sup>, 21\*, 24, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (visible rays), 44 (visible rays), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (low < 0.40 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 42, 47, 53\*, 56, 61, 66, 69, 72\*, 86, 87, 93, 98, 104, 115, 136, 142, 159, 160, 183, 186, 189, 192, 193<sup>+</sup>, 194\*, 200\*.

**Fig. 8.** Wood micrographs. (a-c) *Couratari guianensis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Couratari oblongifolia*. (d) ST; (e) SLT; (f) LRS. (g-i) *Eschweilera grandiflora*. (g) TS; (h) LTS; (i) SLR. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).





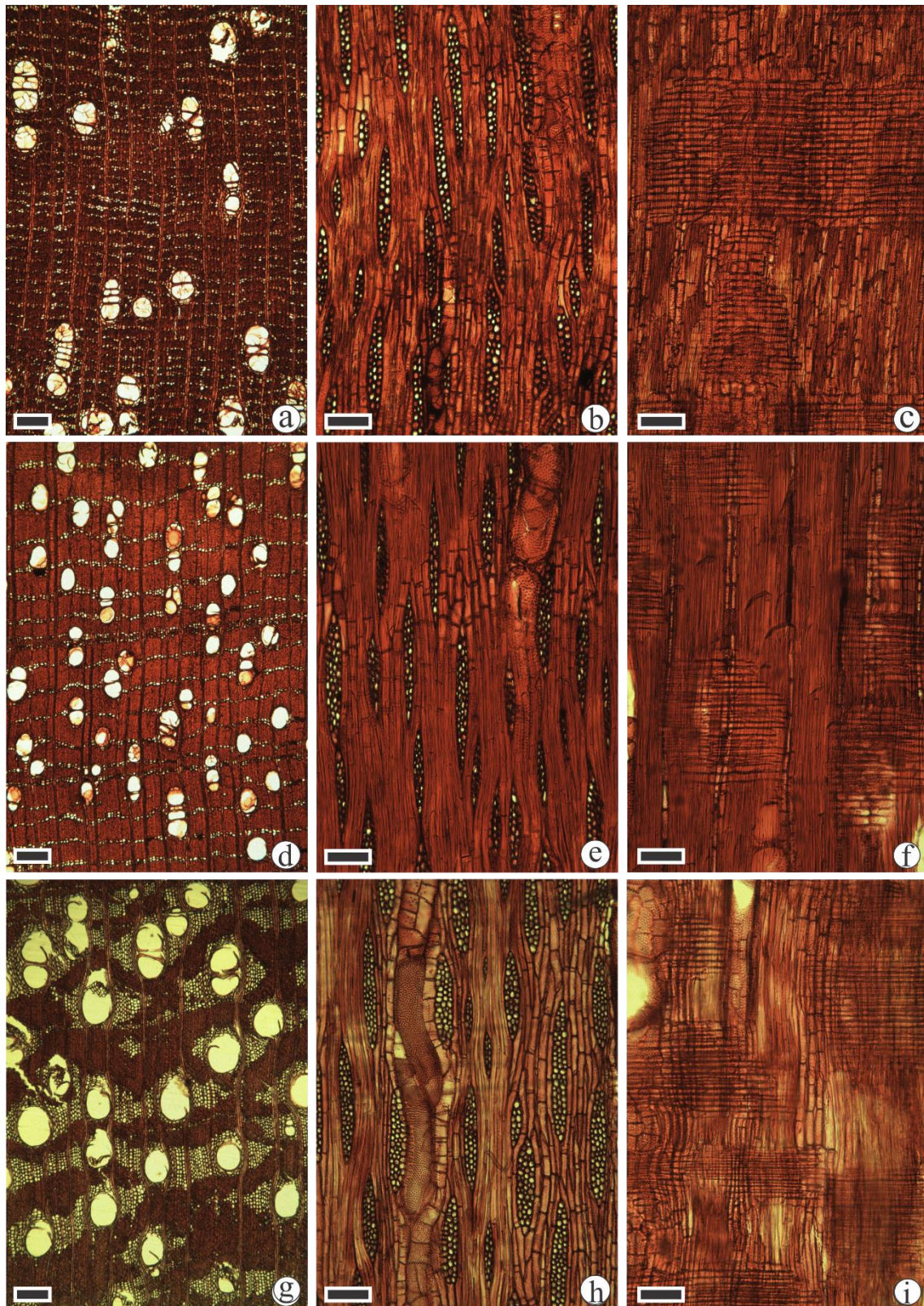
*Couratari oblongifolia* Ducke & Kunth (Figs 2h, 4h, 8d, e, f, 13d, e, f)



Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 17, 21, 24, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (visible rays), 44 (visible rays), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 42, 47, 53\*, 56, 61, 66, 69, 72\*, 86, 87, 93, 98, 104, 115, 136, 142, 159, 160, 183, 186, 189, 192, 193<sup>+</sup>, 194\*, 200\*.

**Fig. 9.** Wood micrographs. (a-c) *Lecythis pisonis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Lecythis lurida*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Dinizia excelsa*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200 µm (a,d,g); 100 µm (b, c, e, f, h, i).



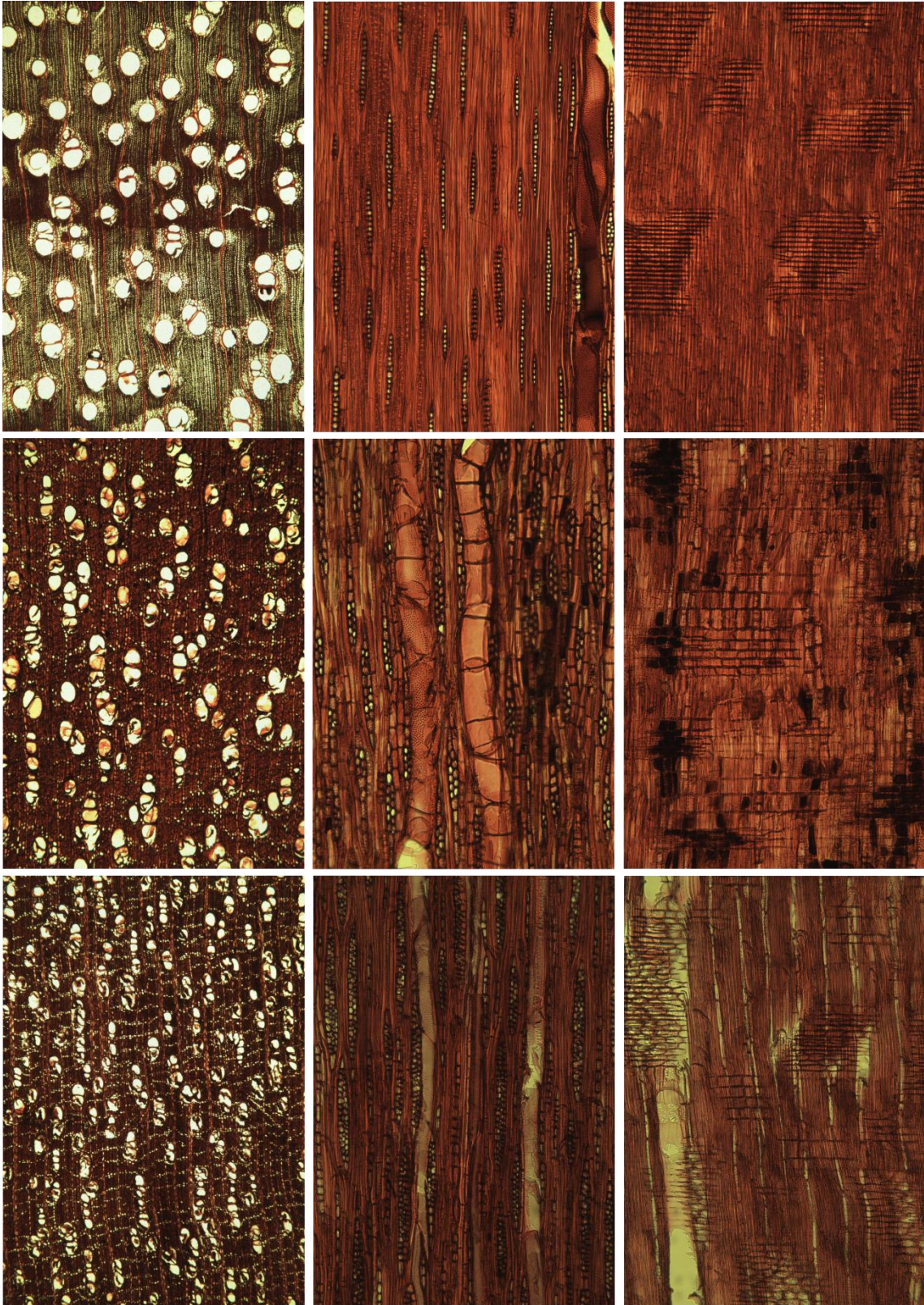
*Eschweilera grandiflora* (Aubl.) Sandwith (Figs 2i, 4i, 8g, h, i, 13g, h, i)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 17, 21, 24, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (low < 0.40 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 42, 47, 53\*, 56, 61, 66, 70, 71\*, 86, 87, 93, 97, 104, 115, 136, 142, 159, 160, 183, 186, 189, 193<sup>+</sup>, 194\*, 200\*.

**Fig. 10.** Wood micrographs. (a-c) *Pseudopiptadenia suaveolens*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Manilkara elata*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Pouteria oblanceolata*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).





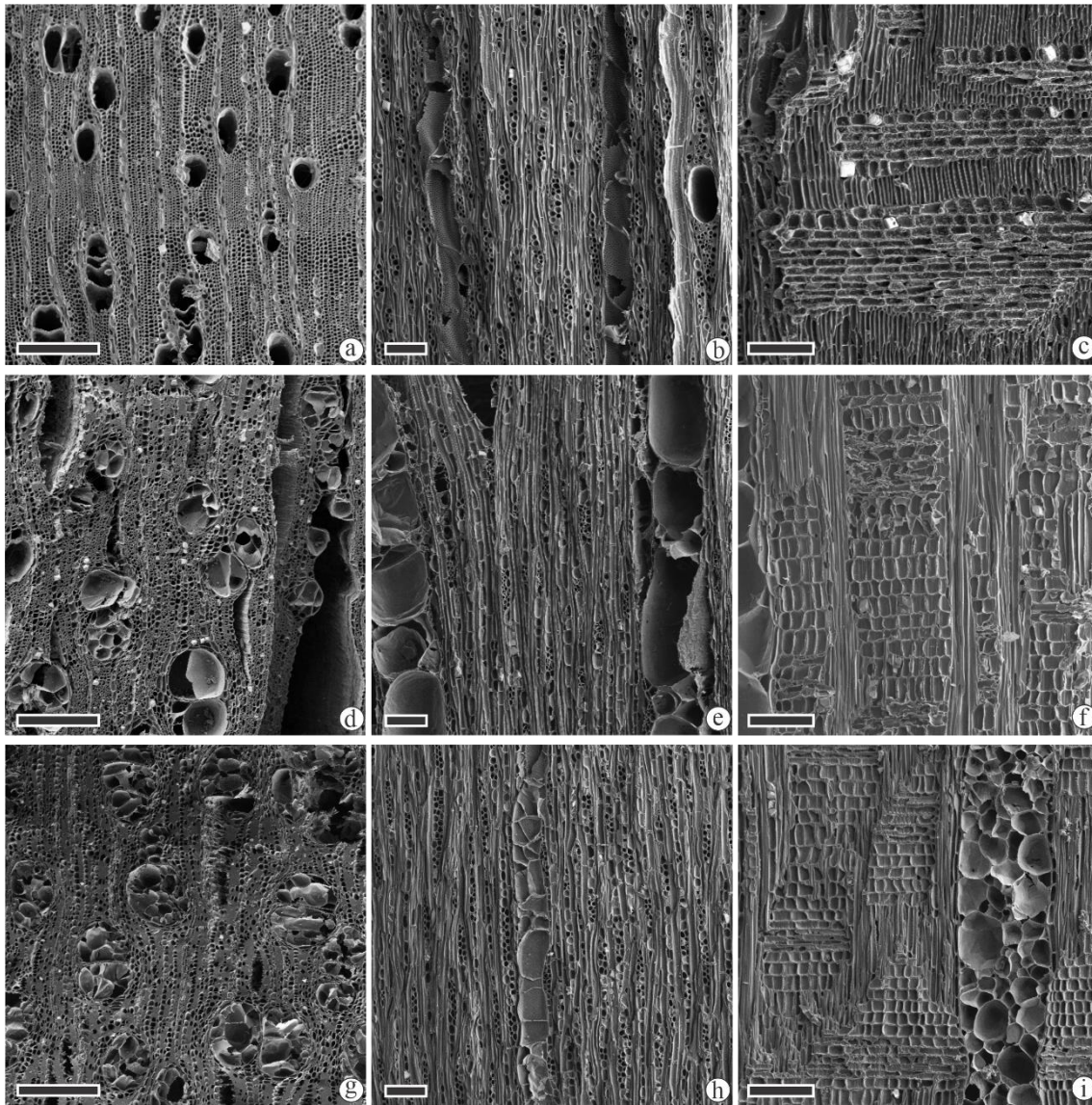
*Lecythis pisonis* Cambess (Figs 3a, 5a, 9a, b, c, 14a, b, c)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (e), 3, 16<sup>+</sup>, 17\*, 21, 24, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 59\*, 60\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 24<sup>+</sup>, 25\*, 33, 42, 46<sup>+</sup> 47\*, 53\*, 56, 61, 66, 70, 72\*, 86, 87, 93, 97, 106, 115, 135\*, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194, 196\*, 197\*.

**Fig. 11.** SEM charcoal micrographs. (a-c) *Protium altissimum*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Caryocar glabrum*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Caryocar villosum*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).





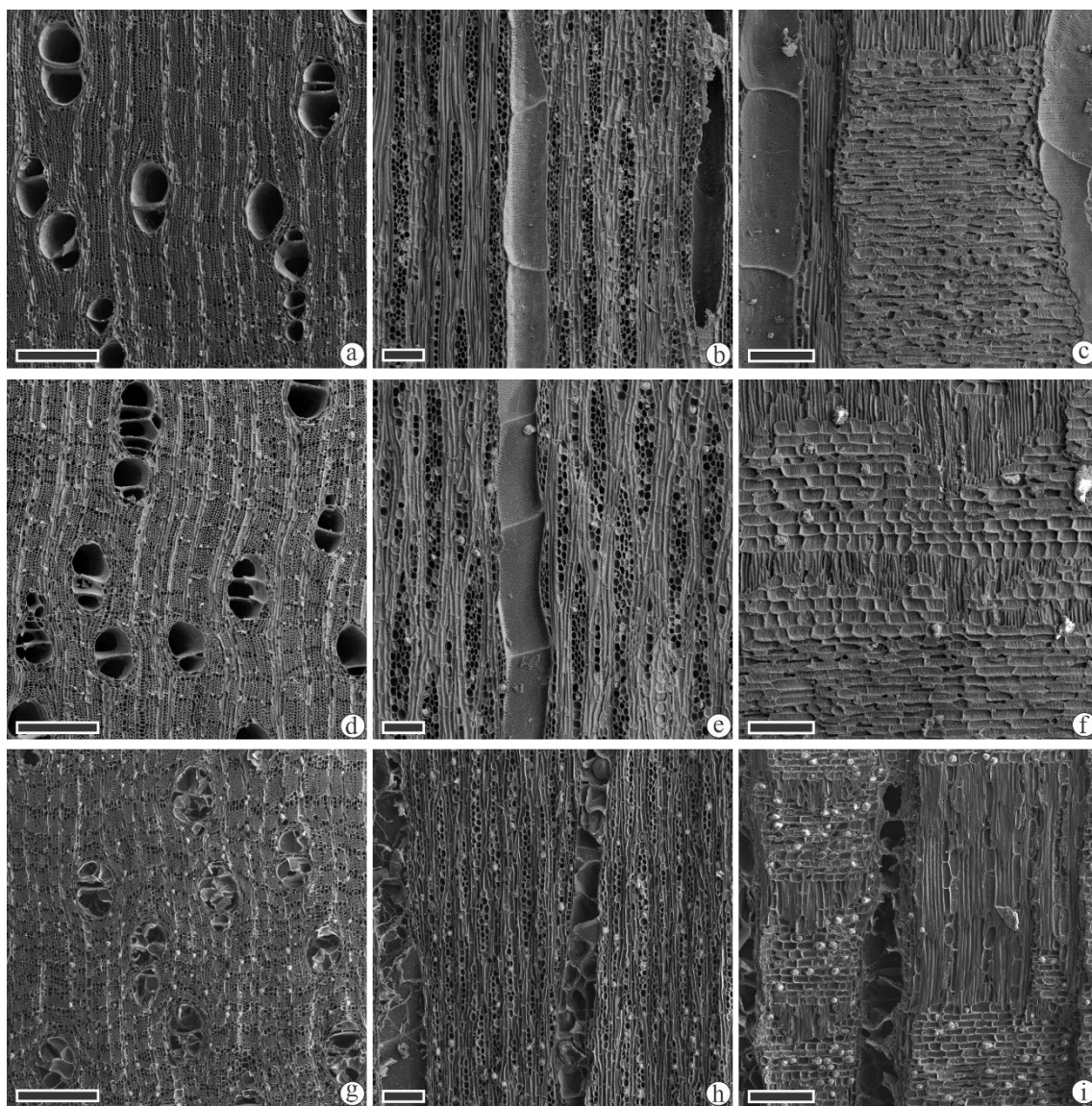
***Lecythis lurida* (Miers) S.A.Mori** (Figs 3b, 5b, 9d, e, f, 14 d, e, f)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (e), 3, 17\*, 18<sup>+</sup>, 20, 24, 35 (majority narrow), 39, 42 (band), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 59, 60\*, 65 (high > 0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 41<sup>+</sup>, 42\*, 47\*, 48<sup>+</sup>, 53\*, 56, 61, 66, 70, 72\*, 86, 87, 93, 97, 106, 115, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194<sup>+</sup>, 195\*, 196\*, 197\*.



**Fig. 12.** SEM charcoal micrographs. (a-c) *Licania canescens*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Parinari rodolphii*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Goupia glabra*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).



*Dinizia excelsa* Ducke (Figs 3c, 5c, 9g, h, i, 15g, h, i)

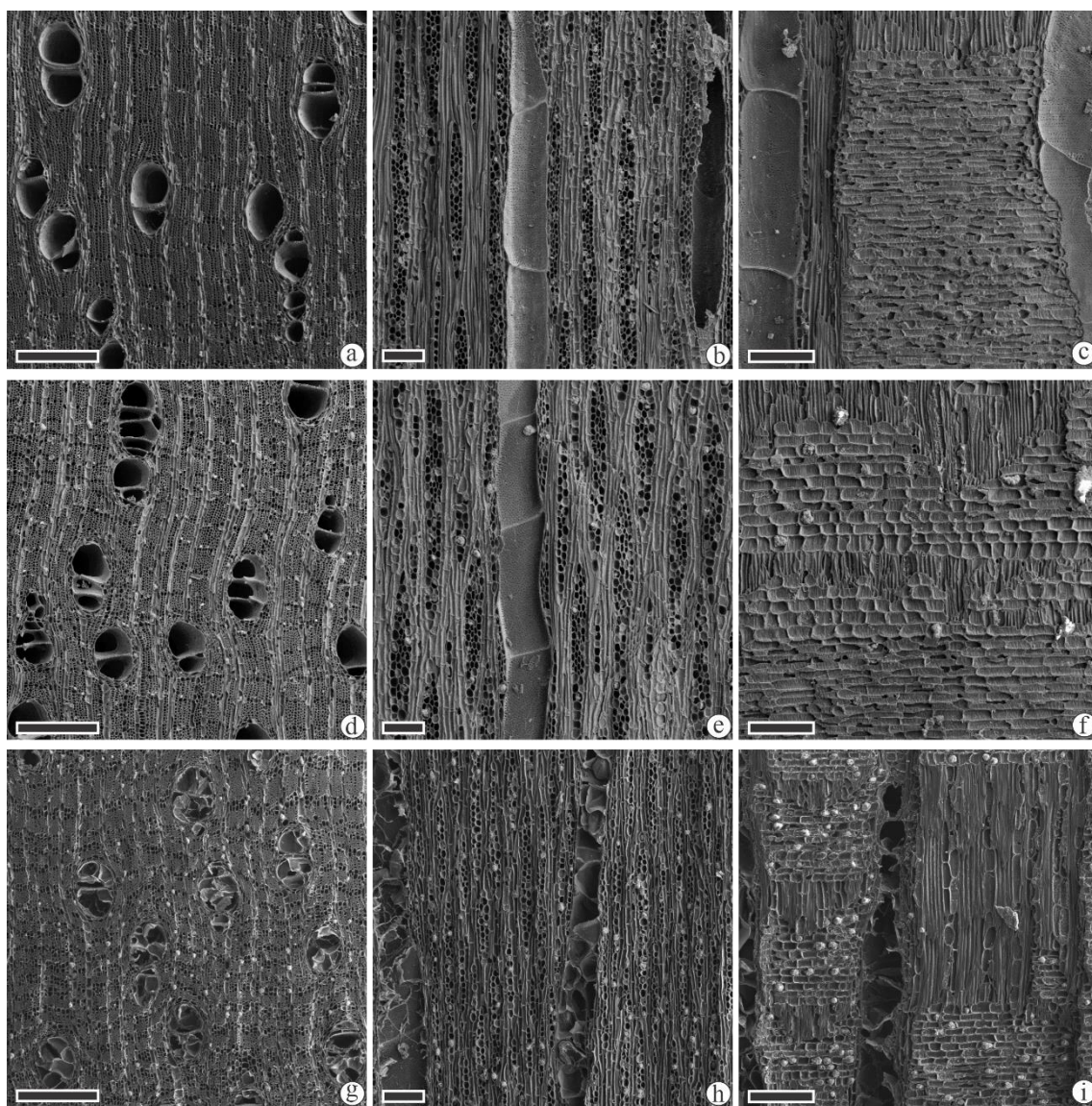
Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 16\*, 17<sup>+</sup>, 21, 25\*, 26\*, 32, 34, 38, 42 (aliform-losangular), 43 (not visible), 44 (not visible), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm),



61\*, 65 (high > 0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (distinct and disagreeable (fetid))\* , 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 42, 46\*, 47<sup>+</sup>, 53\*, 61, 66, 70, 72\*, 80, 81, 83, 93, 98, 104, 115, 136, 142, 183, 186, 189, 194<sup>+</sup>, 195\*, 198\*.

**Fig. 13.** SEM charcoal micrographs. (a-c) *Couratari guianensis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Couratari oblongifolia*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Eschweilera grandiflora*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu$ m (a,d,g); 100  $\mu$ m (b, c, e, f, h, i).



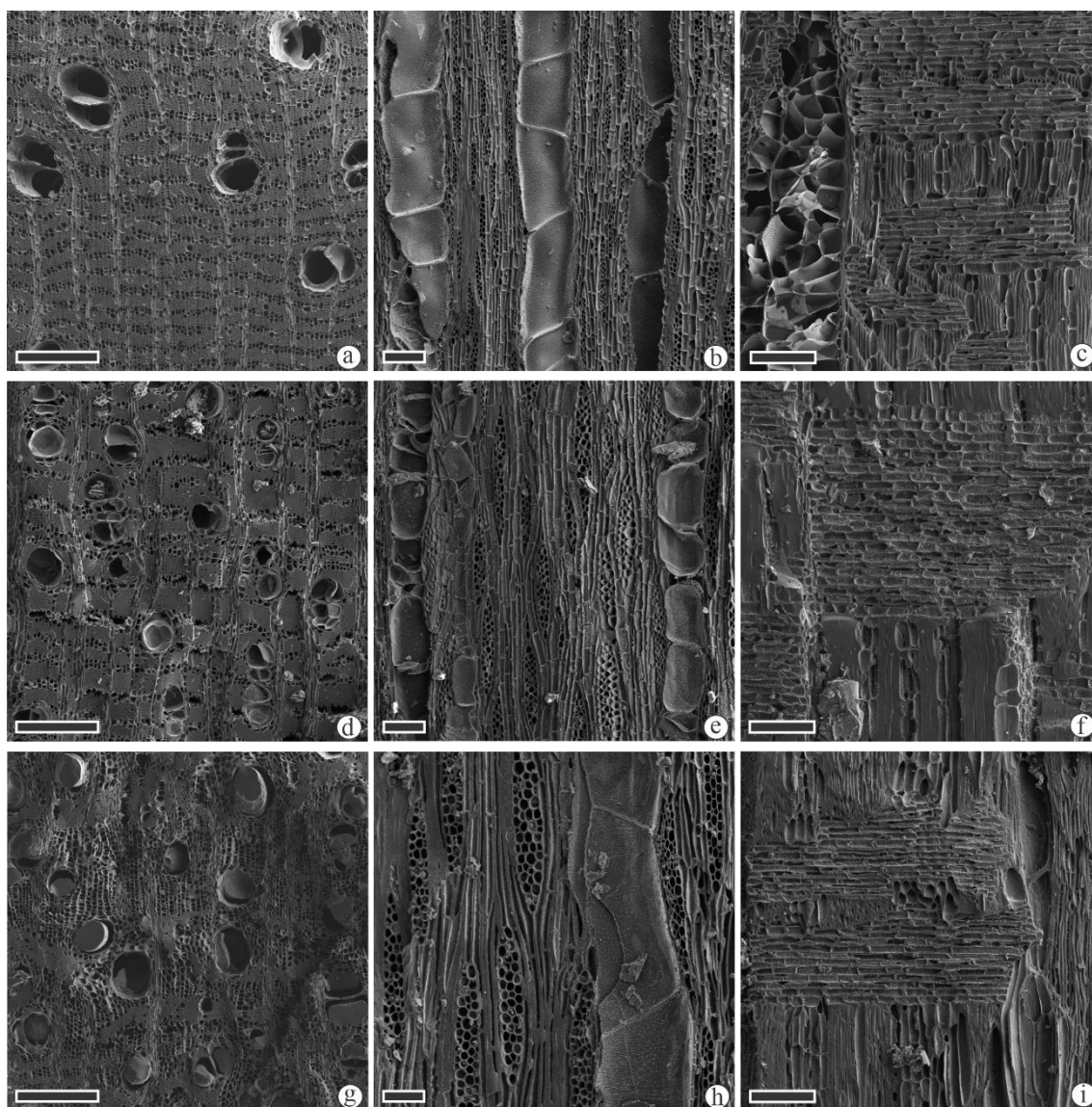
*Pseudopiptadenia suaveolens* (Miq.) J.W.Grimes (Figs 3d, 5d, 10a, b, c, 15a, b, c)



Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (a), 3, 17\*, 18<sup>+</sup>, 20, 31, 32, 42 (vasicentric), 43 (visible rays), 44 (visible rays), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 1, 5, 13, 22, 23, 24, 29, 30, 41<sup>+</sup>, 42\*, 47\*, 48<sup>+</sup>, 52\*, 58, 63, 66, 69, 71\*, 79, 80, 81, 84, 92, 96, 104, 115, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194, 200\*.

**Fig. 14.** SEM charcoal micrographs. (a-c) *Lecythis pisonis*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section (LRS). (d-f) *Lecythis lurida*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Dinizia excelsa*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).



***Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach.** (Figs 3e, 5e, 10d, e, f, 15d, e, f)

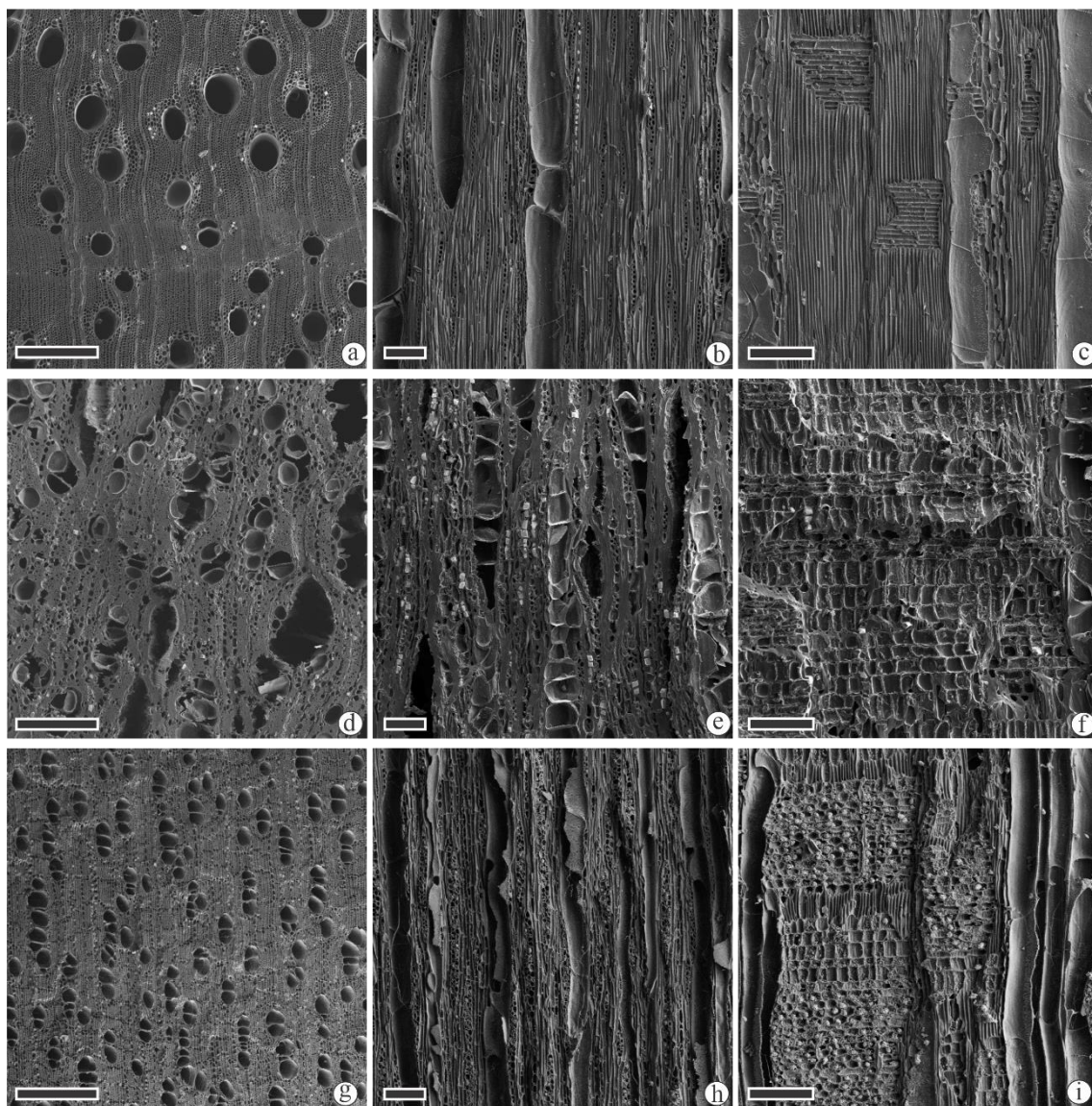
Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 10, 18, 19<sup>+</sup>, 20\*, 24, 35 (majority narrow)\*, 43 (visible rays), 44 (visible rays), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 61\*, 65 (high > 0.75 g/cm<sup>3</sup>)\* (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>)<sup>+</sup>, 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 7, 13, 22, 23, 24, 31, 41, 48, 53\*, 56, 61, 66, 70, 72\*, 86, 93, 97, 107, 115, 136, 142, 183, 186, 189, 192, 194<sup>+</sup>, 195\*, 198\*.

**Fig. 15.** SEM charcoal micrographs (a-c) *Pseudopiptadenia suaveolens*. (a) Transversal section (TS); (b) Longitudinal tangential section (LTS); (c) Longitudinal radial section



(LRS). (d-f) *Manilkara elata*. (d) TS; (e) LTS; (f) LRS. (g-i) *Pouteria oblanceolata*. (g) TS; (h) LTS; (i) LRS. Scale bars: 200  $\mu\text{m}$  (a,d,g); 100  $\mu\text{m}$  (b, c, e, f, h, i).



***Pouteria oblanceolata* Pires** (Figs 3f, 10g, h, i, 15g, h, i)

Macroscopic code (wood and charcoal): 1 (absent), 3, 18, 19, 24, 35 (majority narrow), 43 (visible rays), 44 (visible rays), 48 (< 5 mm), 49 (5–12/mm), 63\*, 65 (mean 0.40–0.75 g/cm<sup>3</sup>), 66 (absent)\*, 68, 90, 93.

Microscopic code (wood and charcoal): 2, 5, 13, 22, 23, 24, 30, 41, 49, 53\*, 56, 61, 66, 69, 71\*, 86, 92, 97, 107, 115, 136, 137, 159, 160, 183, 186, 189, 194\*, 200\*

## DISCUSSION

The anatomical characteristics of wood after carbonization of the studied species remained well-preserved, especially for the qualitative descriptions, which, for the wood and charcoal, were mostly in agreement with those found in the databases from the website Inside Wood, Coradin *et al.* 2010, and the generic and specialized literature for different species, for example, *Protium altissimum* (Webber 1941; Miller & Détienne 2001, Ferreira *et al.* 2021), *Caryocar glabrum* (Detienne & Jacquet 1983; Nisgoski *et al.* 1998; Lopes *et al.* 2019), *Caryocar villosum* (Détienne & Jacquet 1983; Nisgoski *et al.* 1998; Lopes *et al.* 2019; Braga Júnior *et al.* 2020), *Parinari rodolphii* (Détienne & Jacquet 1983; Miller & Détienne 2001), for charcoal (Braga Júnior *et al.* 2021a), *Goupia glabra* (Détienne & Jacquet 1983; Miller & Détienne 2001; Nascimento *et al.* 2016; Lopes *et al.* 2019), for charcoal (Braga Júnior *et al.* 2021a), *Couratari guianensis* (Détienne & Jacquet 1983; Miller & Détienne 2001; Lens *et al.* 2007; Bernal *et al.* 2011; Moya *et al.* 2013; Santos *et al.* 2020), *Couratari oblogifolia* (Détienne & Jacquet 1983; Bernal *et al.* 2011; Santos *et al.* 2020), *Eschweilera grandiflora* (Moutinho *et al.* 2012), *Lecythis pisonis* (Détienne & Jacquet 1983; Nascimento *et al.* 2016; Lopes *et al.* 2019; Silva *et al.* 2022); *Lecythis lurida* (Détienne & Jacquet 1983; Lens *et al.* 2007; Nascimento *et al.* 2016), *Pseudopiptadenia suaveolens* (Détienne & Jacquet 1983); *Dinizia excelsa* (Détienne & Jacquet 1983; Ferreira *et al.* 2004; Evans *et al.* 2006; Nascimento *et al.* 2016; Lopes *et al.* 2019; Braga Júnior *et al.* 2020), for charcoal (Braga Júnior *et al.* 2021a), *Manilka elata* (Détienne & Jacquet 1983; Muñiz *et al.* 2012); for charcoal (Muñiz *et al.* 2012).

Species that had not been previously described in the literature were *Licania canescens* and *Pouteria oblanceolata*, and these were compared with the descriptions for their respective genera in the Inside Wood database (2004 to present).

When comparing the anatomy of wood from *Licania canescens* there were similar diagnostic characteristics between species in the genus, such as the type of axial parenchyma, vessels that are exclusively solitary, two distinct diameter classes, and the presence of abundant silica bodies in ray cells (Prance 1972; Détienne & Jacquet 1983; Miller & Détienne 2001; Lopes *et al.* 2019). For *Pouteria oblanceolata*, the diagnostic characteristics that were similar between species were the type of axial parenchyma, ray cell composition, and the presence of abundant silica bodies in ray cells (Détienne & Jacquet 1983; Miller & Détienne 2001).

Among the described species, certain qualitative characteristics were different from those found in the Inside Wood database (2004 to present). These characteristics included the absence of an indistinct growth layer (*Protium altissimum*), vascular tracheids (*Goupia glabra*), diffuse axial parenchyma, in aggregate and in bands with more than three cells in width (*Lecythis lurida*), silica in ray cells (*Lecythis pisonis*), presence of an indistinct growth layer (*Pseudopiptadenia suaveolens*) vascular tracheids and reticulated parenchyma (*Manilkara elata*), gums and other deposits in the microscopic analysis of wood, vestured pits and marginal or apparently marginal parenchyma (*Dinizia exelsa*), exclusively uniseriate rays, and common tylose (*Parinari rodolphii*). It is important to emphasize that *P. suaveolens* and *M. elata* are respectively described with the scientific names *Piptadenia suaveolens* and *Manilkara huberi*.

Certain differences between species for anatomy of wood and charcoal, such as growth rings and tyloses, for example, could not be considered as primary diagnostic tools because variation could be due to a series of factors including differences in environmental variables (Alves & Angyalossy-Alfonso 2000; Wheeler *et al.*, 2007, 2020). Gums and other deposits can be seen with much more clarity by examining the wood using a magnifying glass since the technique of cutting and mounting a sample can

remove some deposits (IAWA Committee 1989 p.261), which occurred with *Dinizia exelsa*, which, for the macroscopic analysis of wood and the microscopic evaluation of charcoal, were abundant. Other divergent characteristics were found for specific characteristics such as axial parenchyma in *Lecythis lurida*. However, wood is a biological material that is highly susceptible to variation, and furthermore, many descriptions are based on a limited number of samples or on just one specimen, which does not reflect the total variability inherent in a species (Wheeler *et al.* 2020).

For the quantitative analysis, the comparison of the frequency of vessels with the data from the literature showed that only *Protium altissimum* had different values for wood and charcoal (Webber 1941; Miller & Détienne 2001). For *L. lurida* and *Pseudopiptadenia suaveolens* charcoal values could not be compared with those from wood (Lens *et al.* 2007; Inside Wood (2004 to present). With respect to vessel diameter, in 70% of the species in this study, the values were similar for wood and charcoal. In the current study, as well as in Braga Júnior *et al.* (2021b), it was observed that, despite morphometric alterations in charcoal anatomy, which was expected as a result of carbonization, (Prior & Gasson 1993; Kim & Hanna 2006; Gonçalves *et al.* 2012; Perdigão *et al.* 2020), most qualitative and quantitative parameters were similar for wood and charcoal. The quantitative variation of the cells did not follow a general pattern due to the carbonization process, which is affected by factors such as size of the vessels, proportions of axial and radial parenchyma, and the humidity content of the wood at the moment of carbonization. These observations agree with those from Prior and Alvin (1983), Gonçalves *et al.* (2012), Perdigão *et al.* (2020) and Braga Júnior *et al.* (2021b). Furthermore, interspecific variability or ecological factors can contribute to this variation, as suggested by Gonçalves and Scheel-Ybert (2016) and Wheeler *et al.* (2020).

A few important characteristics were easily observed in the macroscopic analysis of wood, such as the type of axial parenchyma, scalariform perforation plates (*Goupia glabra*) and vessel grouping. For the macroscopic analysis of charcoal, these aforementioned characteristics were not as easily observed. However, the frequency of abundant vessels in *Pouteria oblanceolata*, vessel diameter in *Caryocar villosum*, vessel grouping in *Parinari rodolphii* and *G. glabra*, as well as axial parenchyma for *Couratari guianensis*, *Couratari oblangifolia* and *Pseudopiptadenia suaveolens*, were easily observed. It is important to emphasize that characteristics such as frequency and diameter vessels should be very carefully examined, because they can lead to a false identification of charcoal when they are examined isolated from other characteristics because during carbonization, vessel walls can crack and rupture (Perdigão *et al.* 2020; Braga Júnior *et al.* 2021a), thus masking the true value of vessel counts. Macroscopically, it was not possible to observe charcoal anatomical structures for *Manilkara elata*, and this same result was observed by Muñiz *et al.* 2012, demonstrating that cracks in the direction of rays completely modify the arrangement of rays, pores, and parenchyma.

When analyzing the vitrification of the studied species, it was noted that for most individuals, this phenomenon facilitated macroscopic observations, principally for the axial parenchyma for *Licania canescens* and *Parinari rodolphii*. The term vitrified originates from Latin, meaning turn to glass, and is commonly used to describe substances that acquire a glassy appearance when exposed to elevated temperatures. In the case of charcoal, the cellular components are fused inside the wood, resulting in homogenization of the cell walls, especially the fibers, which results in contrasting colors of white and tones of grey (Marguerie & Hunot 2007; McParland *et al.* 2010; Braga Júnior *et al.* 2021b). Gonçalves *et al.* (2016) emphasized that, if charcoal presents a high degree of vitrification, the cellular elements will fuse, resulting in a homogeneous and

unrecognizable mass. In the current study, it is believed that this occurred for *D. exelsa*, in which, for most of its transversal section, it was not possible to visualize rays, pores or parenchyma.

Characteristics such as vessel grouping, perforation plates, axial parenchyma, vascular-ray pits, ray cell composition, exclusively uniseriate rays, vestured pits, and radial canals, were defined as primary diagnostic characteristics for species identification (Table 2). Through macroscopic and microscopic images of wood, and macroscopy and SEM for transversal sections of charcoal, exclusively solitary vessel groupings (*Licania canescens*, *Parinari rodolphii*), axial parenchyma (*Couratari guianensis*, *Couratari oblangifolia* and *Eschweilera grandiflora*) and scalariform perforation plates (*Goupia glabra*), were used to easily identify anatomic differences between species. These characteristics could aid in the process of monitoring wood during analysis and diagnosis activities in the field because they are visible using a portable magnifying glass, which would enable separation at the family level and verification of the Forest Origin Document (DOF) (Gonçalves *et al.* 2016; Brandes *et al.* 2020; Braga Júnior *et al.* 2021a).

Some types of axial parenchyma were more difficult to see in the charcoal than in the wood, such as parenchymal bands for *Manilkara elata*, paratracheal presence absent or extremely rare (*Protium altissimum*), and diffuse and diffuse in aggregate (*Caryocar glabrum*, *Caryocar villosum* and *Goupia glabra*). Wheeler *et al.* (2020), reported that the absence of parenchyma is a good diagnostic resource. However, despite this difficulty, it was possible to identify these in the SEM images. On the other hand, Gonçalves *et al.* (2016) and Braga Júnior *et al.* (2021a) reported that macroscopic observation using a portable magnifying glass is not possible. With respect to *M. elata*, the carbonization process resulted in cracks in the direction of rays, which complicated identification of the axial parenchyma and the visualization of rays in the tangential section.



Other parenchymal patterns were easily seen, macroscopically for both wood and charcoal, for example, parenchymal bands in *Licania canescens*, *Parinari rodolphii*, *Couratari guianensis*, *Couratari oblongifolia*, *E. grandiflora*, *Lecythis pisonis*, *Lecythis lurida* and *Pouteria oblanceolata*, aliform, aliform, lozangular and confluent (*Dinizia excelsa*), vasicentric (*Pseudopiptadenia suaveolens*), ray cell composition. For the microscopic analysis, easily visualized patterns were exclusively uniseriate rays (*Licania canescens*, *P. suaveolens*), vessels with two diameter classes (*L. canescens*, *P. rodolphii*), radial canals (*Protium altissimum*), tyloses, vessel deposits, and mineral inclusions.

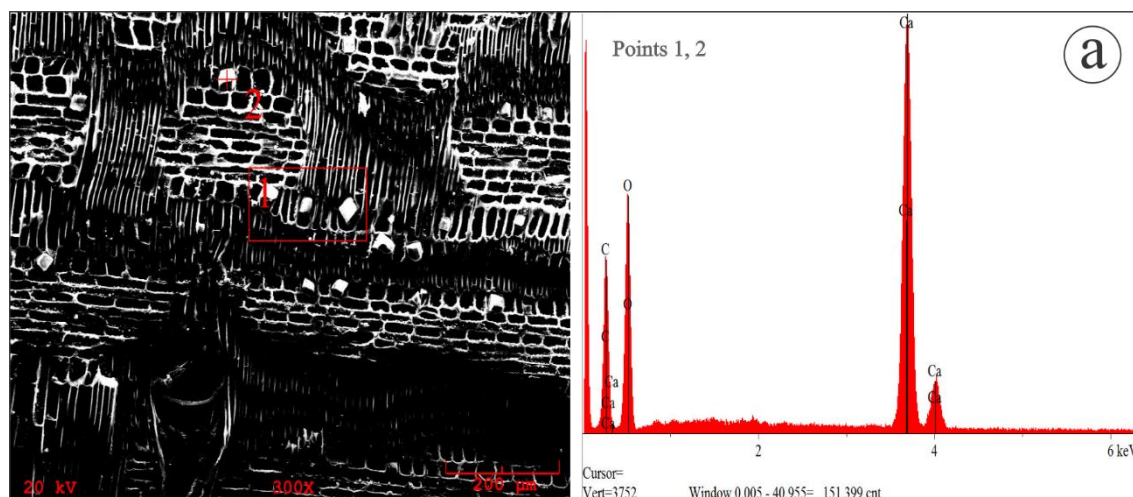
Vestured pits, observed in *P. suaveolens*, are a useful characteristic to distinguish families. This characteristic is observed in most Leguminosae and is highly diagnostic. Despite not being found in *D. excelsa*, a species from this family, Wheeler *et al.* (2020), reported that in some cases, the pits are miniscule, which complicates visualization using a light microscope; the authors reported that it is important to analyze this parameter using SEM. However, in the current study, these pits were not visible using a SEM.

Item 135 of the IAWA Committee (1989 p. 308), refers to “other cambial variations”, and this was identified in the microscopic analysis of wood from *L. pisonis*, *P. altissimum* and *P. suaveolens*. In the studies by Cosmo *et al.* (2010) and Mota *et al.* (2017), structures like those found in the current study were described as medullary spots and stains. These authors explained that the stains on the wood are composed of irregularly formed parenchymal cells and walls with widely varying thicknesses. These are formed in response to damage caused to the cambium due to biotic and abiotic factors. For example, water stress can lead to the formation of medullary spots. For the species examined in the current study, as well as in the studies by Cosmo *et al.* (2010) and Mota *et al.* (2017), these spots occurred in areas near the latewood, suggesting that the cause of this damage occurred during the dry season.

Species of Lecythidaceae were the most represented species in this study. Wood from this family is widely commercialized and exported due to its good physical and mechanical properties and good workability. *Couratari guianensis*, *C. oblongifolia*, and *E. grandiflora*, normally are referred to as “tauari”, and identification of these in the field is notoriously difficult due to the similarities between the species. Characteristics that could aid in diagnosing these at the genus level are axial parenchymal bands of up to three cells in width, reticulate form, simple perforation plates, and abundant presence of silica in the ray cells (Lens *et al.* 2007; Bernal *et al.* 2011).

All the studied species presented mineral inclusions. Using the SEM, these were highly visible and observable in different types of cells and classifications, such as prismatic crystal in ray cells (*P. altissimum*), parenchymal cells (*C.guianensis*), and silica bodies in ray cells (*P. rodolphii*) (Figs. 16, 17 and 18).

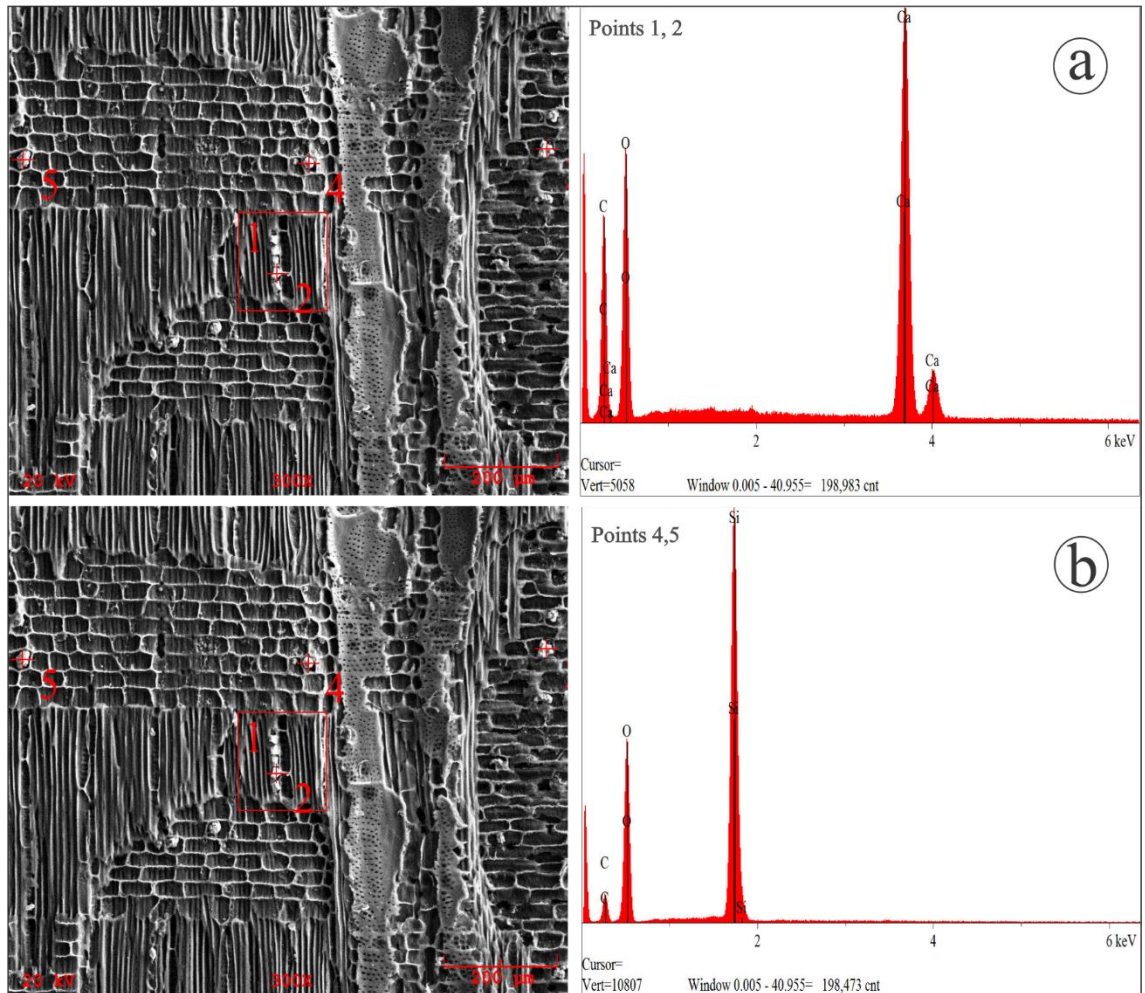
**Fig. 16.** Scanning electron microscopy and EDS graphs for *Protium altissimum*. a – crystals of calcium oxalate in ray cells, radial section.



The presence of mineral inclusions should be analyzed cautiously because these are affected by environmental factors and defense against herbivory (Franceschi & Nakata 2005).

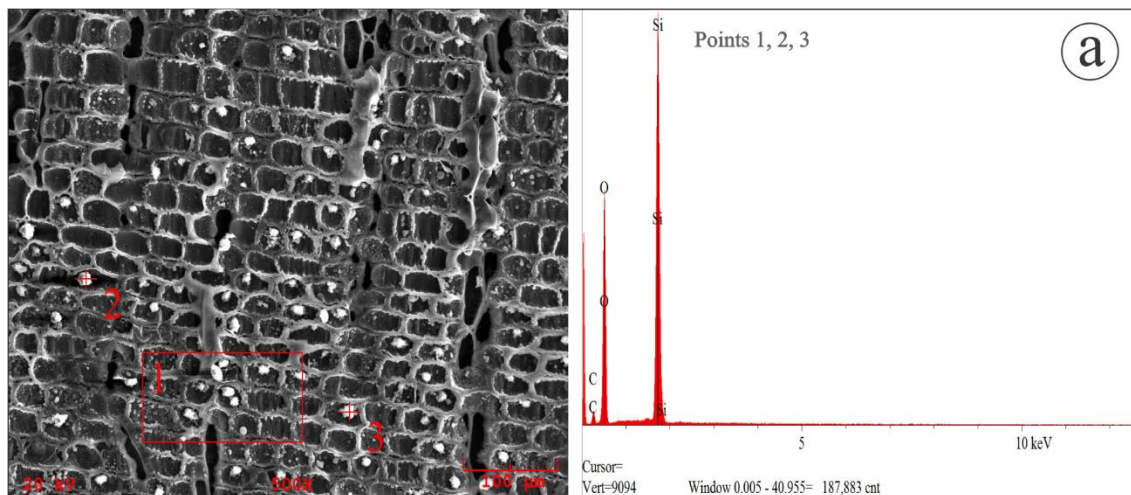
**Fig. 17.**

**Fig. 17.** Scanning electron microscopy and EDS graphs for *Couratari guianensis*. a – crystals of calcium oxalate in axial parenchymal cells, radial section. b – silica bodies in ray cells, radial section.



According to Bodin *et al.* (2019), crystals and silica should only be considered as diagnostic characteristics when they are highly abundant.

**Fig. 18.** Scanning electron microscopy and EDS graphs for *Parinari rodolphii*. a – silica bodies in ray cells, radial section.



## CONCLUSION

Macroscopic and microscopic descriptions of wood and charcoal can be useful to government agencies. Diagnostic characteristics such as vessel groupings, type of axial parenchyma, and in some cases, perforation plates and exclusively uniseriate rays are fundamental to the identification of illegally commercialized wood and charcoal. After carbonization, the qualitative structures of wood were better preserved, except for the macroscopic analysis for *M. elata*, for which ruptures in the direction of the rays prevented observation of the radial arrangement, pores, and parenchyma; even through the use of SEM images, these structures were difficult to distinguish.

Although this study does not offer a definitive solution to the challenge of monitoring the illegal marketing of wood and charcoal in the Brazilian Amazon, it will provide a measure of aid in conducting these activities and will contribute to a database and reference collections that are available for research, training, and for consultation by forestry professionals, anatomists, and anthracologists of wood and charcoal.

## Acknowledgements

We thank the State University of Pará (UEPA), Brazil, campi at Belém, Paragominas and Marabá. We also thank the Foundation for the Support of Research of the State of Pará

(FAPESPA), for the scholarships, and the Brazilian Agricultural Research Company (EMBRAPA) for support in the identification of wood samples, and more specifically, the technician Marta Cesar Freire Silva for help with setting up the histological slides. We are also grateful to the Microanalysis Laboratory of the Geosciences Institute of the Federal University of Pará (UFPA), Brazil, and specifically the technician Ana Paula Corrêa for help in generating the SEM images. We thank the Emílio Goeldi Museum Research Campus, the Keilla group for providing the wood samples used in this study, and the Banco da Amazônia for funding the project BASA/UFRA n°2018/193 which allowed us to conduct fieldwork and sample collection and to transport material to the research institutions.

#### REFERENCES

- Alves ES, Angyalossy-Alfonso V. 2000. Tendências Ecológicas na Anatomia da Madeira de Algumas Espécies Brasileiras. 1. Anéis de Crescimento e Vasos. *IAWA Journal*. 21, 3-30. DOI:[10.1163/22941932-90000233](https://doi.org/10.1163/22941932-90000233).
- Bernal RA, Coradin V, Carmargos J, Costa C, Pissarra J. 2011. Wood anatomy of Lecythidaceae species called “Tauari”. *IAWA Journal*, 32: 97-112. DOI: [10.1163/22941932-90000046](https://doi.org/10.1163/22941932-90000046).
- Bodin SC, Scheel-Ybert R, Beauchêne J, Molino J, Bremond L. 2019. CharKey: An electronic identification key for wood charcoals of French Guiana. *IAWA Journal*, 40:75-S20. DOI:[10.1163/22941932-40190227](https://doi.org/10.1163/22941932-40190227).
- Braga Júnior MM, Souza FIB, Melo LEL. 2021a. Forestry control in the Brazilian Amazon II: charcoal anatomy of 21 species. *IAWA Journal*. 42: 299-321. DOI: [10.1163/22941932-bja10058](https://doi.org/10.1163/22941932-bja10058).

- Braga Júnior MM, Matos TS, Andrade GM, Santos, LJ, Vieira ALM, Gonçalves, TAP, Nisgoski S, Motta JP, Melo LEL. 2021b. Forestry control in the Brazilian Amazon: charcoal anatomy of tree species from protected areas. *Australian Journal of Botany*. 70:13-31. DOI: 10.1071/BT21062
- Braga Júnior MM, Matos TS, Andrade GM, Ferreira PS, Silva, MCF, Souza FIB, Melo LEL. 2020. Technological Properties of wood used in boat's production in the Southeast of Pará, Brazil. *Rodriguésia*, 71: 2-14. DOI:[10.1590/2175-7860202071083](https://doi.org/10.1590/2175-7860202071083).
- Brandes AFN, Novello BQ, de Lemos DN, do Nascimento LB, Albuquerque RP, Tamaio N, Barros CF. 2020. Wood anatomy of endangered Brazilian tree species. *IAWA J*. 41: 510–576. DOI: 10.1163/22941932-bja1003
- Carvalho WD, Mustin K, Hilário RR, Vasconcelos IM, Eilers V, Fearnside PM. 2019. Deforestation control in the Brazilian Amazon: a conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. *Perspect. Ecol. Conserv*. 17: 122–130. DOI: 10.1016/j.pecon.2019.06.002.
- Corandin VPR, Camargo JAA, Pastore TCM, Cristo AG. 2010. Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília.
- Cosmo NL, Kuniyoshi YS, Botosso P C. 2010. Anatomia da madeira de *Sebastiania commersoniana* (Baillon) Smith & Downs (Euphorbiaceae): aspectos funcionais e ecológicos. *Acta Botanica Brasilica*. 24: 747–755. DOI: 10.1590/S0102-33062010000300018.

- Détienne P, Jacquet P. 1983. Atlas d'identification des bois de l' Amazonie et regions voisines. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.
- do Nascimento LB, Brandes AFN, Valente FDW, Tamaio N. Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Braz. J. Bot.* 40: 291–329. DOI: [10.1007/s40415-016-0324-5](https://doi.org/10.1007/s40415-016-0324-5).
- Dormontt EE, Boner M, Braun B, Breulmann G, Degen B, Espinoza E, Gardner S, Guillery P, Hermanson JC, Koch G, Lee SL, Kanashiro M, Rimbawanto A, Thomas D, Wiedenhoeft AC, Yin Y, Zahnen J, Lowe AJ. 2015. Forensic timber identification: it's time to integrate disciplines to combat illegal logging. *Biol. Conserv.* 191: 790–798. DOI: [10.1016/j.biocon.2015.06](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06).
- Evans, J A, Gasson, P E, Lewis, G P. Wood anatomy of the Mimosideae (Leguminosae). 2006. *Iawa Journal*, Supplement.
- Fearnside PM. 2017. Deforestation of the Brazilian Amazon. In: Schugart H (Org.). Oxford research encyclopedia of environmental science, 1st Edn. Oxford University Press, New York, NY.
- Ferrante L, Andrade MBT, Fearnside PM. 2021. Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation. *Land Use Policy.* 108: 1-9. DOI: [10.1016/j.landusepol.2021.105559](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105559).
- Ferreira GC, Gomes JI, Hopkins MJG. 2004. Estudo anatômico das espécies de leguminosae comercializadas no Estado do Pará como "angelim". *Acta Amazonica.* 34: 387-398.

- Franklin, G. L. 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood – resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature*.155: 51.
- Gasson P, Cartwright C, Dias Leme CL. 2017. Anatomical changes to the wood of *Croton sonderianus* (Euphorbiaceae) when charred at different temperatures. *IAWA Journal*. 38: 117–123. DOI: 10.1163/22941932-20170161.
- Gonçalves TAP, Scheel-Ybert R. 2016. Charcoal anatomy of Brazilian species. I. Anacardiaceae. *An. Acad. Bras. Cienc.* 88: 1711–1725. DOI: 10.1590/0001-3765201620150433.
- Gonçalves TAP, Marcatti CR, Scheel-Ybert R. 2012. The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum*, and *Pouteria torta* from the Brazilian Cerrado. *IAWA J.* 33: 73–90. DOI: 10.1163/22941932-90000081.
- Gonçalves TAP, Sonsin-Oliveira J, Nigoski S, Marcatti CR, Ballarin AW, Muñoz GIB. 2018. A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil III: microscopic identification of 10 Cerrado species. *Aust. J. Bot.* 66: 255–264. DOI: 10.1071/BT17196.
- Haag V, Zemke VT, Lewandrowski T, Zahnen J, Hirschberger P, Bick U, Koch G. 2020. The European charcoal trade. *IAWA J.* 41: 463–477. DOI: 10.1163/22941932-bja10017.
- IAWA Committee. 1989. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bull.* n.s. 10: 219–332. DOI: 10.1163/22941932-90000496.



InsideWood. 2004-onwards. Available online at <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search> (accessed 10 May 2023).

INTERPOL. 2015. Environmental Crime and its Convergence with other Serious Crimes .Environmental Security.

Johansen DA. 1940. Plant microtechnique. McGraw-Hill, New York, NY.

Kim NH, Hanna RB. 2006. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at 25 different temperatures. *Wood Sci. Technol.* 40: 392–401. DOI: 10.1007/s00226-005-0062-5.

Koch G, Haag V, Heinz I, Richter HG, Schmitt U. 2015. Control of internationally traded timber — the role of macroscopic and microscopic wood identification against illegal logging. *J. Forensic Res.* 6: 1–4. DOI: 10.4172/2157-7145.1000317

Lens F, Baas P, Jansen S, Smets E. 2007. A search for phylogenetically informative wood characters within *Lecythidaceae* s.l. *Am. J. Bot.* 94: 483–502. DOI: 10.3732/ajb.94.4.483.

Lima MDG, Simetti R, Assis MR, Trugilho PF, Carneiro ACO, Bufalino L, Hein PRG, Protásio TP. 2020. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. *Biomass and Bioenergy.* 142: 1-18. DOI: 0.1016/j.biombioe.2020.105804.

Lima MDG, Ramalho FMG, Trugilho PF, Bufalino L, Dias Júnior AF, Protásio TP, Hein PRG. 2022. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy.* 193: 584-594. DOI: 10.1016/j.renene.2022.05.048.

- Lopes OP, Carvalho AG, Zanuncio AJV, Alves MM, Macedo EG. 2019. Wood species used in craft boats in Pará state – Brazil. *Rev. Inst. Flor.* 31: 119-129. 2019. DOI: [10.24278/2178-5031.201931203](https://doi.org/10.24278/2178-5031.201931203).
- Lowe AJ, Dormontt EE, Bowie MJ, Degen B, Gardner S, Thomas D, Clarke C, Rimbawanto A, Wiedenhoeft A, Yin Y, Sasaki N. 2016. Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. *Bioscience* 66: 990–998. DOI: [10.1093/biosci/biw129](https://doi.org/10.1093/biosci/biw129)
- Marguerie D, Hunot, J-Y. 2007. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. *Journal of Archaeological Science.* 34: 1417-1433. DOI: [10.1016/j.jas.2006.10.032](https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.10.032).
- Martinelli G, Moraes MA. Livro Vermelho da Flora do Brasil. 1 ed. Rio de Janeiro. Instituto de pesquisa: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.
- McParland LC, Collinson ME, Scott AC, Campbell G, Veal R. 2010. Is vitrification in charcoal a result of high temperature burning of wood? *J. Archaeol. Sci.* 37: 2679–2687. DOI: [10.1016/j.jas.2010.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.006).
- Miller, Regis B. e Pierre Détienne. Major Timber Trees of Guyana. Wood Anatomy. Tropenbos International, Wageningen, the Netherlands. 2001.
- Moutinho VHP, Lima JT, Águiar JOR, Nogueira MGO. 2012. Scientific determination and wood anatomical features of species know in Brazilian Amazonia as maté-maté (*Eschweilera* spp.). *Rev. de Cie. Agr.* 55: 134-141. DOI [dx.doi.org10.4322/rca.2012.044](https://doi.org/10.4322/rca.2012.044).

- Moya R, Wiemann MC, Olivares C. 2013. Identification of endangered or threatened Costa Rican tree species by wood anatomy and fluorescence activity. *Rev. Biol. Trop.* 61: 1133–1156.
- Mota GS, Melo, LEL, Ribeiro AO, Selvati AO, Pereira H, Mori FA. 2017. Ecologic features of wood anatomy of *Casearia sylvestris* SW (Salicaceae) in three Brazilian ecosystems. *Cerne*, 24: 445–453. DOI: 10.1590/01047760201723042387.
- Muñiz G I B, Nisgoski S, Shardosin FZ, França RF. 2012. Anatomia do carvão de espécies florestais. *Cerne* 18: 471–477. DOI: 10.1590/S0104- 77602012000300015.
- Nellemann C. 2012. Green Carbon, Black Trade: a Rapid Response Assessment on Illegal Logging, Tax Fraud and Laundering in the World's Tropical Forests, in A Rapid Response Assessment (United Nations Environment Programme, GRID-Arendal). Disponível online em [www.grida.no/publications/126](http://www.grida.no/publications/126)
- Nellemann C, Henriksen R, Pravettoni R, Stewart D, Kotsovou M, Schlingemann MAJ, Shaw M, Reitano T (Eds.). 2018. World atlas of illicit flows. A RHIPTO-INTERPOL-GI Assessment. RHIPTO — Norwegian Center for Global Analyses, INTERPOL and the Global Initiative Against Transnational Organized crime. Disponível online em [www.rhipto.or](http://www.rhipto.or) or [www.interpol.int](http://www.interpol.int).
- Nisgoski S, Muñiz, GIB de, & Klock, U.1998. Diferenciação anatômica da madeira de 4 espécies do gênero *Caryocar*. *Ciência e Natura*. 20. 85–100. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X26818>
- Nisgoski S, Muñiz GIB, França RM, Batista FRR. 2012. Anatomia do lenho carbonizado de *Copaifera cf. langsdorfii* Desf. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild. *Braz. J. Wood Sci.* 3: 66–79. DOI: 10.15210/cmadv3i2.4038.

- Noguerón R, Cheung, L. 2018. sourcing legally produced wood, A Guide for Businesses. World Resources Institute.
- Novaes TV, Ramalho FMG, Araujo ES, Lima MDR, Silva MG, Ferreira GC, Hein PRG. 2022. Discrimination of amazonian forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects. *European Journal of Wood and Wood Products*. 81: 159-172. DOI: 10.1007/s00107-022-01862-y.
- Oliveira RS, Silva LFF, Andrade FWC, Trugilho PF, Protásio TP, Goulart SL. 2019. Quality of charcoal marketed in southeast Pará for cooking foods. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 62: 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.3017>.
- Paula J E. 2003. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel. *Acta Amazônica*. 33: 243-262. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4392200332262>.
- Perdigão CRV, Braga Júnior MM, de Lemos DN, Gonçalves TAP, Araujo CS, Mori FA, Barbosa ACMC, de Souza FIB, Motta JP, Melo LEL. 2020. Forestry control in the Brazilian Amazon I: wood and charcoal anatomy of three endangered species. *IAWA J*. 41: 490–509. DOI: 10.1163/22941932-bja10016.
- Prance, Ghilleen T. 1972. *Flora Neotropica*. Chrysobalanaceae. 9: 1–409.
- Prior J, Gasson P. 1993. Anatomical changes on six African hardwoods. *IAWA J*. 14: 77–86. DOI: 10.1163/22941932-90000579. 5

- Reydon BP, Fernandes VB, Telles, TS. 2020. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. Elsevier. 94: 1-13 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104313>.
- Ruffinatto, F, Crivellaro, A, Wiedenhoeft, AC. 2015. Review of macroscopic features for hardwood and softwood identification and a proposal for a new character list. IAWA Journal. 36: 208-241. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-00000096>.
- Santos, J X., Vieira, H C., Silva, E L S., Muniz, G I B., Reis, A R S., Nisgoski, S. 2020. Anatomical characterization of wood marketed as “tauari” (Icycythidaceae) in Pará state, Brazil. *floresta.floresta*. 50(3). 1421 - 1429. DOI: 10.5380/rev.v50 i3. 59399.
- Scarano FR, Silva J MC. 2018. Production and international trade: challenges for achieving targets 6 and 11 of the Global Strategy for Plant Conservation in Brazil. 69: 1577-1585. Doi: 10.1590/2175-7860201869408.
- Scheel-Ybert, Rita. (2016). Archaeobotany in South America: Landscape, diet, and use of plants in the past. *Cadernos do Lepaarq*. Vol. XIII. 25.
- Schmitt J, Scardua FP. 2015. A descentralização das competências ambientais e a fiscalização do desmatamento na Amazônia. *Rev. Adm. Pública*. 49: 1121–1142. DOI: 10.1590/0034-7612131456.
- Silva, R. C. da, Marchesan, R., Fonseca, M. R., Dias, A. C. C., Viana, L. C. 2018. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira, Brazilian Journal of Forestry Research*. 38: 2-10. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201801573

Silva, M S, Silva, L B, Santos, N C, Carvalho, E R, Silva, C R A, Silva, C C S, Leite, K R B. 2022. Timbers of Bahia wood anatomy of native species of the Atlantic Forest, Bahia.

Unodc - United Nations Office On Drugs And Crime. 2016. Best Practice Guide for Forensic Timber Identification. UNITED NATIONS New York.

Van Solinge, TB, Zuidema, P., Vlam, M., Cerutti, PO, Yemelin, V.. 2016. Crime Florestal Organizado: Uma Análise Criminológica com Sugestões da Perícia Forense de Madeira. Em Daniela Kleinschmit, Stephanie Mansourian, Christoph Wildburger, Andre Purret (eds.). Extração ilegal de madeira e comércio relacionado de madeira - Dimensões, motivadores, impactos e respostas: um relatório de avaliação de resposta científica global rápida: 81-96. IUFRO World Series No. 35. Viena, Áustria: União Internacional de Organizações de Pesquisa Florestal (IUFRO).

Villén-Pérez S, Anaya-Valenzuela L, Cruz DC, Fearnside PM. 2022. Mining threatens isolated indigenous peoples in the Brazilian Amazon, *Global Environmental Change*. 72: 1-26. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2021.102398](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102398).

Webber. Systematic Anatomy of the Woods of the - Burseraceae. VII, 1941.

Wheeler, EA, Baas, P., & Rodgers, S. (2007). Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the insidewood database *Insidewood*. *IAWA Journal*, 28:229-258. DOI: [10.1163/22941932-90001638](https://doi.org/10.1163/22941932-90001638).

Wheeler, EA, Gasson, PE e Baas, P. (2020). Using the InsideWood web site: Potentials and pitfalls, *IAWA Journal*, 41: 412-462. DOI: [10.1163/22941932-bja10032](https://doi.org/10.1163/22941932-bja10032).

Appendix A: Macroscopic anatomical characteristics as proposed by Ruffinatto *et al.* (2015)

### **Growth rings**

1 – Growth rings distinct [present / absent / variable]

a. Thick-walled and radially flattened latewood fibres or tracheids versus thin-walled earlywood fibres or tracheids, macroscopically visible as a difference in colour intensity (lighter in earlywood).

b. Distinct differences in colour between earlywood (light) and latewood (dark) (softwoods and ring-porous hardwoods).

c. Marked difference in vessel diameter between latewood and earlywood of the following ring as in ring- and semi-ring-porous woods (hardwoods).

d. Marginal parenchyma, terminal or initial (hardwoods).

e. Decreasing frequency of parenchyma bands towards the latewood resulting in distinct fibre zones (hardwoods). f. Distended or noded rays (hardwoods) (Richter & Oelker 2002, adapted from IAWA 1989).

### **Section A – Wood with vessels (hardwoods)**

Porosity

3- Diffuse-porous [present / absent / variable]

4- Semi-ring porous [present / absent / variable]

5- Ring-porous [present / absent / variable]

6- Number of rows of earlywood pores [one row / more than one row / variable / NA]

7- Widest tangential spacing between earlywood vessels [one earlywood vessel at most / more than one earlywood vessel]

Vessel arrangement

8- Vessels in tangential bands [present / absent / variable]

9- Vessels in radial pattern [present / absent / variable]

10- Vessels in diagonal pattern (echelon) [present / absent / variable]

11- Vessels in dendritic pattern (flame-like) [present / absent / variable]

#### Vessel groupings

12- Solitary and in radial multiples of 2–3 vessels [present / absent / variable]

13- Exclusively solitary (90% or more) [present / absent / variable]

14- Radial multiples of 4 or more common [present / absent / variable / NA]

15- Clusters common [present / absent / variable / NA]

#### Vessel frequency

16-  $\leq 5$  vessels per square millimetre [present / absent / variable]

17- 6–20 vessels per square millimetre [present / absent / variable]

18-  $> 20$  vessels per square millimetre [present / absent / variable]

#### Vessel diameter / Pore visibility

19- Small (not visible to the naked eye, less than 80  $\mu\text{m}$ ) [present / absent / variable]

20- Medium (just visible to the naked eye, 80-130  $\mu\text{m}$ ) [present / absent / variable]

21- Large (commonly visible to the naked eye, larger than 130  $\mu\text{m}$ ) [present / absent / variable]

#### Tyloses

24- Tyloses common [present / absent / variable]

#### Vessel deposits

25- Gums and other deposits in heartwood vessels [present / absent / variable]

#### Axial parenchyma distribution

29- Axial parenchyma diffuse [present / absent / variable]

30- Axial parenchyma diffuse-in-aggregates [present / absent / variable]

31- Axial parenchyma vasicentric [present / absent / variable]



- 32- Axial parenchyma lozenge-aliform [present / absent / variable / unilateral]
- 33- Axial parenchyma winged-aliform [present / absent / variable / unilateral]
- 34- Axial parenchyma confluent [present / absent / variable / unilateral]
- 35- Axial parenchyma banded [majority wide / majority narrow / variable / absent]
- 36- Banded parenchyma distribution [throughout the ring / in latewood only / in earlywood only / NA]
- 37- Parenchyma bands wider than rays [present / absent / variable]
- 38- Parenchyma in marginal or seemingly marginal bands [present / absent / variable]
- 39- Axial parenchyma reticulate [present / absent / variable]
- 40- Axial parenchyma scalariform [present / absent / variable]
- 41- Axial parenchyma festooned [present / absent / variable]
- 42- Predominant parenchyma pattern [absent / diffuse / diffuse-in-aggregates / vasicentric / lozenge-aliform / winged-aliform / confluent / banded / reticulate / scalariform / festooned]

#### Ray width

- 43- Ray visibility to the naked eye on the transverse surface [rays not visible / all rays visible / only larger rays visible]
- 44- Ray visibility to the naked eye on the tangential surface [rays not visible / rays visible]

#### Ray storying

- 47- Ray storying [not storied (absent) / regular coarse storying / regular fine storying / irregular coarse storying / irregular fine storying]

#### Ray height

- 48- Ray height [highest rays less than 5 millimetres high / highest rays more than 5 millimetres high]

#### Rays per mm

49- Rays per mm [ $\leq 4/\text{mm}$  / 5–12/mm /  $>12/\text{mm}$  / NA]

Heartwood colour

59- Heartwood colour darker than sapwood colour [present / absent]

60- Heartwood basically brown or shades of brown [present / absent]

61- Heartwood basically red or shades of red [present / absent]

62- Heartwood basically yellow or shades of yellow [present / absent]

63- Heartwood basically white to grey [present / absent]

64- Heartwood with streaks [present / absent]

Heartwood density

65- Density [density low:  $< 0.40 \text{ g/cm}^3$  / density medium:  $0.40\text{--}0.75 \text{ g/cm}^3$  / density high:  $> 0,75 \text{ g/cm}^3$ ]

Heartwood odour

66- Odour [absent / distinctly present and pleasant (sweet, spicy, floral) / distinctly present and unpleasant (sour, bitter, foetid)]

Habit

68- Tree [present / absent / variable]

Geographical distribution

90- Neotropics and temperate Brazil (Brazier and Franklin region 81) [present / absent]

93- Tropical South America [present / absent]

Appendix B: IAWA list for microscopic characteristics for identification of leafy woods

(IAWA Committee 1989)

Growth Rings

1- Growth ring boundaries distinct

2- Growth ring boundaries indistinct or absent

Vessels

### Porosity

3- Wood ring-porous

4- Wood semi-ring-porous

5- Wood diffuse-porous

### Vessel arrangement

6- Vessels in tangential bands

7- Vessels in diagonal and / or radial pattern

8- Vessels in dendritic pattern

### Vessel groupings

9- Vessels exclusively solitary (90% or more)

10- Vessels in radial multiples of 4 or more common

11- Vessel clusters common

### Perforation plates

13- Simple perforation plates

14- Scalariform perforation plates

15- Scalariform perforation plates with  $\leq 10$  bars

16- Scalariform perforation plates with 10 - 20 bars

17- Scalariform perforation plates with 20 - 40 bars

18- Scalariform perforation plates with  $\geq 40$  bars

19- Reticulate, foraminate, and / or other types of multiple perforation plates

### Intervessel pits: arrangement and size

20- Intervessel pits scalariform

21- Intervessel pits opposite

22- Intervessel pits alternate

23- Shape of alternate pits polygonal

24- Minute -  $\leq 4 \mu\text{m}$

25- Small - 4 - 7  $\mu\text{m}$

26- Medium - 7 - 10  $\mu\text{m}$

27- Large -  $\geq 10 \mu\text{m}$

Vestured pits

29- Vestured pits

Vessel - ray pitting

30- Vessel-ray pits with distinct borders; similar to intervessel pits in size and shape throughout the ray cell

31- Vessel-ray pits with much reduced borders to apparently simple: pits rounded or angular

32- Vessel-ray pits with much reduced borders to apparently simple: pits horizontal (scalariform, gash-like) to vertical (palisade)

33- Vessel-ray pits of two distinct sizes or types in the same ray cell

34- Vessel-ray pits unilaterally compound and coarse (over 10  $\mu\text{m}$ )

35- Vessel-ray pits restricted to marginal rows

Tangential diameter of vessel lumina

Mean tangential diameter of vessel lumina

40-  $\leq 50 \mu\text{m}$

41- 50 - 100  $\mu\text{m}$

42- 100 - 200  $\mu\text{m}$

43-  $\geq 200 \mu\text{m}$

45- Vessels of two distinct diameter classes, wood not ring-porous

Vessels per square millimetre

46-  $\leq 5$  vessels per square millimetre

47- 5 - 20 vessels per square millimetre

48- 20 - 40 vessels per square millimetre

49- 40 - 100 vessels per square millimetre

50-  $\geq$  100 vessels per square millimetre

Mean vessel element length

52-  $\leq$  350  $\mu\text{m}$

53- 350 - 800  $\mu\text{m}$

54-  $\geq$  800  $\mu\text{m}$

Tyloses and deposits in vessels

56- Tyloses common

57- Tyloses sclerotic

58- Gums and other deposits in heartwood vessels

Tracheids and fibres

60- Vascular / vasicentric tracheids present

Ground tissue fibres

61- Fibres with simple to minutely bordered pits

62- Fibres with distinctly bordered pits

63- Fibre pits common in both radial and tangential walls

64- Helical thickenings in ground tissue fibres

Septate fibres and parenchyma-like fibre bands

65- Septate fibres present

66- Non-septate fibres present

67- Parenchyma-like fibre bands alternating with ordinary fibres

Fibre wall thickness

68- Fibres very thin-walled

69- Fibres thin- to thick-walled

70- Fibres very thick-walled

Mean fibre lengths

71-  $\leq 900 \mu\text{m}$

72-  $900\text{-}1600 \mu\text{m}$

73-  $\geq 1600 \mu\text{m}$

Axial parenchyma

75- Axial parenchyma absent or extremely rare

Apotracheal axial parenchyma

76- Axial parenchyma diffuse

77- Axial parenchyma diffuse-in-aggregates

Paratracheal axial parenchyma

78- Axial parenchyma scanty paratracheal

79- Axial parenchyma vasicentric

80- Axial parenchyma aliform

81- Axial parenchyma lozenge-aliform

82- Axial parenchyma winged-aliform

83- Axial parenchyma confluent

84- Axial parenchyma unilateral paratracheal

Banded parenchyma

85- Axial parenchyma bands more than three cells wide

86- Axial parenchyma in narrow bands or lines up to three cells wide

87- Axial parenchyma reticulate

88- Axial parenchyma scalariform

89- Axial parenchyma in marginal or in seemingly marginal bands

Axial parenchyma cell type / strand length

- 90- Fusiform parenchyma cells
- 91- Two cells per parenchyma strand
- 92- Four (3-4) cells per parenchyma strand
- 93- Eight (5-8) cells per parenchyma strand
- 94- Over eight cells per parenchyma strand
- 95- Unlignified parenchyma

Rays

Ray width

- 96- Rays exclusively uniseriate
- 97- Ray width 1 to 3 cells
- 98- Larger rays commonly 4 - to 10 seriate
- 99- Larger rays commonly > 10-seriate
- 100- Rays with multiseriate portion(s) as wide as uniseriate portions

Rays: cellular composition

- 104- All ray cells procumbent
- 105- All ray cells upright and / or square
- 106- Body ray cells procumbent with one row of upright and / or square marginal cells
- 107- Body ray cells procumbent with mostly 2-4 rows of upright and / or square marginal cells
- 108- Body ray cells procumbent with over 4 rows of upright and / or square marginal cells
- 109- Rays with procumbent, square and upright cells mixed throughout the ray

Rays per millimetre

- 114-  $\leq 4$  / mm
- 115- 4-12 / mm

116-  $\geq 12$  /mm

#### Intercellular canals

127- Axial canals in long tangential lines

128- Axial canals in short tangential lines

129- Axial canals diffuse

130- Radial canals

131- Intercellular canals of traumatic origin

#### Cambial variants

133- Included phloem, concentric

134- Included phloem, diffuse

135- Other cambial variants

#### Mineral inclusions

#### Prismatic crystals

136- Prismatic crystals present

137- Prismatic crystals in upright and / or square ray cells

138- Prismatic crystals in procumbent ray cells

139- Prismatic crystals in radial alignment in procumbent ray cells

140- Prismatic crystals in chambered upright and / or square ray cells

141- Prismatic crystals in non-chambered axial parenchyma cells

142- Prismatic crystals in chambered axial parenchyma cells

143- Prismatic crystals in fibres

#### Silica

159- Silica bodies present

160- Silica bodies in ray cells

161- Silica bodies in axial parenchyma cells



162- Silica bodies in fibres

163- Vitreous silica

Appendix -- Non-anatomical information

Geographical distribution

183- Neotropics and temperate Brazil (Brazier and Franklin region 81)

186- Tropical South America

Habit

189- Tree

Specific gravity

193- Basic specific gravity low,  $\leq 0.40$

194- Basic specific gravity medium, 0.40-0.75

195- Basic specific gravity high,  $\geq 0.75$

Heartwood colour

196- Heartwood colour darker than sapwood colour

197- Heartwood basically brown or shades of brown

198- Heartwood basically red or shades of red

199- Heartwood basically yellow or shades of yellow

200- Heartwood basically white to grey

201- Heartwood with streaks

202- Heartwood not as above

**ARTIGO 2: Impacto da carbonização na estrutura anatômica de carvões produzidos a partir de resíduos lenhosos do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira**

**Impacto da carbonização na estrutura anatômica de carvões vegetais produzidos a partir de resíduos lenhosos do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira**

Alana Assunção da Silva <sup>1\*</sup>, Luiz Eduardo de Lima Melo<sup>2</sup>, Thiago de Paula Protásio<sup>3</sup>, João Rodrigo Coimbra Nobre<sup>1</sup>, Fernanda Ilkiu Borges de Souza<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará – Campus V, 66095-015, Belém, PA, Brasil*

<sup>2</sup> *Departamento de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, 68503-120 Marabá, PA, Brasil*

<sup>3</sup> *Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Parauapebas, 685115-000, PA, Brasil*

<sup>4</sup> *Laboratório de Botânica, Embrapa Amazônia Oriental, 66095-100 Belém, PxA, Brazil.*

*\* autor correspondente*

*Email: [alana0463@gmail.com](mailto:alana0463@gmail.com)*

*Número de telefone: +55 91 993161637*

**Resumo:** O emprego do carvão vegetal no processo da produção de ferro é uma alternativa sustentável, uma vez que sua utilização reduz a dependência de recursos não renováveis, mitigando os impactos ambientais. A antracologia, pode fornecer direcionamento para obtenção de uma matéria-prima mais homogênea e aumentar a eficiência do produto, assim como auxiliar na identificação dos carvões. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da pirólise nas características anatômicas do xilema secundário em espécies de diferentes densidades e tipos de parênquima axial. Foram investigadas 15 espécies oriundas de resíduos do manejo florestal sustentável. Foi realizada análise anatômica microscópica da madeira, assim como do carvão vegetal, empregando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Para avaliar as alterações da madeira após a carbonização, foram feitos testes de comparação de média. Além disso,

realizou-se uma análise multivariada de agrupamento de espécies utilizando a técnica de análise de componentes principais. Após a carbonização o diâmetro de vaso reduziu em 11 espécies. A frequência de vasos aumentou na maioria dos indivíduos analisados. O rendimento gravimétrico variou entre 31.04 e 39.05%. As espécies com menores rendimentos foram *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* e *Dinizia excelsa* com 39,45%, 36,33%, 36,25% respectivamente. Não foi observado padrão de contração ou aumento para os parâmetros quantitativos da madeira após a carbonização, considerando espécies de média e alta densidade e abundância de parênquima. De maneira geral, o efeito da carbonização foi bastante variável, mesmo em espécies do mesmo gênero.

**Palavras-chaves:** alterações microscópicas, anatomia da madeira, antracologia

## 1. Introdução

A produção de ferro no Brasil é um setor de extrema relevância econômica e industrial, consolidando o país como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro. Essa posição é impulsionada pela notável riqueza mineral presente na região da Serra de Carajás, localizada no sudeste do Pará, na Amazônia oriental brasileira. Com seus depósitos minerais valiosos, essa região se destaca como uma das áreas mais importantes do mundo em termos de recursos minerais (Paradella *et al.* 2015; Rodríguez-Rodríguez *et al.* 2021).

No contexto da produção de ferro no Brasil, os redutores utilizados nas indústrias siderúrgicas são o coque e o carvão vegetal (SINDIFER, 2022). O coque, derivado do carvão mineral, é o principal redutor empregado na indústria siderúrgica, mas sua utilização pode gerar impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa para atmosfera. Por outro lado, o carvão vegetal, é uma alternativa mais sustentável obtida por meio da carbonização da madeira, uma fonte renovável e biodegradável. Seu uso reduz a

dependência de recursos não renováveis, mitigando os impactos ambientais (Jahirul *et al.* 2015; Lima *et al.* 2022a).

A importância econômica do carvão vegetal no Brasil é bastante significativa. O país lidera a produção mundial de carvão vegetal, gerando aproximadamente 6,2 milhões de toneladas em 2022, sendo que 86% desse total é destinado ao setor industrial, atendendo siderurgias, metalurgias e aciarias. Os outros 14% são utilizados em residências e estabelecimentos comerciais (Oliveira *et al.* 2019; EPE, 2022).

A madeira utilizada na produção do carvão vegetal provém principalmente de florestas plantadas e de resíduos resultantes do manejo florestal sustentável (MFS). Além disso, resíduos provenientes de atividades industriais, como serrarias, marcenarias, indústrias de painéis e podas, também são aproveitados. Como resultado, ao utilizar matéria-prima oriunda de resíduos, a biomassa torna-se altamente heterogênea em termos de suas propriedades tecnológicas (Moreno e Font 2015; Silva *et al.* 2020; Mancini e Rinnan 2021; Meira *et al.* 2021; Lima *et al.* 2022a).

Diante disso, a busca pela qualidade do carvão vegetal tem impulsionado pesquisas no campo da física e química da madeira. Reconhece-se que o conhecimento aprofundado da matéria-prima possibilita maximizar as qualidades comerciais do produto. Adicionalmente, alguns estudos têm se dedicado a classificar a biomassa residual do MFS na Amazônia brasileira em grupos tecnológicos similares, visando aprimorar suas aplicações (Paula 2005; Lima *et al.* 2020).

No que diz respeito aos estudos relacionados à antracologia, ciência que estuda a madeira carbonizada, alguns analisaram o efeito da carbonização em diferentes temperaturas, por exemplo: McGinnes *et al.* (1971) conduziram pesquisa sobre o carvão de *Quercus alba* L., focando nas alterações estruturais em diferentes temperaturas, com ênfase na perda de massa e retração volumétrica. Prior e Gasson (1993) avaliaram seis

espécies provenientes da floresta tropical da África, submetendo-as a temperaturas de 400 °C e 700 °C, e observaram a perda de massa e a expansão do parênquima axial. Outro estudo realizado por Kim e Ham (2006) investigou a morfologia do carvão de *Quercus variabilis*, identificando rachaduras ao longo dos raios, ruptura e rompimento severos das paredes dos elementos dos vasos, assim como as tiloses. Gonçalves *et al.* 2012 avaliaram o efeito da carbonização na estrutura da madeira de cinco espécies do cerrado brasileira Stange *et al.* 2018, abordaram alterações qualitativas e quantitativas em quatro espécies de Mirtaceae, enquanto Nisgoski *et al.* 2019, analisaram o impacto da carbonização em diferentes temperaturas nos parâmetros anatômicos de três espécies de Moçambique.

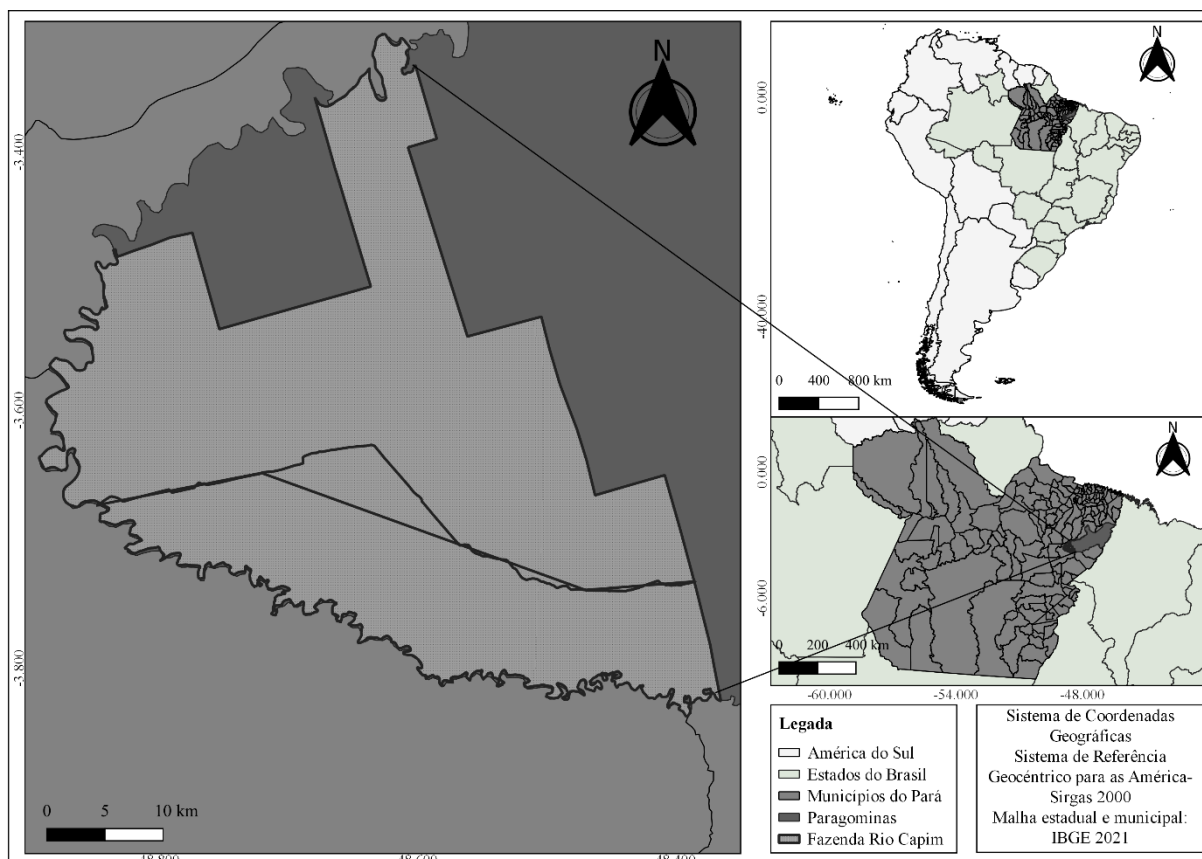
Quantos aos estudos relacionados as espécies tropicais da Amazônia brasileira, nota-se uma escassez de pesquisa. Os poucos estudos realizados, concentram-se principalmente na identificação do carvão, com o intuito de subsidiar a fiscalização do comércio ilegal, apontando também algumas alterações morfométricas na estrutura da madeira carbonizada como: Muñiz *et al.* 2012; Nisgoski *et al.* 2012; Muñiz *et al.* 2013; Muñiz *et al.* 2016; Braga Júnior *et al.* 2019; Perdigão *et al.* 2020; Braga Júnior *et al.* 2021; Braga Júnior *et al.* 2021.

Em vista disso, o conhecimento das propriedades da madeira é uma lacuna que precisa ser preenchida para um melhor aproveitamento na carbonização. Levando em consideração a alta diversidade de espécies na região amazônica é fundamental compreender o comportamento da madeira de floresta nativa nesse processo, a fim de fornecer direcionamento para obter matéria-prima mais homogênea e aumentar a eficiência do produto, assim como auxiliar na identificação dos carvões. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da pirólise nas características anatômicas do xilema secundário em espécies de diferentes densidades e tipos de parênquima axial.

## **2. Material e métodos**

## 2.1. Origem dos resíduos de madeira

Os resíduos de madeira utilizados nesta pesquisa foram oriundos do manejo florestal sustentável da Área de Manejo Florestal (AMF) Rio Capim, localizada no município de Paragominas, mesorregião do Sudeste Paraense (coordenadas: 3° 30' 45" S e 48° 30' 45" W), com extensão territorial de 209.130,54 hectares (Figura 1).



**Figura 19.** Mapa de localização da AMF Rio Capim, em Paragominas, Estado do Pará.

## 2.2. Coleta, amostragem e identificação botânica

As coletas foram realizadas em outubro de 2018, durante o qual foram selecionadas 15 espécies para investigação neste estudo (Tabela 1). A amostragem foi feita de forma aleatória, selecionando galhos de maior diâmetro provenientes das copas de três árvores de cada espécie (Figura 2). Foram coletados três discos de madeira de cada galho para análises laboratoriais e identificação das espécies, realizadas três dias após o corte na AMF Rio Capim (Lima *et al.* 2020).





**Figura 20.** Discos de madeira de resíduo florestal da AMF Rio Capim, município de Paragominas, Pará, Brasil.

Fonte: Lima *et al.* 2020

Além disso, forma obtidas amostras férteis, como flores e/ou frutos, para confirmar a identificação botânica das espécies analisadas. Essas amostras formam depositadas no Herbário IAN da Embrapa Amazônia Oriental, localizado em Belém, no Estado do Pará, Brasil. Amostras representativas da madeira de cada árvore identificada foram depositadas nas Xilotecas IAN da Embrapa Amazônia Oriental e Joaquim Ivanir Gomes da Universidade do Estado do Pará (UEPA), em Marabá, Pará, Brasil.

Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	N	Família	Nome Científico	Nome Comercial	CHR	CRX	XJIGw
Média densidade (0.50-0.75)	1	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers. <sup>1</sup>	Piquiarana	IAN198001	X8725	X480
	2	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl. <sup>1</sup>	Cupiúba	IAN197994	X8715	X484
	3	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand <sup>2</sup>	Breu barrote	IAN198000	X8712	X479
	4	Leguminosae - Mimosoideae	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes <sup>2</sup>	Timborana	IAN197989	X8711	X493
	5	Sapotaceae	<i>Pouteria oblanceollata</i> Pires <sup>3</sup>	Abiu	IAN197999	X8722	X495
	6	Lecythidaceae	<i>Couratari guianensis</i> Aubl. <sup>3</sup>	Tauarí-liso	IAN197992	X8724	X486
	7	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth <sup>3</sup>	Tauarí-branco	IAN197996	X8726	X487
	8	Lecythidaceae	<i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith <sup>3</sup>	Matamatá-preto	IAN197987	X8721	X488
	9	Caryocaraceae	<i>Caryocar villosum</i>	Piquiá	IAN197990	X8717	X481

Alta densidade (0.75-1.00)		(Aubl.) Pers. <sup>1</sup>					
	10	Leguminosae - Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke <sup>2</sup>	Angelim- vermelho	IAN197998	X8718	X491
	11	Lecythidaceae	<i>Lecythis pisonis</i> Cambess. <sup>3</sup>	Sapucaia	IAN197988	X8723	X489
	12	Lecythidaceae	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori <sup>3</sup>	Jarana	IAN197995	X8714	X490
	13	Chrysobalanaceae	<i>Parinari rodolphii</i> Huber <sup>3</sup>	Coco-pau	IAN197997	-	X483
	14	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist <sup>3</sup>	Casca-seca	IAN197991	X8713	X482
15	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach <sup>3</sup>	Maçaranduba	IAN197993	X8720	X495	

**Tabela 3.** Espécies coletadas na AMF Rio Capim, município de Paragominas, Estado Pará, Brasil.

Onde: CHR: Código de Registro de Herbário; CRX: Código de Registro na Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará; JIGw: Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes, UEPA Marabá, Pará. Parênquima axial apotraquel<sup>1</sup>; Parênquima axial paratraqueal<sup>2</sup>; Parênquima axial em faixa<sup>3</sup>.

### 2.3. Análise anatômica da madeira

Para analisar a anatomia microscópica da madeira, foram utilizados corpos de prova de três discos de madeira de cada espécie, com tamanho aproximado de 2 cm<sup>3</sup>, nas direções transversal, tangencial e radial, submetidos a um processo de amolecimento em água fervente e, posteriormente, seccionados em micrótomo de deslize, com espessura aproximada de 16 a 30 µm. Algumas das lâminas histológicas obtidas foram deixadas em estado natural, enquanto as demais foram tratadas com solução de hipoclorito de sódio para clarificação, coradas com Safranina e desidratadas em uma série de álcool Johansen (1940). Em seguida, as lâminas foram montadas com resina sintética Entellan®. As imagens foram capturadas e analisadas utilizando um microscópio de luz equipado com uma câmera digital.

### 2.4. Carbonização da madeira e análise anatômica do carvão

Para realizar a análise anatômica do carvão vegetal, amostras de madeira com tamanho aproximado de 1,5 x 1,5 x 3,0 foram colocados em um forno elétrico tipo mufla

com condensador resfriado à água e frasco coletor de gases condensáveis Lima *et al.* (2022b). A carbonização ocorreu por aproximadamente 5 horas, com taxa de aquecimento de  $1,66 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , atingindo uma temperatura final de  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Após atingir essa temperatura, as amostras permaneceram na temperatura final por 2 horas Muñiz *et al.* (2012). As amostras de carvão resultante foram fraturadas manualmente e submetidas à análise utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), a fim de obter imagens eletrofotomicroscópica.

## 2.5. Análise qualitativa e quantitativa da madeira e do carvão vegetal

As descrições anatômicas microscópicas da madeira e do carvão vegetal seguiram as recomendações do IAWA Committee (1989). Para a análise quantitativa da madeira e do carvão vegetal foram feitas 30 medições de: frequência de vasos (número por milímetro quadrado), diâmetro tangencial do lúmen dos vasos ( $\mu\text{m}$ ), raios por milímetro linear, largura e altura dos raios e diâmetro das pontoações ( $\mu\text{m}$ ). A mensuração do diâmetro das pontoações foi realizada de acordo com Gonçalves *et al.* (2012). Todas as medições foram realizadas com auxílio do software Image Pro Express versão 6.0.

## 2.6. Densidade básica da madeira

Dos discos de madeira foram retirados do cerne, seis corpos de prova para a obtenção da densidade básica (Db) da madeira, conforme descrito na NBR 11941 (ABNT 2003). As amostras foram imersas em água destilada para inchar até o volume máximo. O volume saturado de cada espécie foi obtido por imersão em água. Utilizou-se um béquer contendo água destilada posicionado em uma balança de precisão (0,001 g). Após este procedimento, as madeiras foram submetidas a um processo de secagem ao ar livre e depois em estufa até 0% de umidade a  $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para a obtenção da massa seca, as amostras foram pesadas em balança de precisão (0,001g). A densidade básica da madeira

foi calculada dividindo-se a massa seca (0%) pelo volume saturado máximo Lima *et al.*, 2022b.

As espécies foram classificadas por densidade média e alta de acordo com Lima *et al.* 2020.

### 2.7. Densidade aparente rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Os mesmos corpos de prova utilizados na obtenção da densidade básica da madeira foram carbonizados para obter a densidade aparente ( $D_a$ ) do carvão de acordo com adaptação da NBR 11941 (ABNT 2003). As modificações estão relacionadas ao tempo em que o carvão foi submetido as diferentes etapas: imersão em água destilada (30 minutos), secagem em temperatura ambiente ( $\pm 28^\circ\text{C}$ ) por 24 horas após a imersão, e secagem em estufa com circulação de ar a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 2 horas.

O rendimento gravimétrico do carvão foi calculado pela seguinte equação:

$$RGC = \frac{MSC}{MSM} \times 100$$

Onde: RGC: Rendimento Gravimétrico em Carvão vegetal (% base seca); MSC: Massa Seca do Carvão vegetal (g); MSM: Massa Seca da Madeira (g)

### 2.8. Análise estatística

Para comparar a densidade e as variáveis quantitativas do lenho e carvão vegetal, foram ajustados modelos lineares generalizado (GLM), assumindo distribuição Gaussiana (nos casos em que os dados foram normalmente distribuídos pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância para normalidade) ou distribuição Gamma (em casos em que os dados não foram distribuídos normalmente pelo teste de Shapiro-Wilk). Para as características anatômicas, com dados discretos, o GLM foi ajustado com uma distribuição de Poisson. Todos os GLMs foram submetidos a análise de resíduos para a avaliação da adequação da distribuição do erro. A análise de contraste foi então realizada

para testar diferenças entre pares Crawley (2013). Todos os testes estatísticos foram executados a um nível de significância de 5%.

Além disso, realizou-se análise multivariada de agrupamento de espécies utilizando a técnica de análise de componentes principais (PCA) com base nos valores médios dos dados quantitativos da madeira e do carvão vegetal. Dessa forma, foram constituídos os conjuntos referentes à madeira e ao carvão, utilizando-se a análise de dispersão de escores. As variáveis que mais influenciaram os componentes principais (CP) foram determinadas com auxílio dos autovetores.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software R, na versão 3.0.1.

### **3. Resultados e discussão**

#### **3.1. Diâmetro médio tangencial, frequência e pontoação intervascular dos vasos**

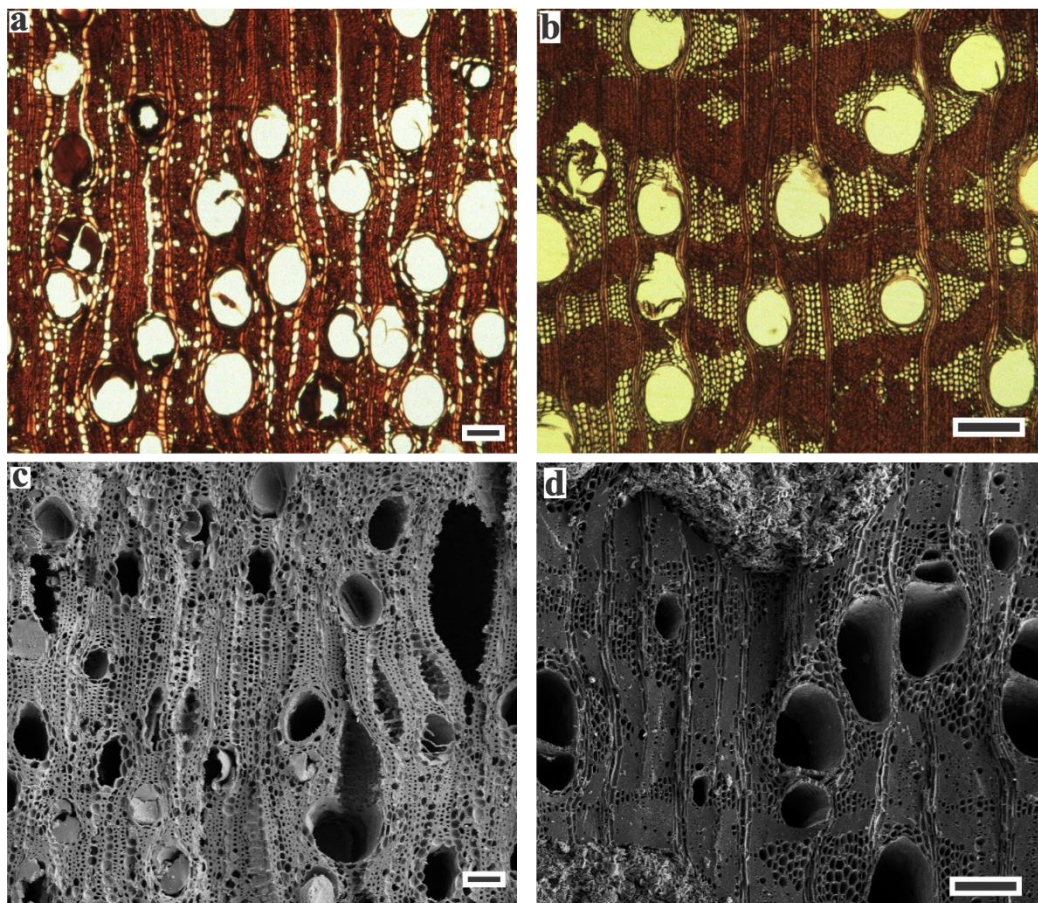
Após a carbonização, houve uma redução significativa no diâmetro dos vasos em onze das quinze espécies estudadas (Tabela 4). A contração média foi de 21%, variando de 5% em *Couratari oblongifolia* a 36% em *Caryocar glabrum*. Estudos anteriores corroboram essa tendência. Gonçalves *et al.* (2012), avaliaram as modificações na estrutura anatômica da madeira de cinco espécies do cerrado. Os autores apontaram maior redução no diâmetro de vaso em relação aos demais constituintes avaliados. Stang *et al.* (2018) estudando a anatomia da madeira carbonizada de quatro espécies de Mirtaceae em diferentes posições do lenho (perto da casca, intermediária, perto da medula) observaram diminuição em todas as posições. Perdigão *et al.* (2020), verificaram redução no diâmetro de vaso em três espécies nativas da Amazônia e um clone de eucalipto. Esses resultados podem ser explicados pelo comportamento anisotrópico da madeira durante a conversão em carvão vegetal, apresentando maior redução dimensional na direção tangencial (McGinnes *et al.* 1971; Kwon *et al.* 2009; Muñiz *et al.* 2012; Gonçalves *et al.* 2012).

Apenas em *Lecythis pisonis*, houve aumento significativo de 29% do diâmetro tangencial dos vasos. *Couratari oblongifolia*, *Eschweilera grandiflora* e *Lecythis lurida* apesar de apresentarem redução, a diferença não foi estatisticamente significativa (Tabela 4). Analisando a contração dos vasos por faixa de densidade, foi possível observar que as espécies de média e alta densidade reduziram respectivamente 26% e 24%. Ao analisar os indivíduos pelo tipo de parênquima axial, verificou-se que as espécies com parênquima apotraqueal apresentaram a maior redução (32%), seguidas pelas espécies com parênquima paratraqueal (27%) e em faixa (21%), considerando apenas valores estatisticamente significativos.

Um estudo conduzido por Gonçalves *et al.* (2012) revelou que espécies com maior quantidade de parênquima tendem a sofrer uma redução mais acentuada no diâmetro tangencial dos vasos e apresentaram uma notável contração. Essa característica pode ser atribuída às paredes celulares finas do parênquima. No entanto, no presente estudo, observou-se um padrão diferente. Contrariamente ao esperado, as espécies com parênquima axial apotraqueal, que naturalmente possuem uma menor quantidade de parênquima, foram aquelas que apresentaram maior contração dos vasos. Perdigão *et al.* (2020) também não constatou essa correlação nas espécies nativas da Amazônia.

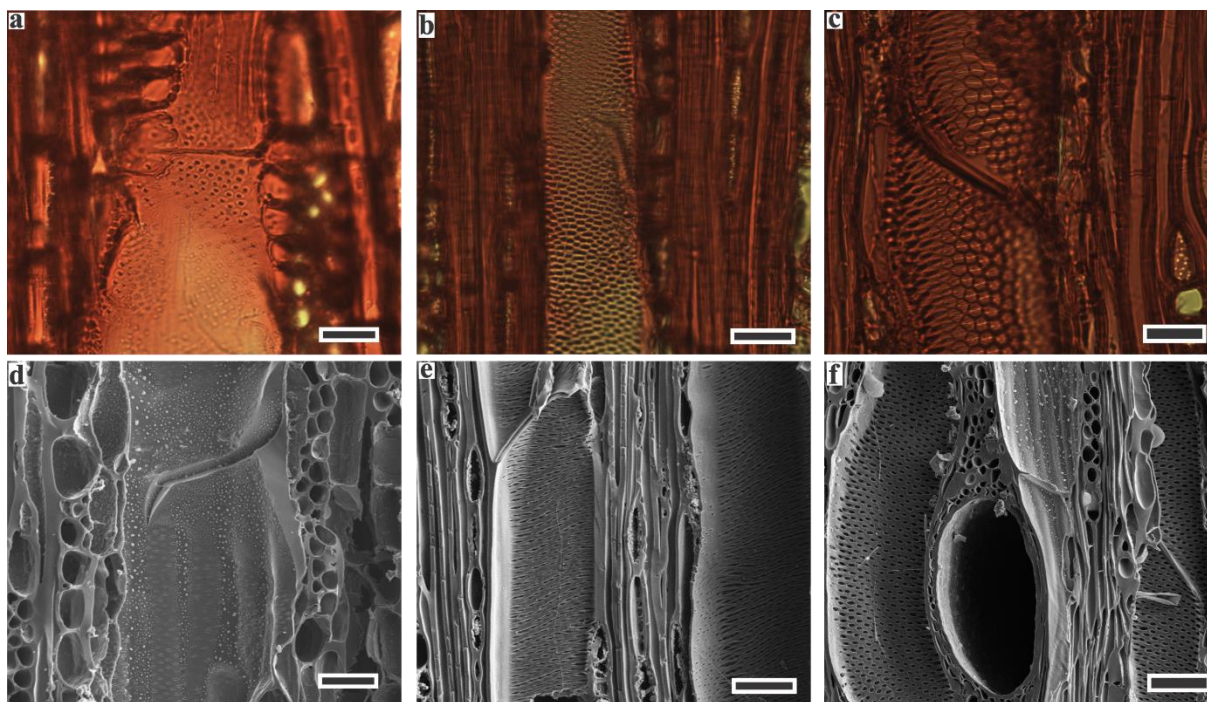
Outra modificação associada aos vasos é a mudança da forma de suas células durante o processo de carbonização, passando de circular para angular (Gonçalves *et al.* 2012; Gasson *et al.* 2017). Neste estudo, este fenômeno foi observado em todas as espécies, sendo mais evidente em *Goupia glabra* e *Dinizia excelsa* (Figura 21).





**Figura 21.** (a, c) *Goupia glabra*; (b, d) *Dinizia excelsa*. Micrografias na seção transversal da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala- *G. glabra*: 100  $\mu\text{m}$ ; *D. excelsa*: 200  $\mu\text{m}$ .

Com a carbonização, as amostras apresentaram estrutura homogeneizada da parede dos vasos, dessa forma, a câmara da pontuação perdeu sua distinção a exemplo de *Goupia glabra*, *Pouteria oblanceolata* e *Protium altissimum* (Figura 22). Agora, apenas o diâmetro tangencial da abertura das pontuações intervasculares pôde ser observado.



**Figura 22.** (a, d) *Goupia glabra*; (b, e) *Pouteria oblanceolata*; (c, f) *Protium altissimum*. Micrografias na seção tangencial da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala: 200  $\mu\text{m}$ .

Foi constatado que para a maioria das espécies estudadas houve redução significativa do diâmetro das pontoações. Apenas *Goupia glabra* e *Pouteria oblanceolata* apresentaram aumento de 50% e 33% respectivamente, em *Protium altissimum* não houve diferença estatística (Tabela 4). Resultado oposto foi encontrado por Gonçalves *et al.* (2012) ao analisarem a madeira carbonizada de cinco espécies do cerrado brasileiro, não observando redução significativa entre madeira e carvão em todas as espécies estudadas, mas observaram a perda da câmara das pontoações. É importante destacar que os parâmetros de carbonização diferiram dos utilizado nesta pesquisa, sendo a madeira carbonizada a 400 °C durante 40 minutos. Com relação a uniformidade da parede dos vasos, seus resultados corroboram com o do presente estudo.

---

Madeira

Carvão

---

Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro de vaso (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
Média densidade (0.50-0.75)	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	187 (34-257)	52	10	119 (82-170)	24	4	-36	5.8 <sup>e-5</sup>
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	138 (110-178)	16	3	88 (52-139)	22	4	-36	5.2 <sup>e-14</sup>
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	86 (5-130)	26	5	58 (39-82)	12	2	-33	1.3 <sup>e-6</sup>
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	110 (65-159)	22	4	92 (70-127)	13	2	-16	8.9 <sup>e-5</sup>
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	72 (47-92)	14	3	61 (43-82)	9	2	-15	5 <sup>e-4</sup>
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	147 (77-194)	26	5	120 (56-167)	27	5	-18	3 <sup>e-4</sup>
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	138 (77-138)	26	5	131 (84-171)	21	4	-5	0.2
	<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	147 (66-227)	41	7	131 (77-178)	23	4	-11	0.06
	Vaso/m <sup>2</sup>	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	8 (4-14)	3	0.5	11 (5-24)	4	0.7	38	0.001
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	8 (3-11)	2	0.3	13 (8-22)	3	0.6	63	2.2 <sup>e-7</sup>
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	30 (16-42)	6	1	27 (18-42)	6	1	-10	0.1
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	16 (8-23)	4	0.8	21 (15-34)	5	0.9	31	1.8 <sup>e-5</sup>
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	47 (36-57)	6	1	87 (47-119)	19	4	85	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	7 (1-16)	4	0.7	14 (6-33)	6	1	100	5.06 <sup>e-6</sup>
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	8 (0-19)	4	0.8	13 (4-25)	5	0.9	63	2 <sup>e-4</sup>
<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	12 (3-23)	4	0.8	12 (7-16)	3	0.5	0	0.7	
Ø Pontoação	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>	
<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	5 (3-8)	1	0.4	2 (2-3)	0.5	0.1	-60	2.2 <sup>e-16</sup>	
<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	2 (0.8-4)	0.8	0.2	3 (2-3)	0.3	0.08	50	1 <sup>e-4</sup>	
<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	5 (3-6)	0.9	0.2	5 (3-6)	0.6	0.2	0	0.9	
<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	5 (3-7)	1	0.3	4 (3-5)	0.4	0.01	-20	1 <sup>e-3</sup>	
<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	3 (2-4)	0.5	0.1	4 (2-5)	1	0.3	33	0.3	
<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	8 (6-9)	0.8	0.2	3 (2-4)	0.5	0.1	-63	2.2 <sup>e-16</sup>	
<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	3 (2-4)	0.5	0.1	2 (2-3)	0.4	0.1	-33	2.7 <sup>e-13</sup>	
<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	6 (5-7)	0.7	0.2	3 (2-3)	0.3	0.1	-50	2.2 <sup>e-16</sup>	
Alta densidade (0.75-1.00)	Diâmetro de vaso (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	189 (136-241)	29	5	146 (105-174)	21	4	-23	1.6 <sup>e-8</sup>
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	191 (64-279)	44	8	128 (78-190)	22	4	-33	2.3 <sup>e-9</sup>
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	139 (29-220)	55	10	180 (96-322)	49	9	29	4 <sup>e-3</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	106 (60-139)	20	4	96 (56-131)	19	3	-9	0.06
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	227 (59-324)	78	14	167 (92-392)	49	9	-26	8 <sup>e-4</sup>
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	163 (102-239)	35	6	122 (81-172)	26	5	-25	4.2 <sup>e-6</sup>
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	87 (40-125)	21	4	75 (40-103)	17	3	-14	0.01
	Vaso/m <sup>2</sup>	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	12 (5-19)	4	0.7	5 (2-8)	2	0.3	-58	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	4 (1-8)	2	0.3	9 (2-17)	4	0.7	125	1.3 <sup>e-9</sup>
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	15 (1-33)	8	1	5 (2-11)	2	0.4	-67	3.1 <sup>e-11</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	14 (8-26)	4	0.7	29 (14-47)	9	2	107	1.4 <sup>e-12</sup>
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	2 (0-4)	1	0.2	4 (2-7)	1	0.2	100	2.6 <sup>e-8</sup>
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	4 (1-8)	1	0.3	5 (3-10)	2	0.3	25	4 <sup>e-3</sup>
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	29 (14-42)	7	1	23 (12-36)	6	1	-21	9 <sup>e-4</sup>
Ø Pontoação	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>	
<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	5 (4-10)	2	0.4	3 (2-4)	0.5	0.1	-40	6.8 <sup>e-9</sup>	
<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	5 (3-7)	1	0.3	4 (3-5)	0.4	0.01	-20	1 <sup>e-3</sup>	
<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	3 (2-4)	0.6	0.2	2 (2-3)	0.3	0.01	-33	5.0 <sup>e-5</sup>	
<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	5 (3-12)	2	0.6	2 (1-3)	0.5	0.1	-60	3.6 <sup>e-11</sup>	

<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	4 (3-6)	0.8	0.2	2 (2-3)	0.4	0.09	-50	2.2 <sup>e-16</sup>
<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	7 (7-9)	0.7	0.2	3 (2-3)	0.4	0.1	-57	2.2 <sup>e-16</sup>
<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	4 (4-6)	0.8	0.2	2 (2-3)	0.4	0.09	-50	2.2 <sup>e-16</sup>
<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	3 (2-4)	0.5	0.1	2 (2-3)	0.6	0.1	-33	5 <sup>e-3</sup>

**Tabela 4.** Dados do diâmetro médio tangencial, frequência e pontuação intervascular dos vasos das espécies estudadas.

Dados do diâmetro médio tangencial, frequência e pontuação intervascular dos vasos das espécies estudadas.

Onde: min: mínimo; máx: máximo; Re: Redução; Au: Aumento; DP: desvio padrão; EP: erro padrão; *p*: nível de significância entre madeira e carvão.

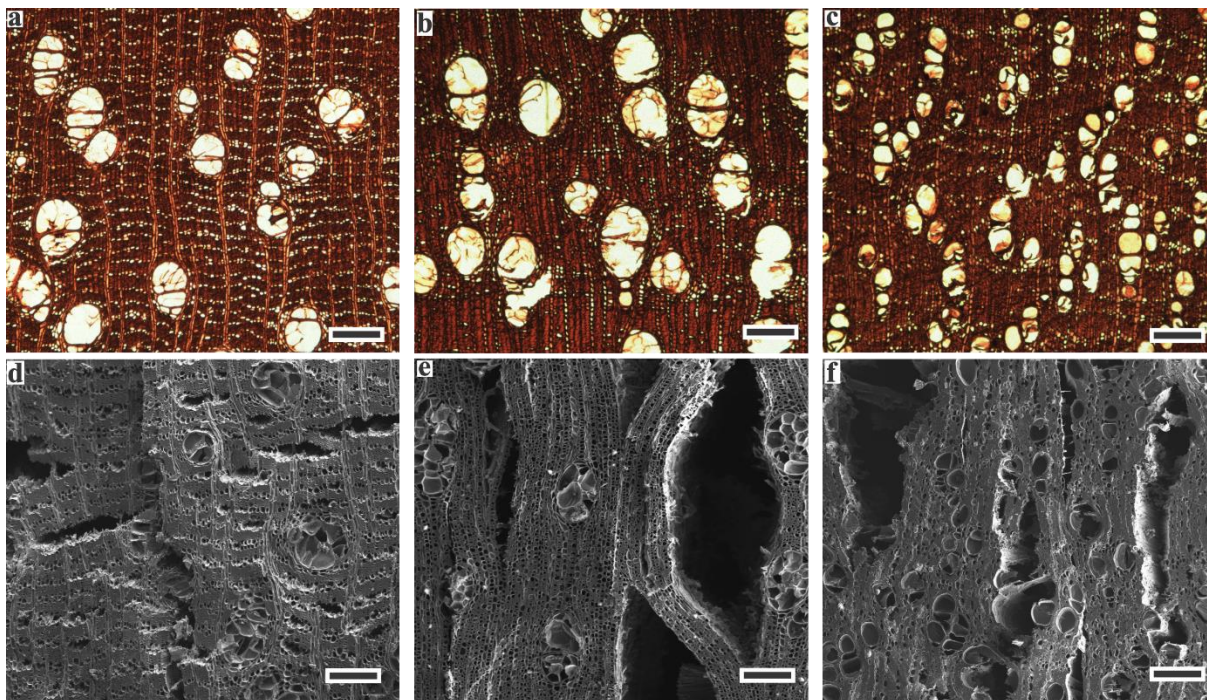
Parênquima axial apotraqueal<sup>1</sup>; Parênquima axial paratraqueal<sup>2</sup>; Parênquima axial em faixa<sup>3</sup>

A frequência de vaso foi maior no carvão na maioria dos indivíduos analisados.

*Pouteria oblanceolata* apresentou a maior média, com 87 vasos por mm<sup>2</sup>. As alterações variaram de 0 a 125% (Tabela 4).

*Lecythis pisonis*, *Caryocar villosum*, *Manilkara elata* e *Protium altissimum*, tiveram redução respectivamente de -67%, -58%, -21% e -10%. Para as três primeiras espécies citadas, observou-se que esta redução foi ocasionada por rachaduras consideráveis no sentido do raio. Em *L. pisonis*, além de ocorrer este fenômeno, os vasos se expandiram consideravelmente com a carbonização (Figura 23). A redução da frequência de vaso de *P. altissimum*, não foi significativa estatisticamente, no entanto observou-se que por ser uma espécie de vasos pequenos e múltiplos de 2, 3 e > 4, com a carbonização alguns vasos encolheram, mascarando sua contagem.





**Figura 23.** (a, d) *Lecythis pisonis*; (b, e) *Caryocar villosum*; (c, f) *Manilkara elata*. Micrografias na seção transversal da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior). Barra de escala: 200  $\mu\text{m}$ .

Estudos mostraram que, de modo geral, o processo de carbonização causa a contração das células e, em relação aos vasos, resulta em um aumento na sua frequência Andrade *et al.* (2018). Stange *et al.* (2018) observaram um aumento na frequência dos vasos de 50% a 92% após a carbonização. Muñiz *et al.* (2012), relataram um aumento na frequência de vasos em *Hymenolobium petraeum*, *Parkia pendulae*, sem alterações em *Diploptropis purpurea*, *Vatairea guianensis* e *Vatairea paraensis*. Em contraste, Gonçalves *et al.* (2012) não encontraram alterações significativas na frequência dos vasos, apesar de observarem uma redução significativa nos mesmos. Esses resultados indicam que essa característica pode variar consideravelmente entre diferentes espécies Nisgosk *et al.* (2019).

### 3.2. Largura, altura e frequência dos raios

Redução significativa ocorreu na largura dos raios em 13 das 15 espécies estudadas. Em *Goupia glabra* os raios contraíram, mas não foi significativo. Já para *Caryocar glabrum* houve expansão de 38% (Tabela 5). Stange *et al.* (2018) observaram variações médias da largura dos raios nas espécies estudadas, por exemplo: *Myrcia retorta* aumentou 56,3%, *Eugenia pyriformis* e *Plinia peruviana* diminuíram 30,7%. Já *Campomanesia xanthocarp* reduziu apenas 7,6%.

Gonçalves *et al.* (2012) verificaram mudanças significativas em raios mais largos, sugerindo uma possível tendência de maior encolhimento em raios maiores. No presente estudo foi observado que *Couratari guianensis*, *Couratari oblongifolia*, *Dinizia excelsa*, *Eschweilera grandiflora*, *Lecythis lurida*, *Lecythis pisonis*, *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* e *Protium altissimum*, consideradas espécies de raios largos, contraíram menos com média de -30,6%. Já as demais espécies, consideradas de raios finos contraíram mais, tendo uma média de -33% após a carbonização.

Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	Largura de raio (µm)	Madeira			Carvão			Re/Au (%)	p
		Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP		
	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	21 (8-37)	8	1	29 (15-55)	9	2	38	4 <sup>e-4</sup>
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	26 (13-40)	7	1.3	25 (16-37)	6	1	-4	0.4
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	28 (16-42)	6	1	24 (16-33)	4	0.7	-14	5 <sup>e-4</sup>
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	17 (11-26)	4	0.7	13 (8-23)	3	0.6	-24	9.8 <sup>e-6</sup>
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	39 (24-55)	9	2	23 (13-32)	5	0.9	-41	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	44 (24-72)	9	2	37 (24-52)	7	1	-16	1 <sup>e-3</sup>
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	63 (37-82)	11	2	43 (29-69)	8	2	-32	4.3 <sup>e-16</sup>
	<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	31 (15-44)	7	1	24 (11-34)	6	1	-23	1.09 <sup>e-5</sup>
Média densidade (0.50-0.75)	Altura de raio (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	p
	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	765 (282-1527)	331	60	602 (266-985)	186	34	-21	0.01
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	509 (262-994)	168	31	394 (203-653)	133	24	-23	3 <sup>e-3</sup>
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	176 (78-262)	57	10	177 (110-247)	33	6	1	0.9
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	180 (88-289)	63	11	198 (90-295)	39	7	10	0.2
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	365 (208-757)	128	23	308 (157-600)	117	21	-16	0.07
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	747 (416-1400)	253	46	652 (291-1300)	275	50	-13	0.1
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	455 (220-745)	117	21	454 (294-935)	136	25	0	0.1
	<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	336 (153-543)	100	18	315 (176-533)	81	15	-6	0.3



	Raio/mm	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	16 (13-19)	2	0.3	7 (4-9)	1	0.3	-56	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	11 (4-14)	2	0.4	9 (4-12)	2	0.4	-18	0.03
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	10 (6-12)	2	0.3	10 (7-13)	2	3	0	0.5
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	6 (2-10)	2	0.3	8 (4-13)	2	0.4	33	3.6 <sup>e-6</sup>
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	10 (5-16)	3	0.5	11 (7-16)	2	0.4	10	0.03
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	8 (5-12)	2	0.3	9 (6-12)	1	0.2	13	0.4
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	8 (6-10)	1	0.2	11 (7-15)	2	0.3	38	9.5 <sup>e-5</sup>
	<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	11 (8-14)	1	0.3	13 (9-18)	3	0.5	18	0.08
	Largura de raio (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	64 (42-102)	13	2	27 (17-43)	7	1.2	-58	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	55 (34-80)	12	2	30 (20-42)	7	1.3	-45	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	39 (21-55)	8	1.5	23 (11-34)	6	1.1	-41	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	48 (24-87)	13	2	29 (18-44)	7	1.3	-40	9.9 <sup>e-13</sup>
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	15 (6-23)	4	0.7	10 (6-17)	3	0.5	-33	1.7 <sup>e-8</sup>
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	13 (9-19)	3	0.5	10 (5-15)	2	0.4	-46	2.5 <sup>e-6</sup>
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	34 (16-53)	8	1.5	18 (9-30)	5	0.9	-47	2.2 <sup>e-16</sup>
	Altura de raio (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
Alta densidade (0.75-1.00)	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	421 (220-818)	141	26	516 (219-787)	162	30	23	0.02
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	280 (167-419)	52	10	257 (150-384)	55	10	-8	0.1
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	362 (139-652)	101	18	214 (122-342)	52	10	-41	1.4 <sup>e-14</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	342 (216-599)	83	15	303 (160-618)	101	18	-11	0.1
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	418 (193-784)	188	34	349 (146-612)	113	21	-17	0.08
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	486 (196-960)	172	31	345 (150-678)	157	29	-29	1 <sup>e-3</sup>
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	318 (199-510)	74	14	223 (93-392)	75	14	-30	7.1 <sup>e-6</sup>
	Rays/mm	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	<i>p</i>
	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	12 (8-18)	3	0.5	10 (5-15)	3	0.5	-17	2 <sup>e-4</sup>
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	6 (4-9)	1	0.6	7 (5-10)	1	0.3	17	0.9
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	6 (4-9)	1	0.3	8 (6-12)	1	0.3	33	1 <sup>e-4</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	6 (3-9)	1	0.3	7 (4-9)	1	0.2	17	0.4
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	11 (6-16)	2	0.4	16 (10-23)	3	0.6	45	6.1 <sup>e-6</sup>
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	15 (10-20)	2	0.4	15 (10-21)	2	0.4	0	1
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	9 (7-14)	2	0.3	10 (8-12)	1	0.2	11	0.4

**Tabela 5.** Dados da largura, altura e frequência dos raios das espécies estudadas.

Onde: min: mínimo; máx: máximo; Re: Redução; Au: Aumento; DP: desvio padrão; EP: erro padrão; *p*; nível de significância entre madeira e carvão.

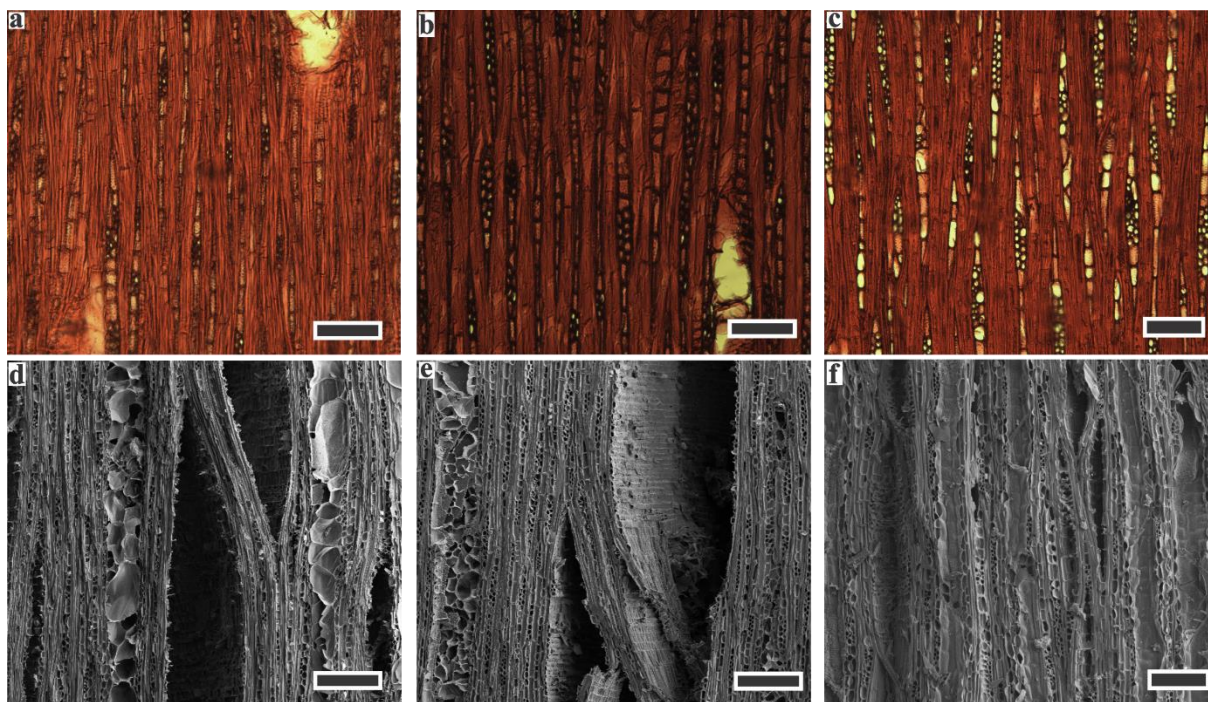
Parênquima axial apotraqueal<sup>1</sup>; Parênquima axial paratraqueal<sup>2</sup>; Parênquima axial em faixa<sup>3</sup>

Nigoski *et al.* (2019) pontuam que as diferenças nas variações dimensionais dos raios entre as espécies são atribuídas a características anatômicas distintas. Isso inclui o número de células e a largura dos raios, além da homogeneidade ou heterogeneidade deste

na madeira, bem como a espessura da parede das fibras. As discrepâncias também podem ser explicadas por alterações químicas nos extrativos presentes na madeira, os quais podem expandir e provocar variações dimensionais (Nisgoski *et al.* 2014; Pereira *et al.* 2016).

Em relação à altura dos raios, apenas cinco espécies apresentaram uma redução significativa após o processo de carbonização, e aumento de 23% para *Caryocar villosum* conforme indicado na Tabela 3. Gonçalves *et al.* (2012) constatou que não houve alterações significativas na altura dos raios entre a madeira e o carvão em nenhum dos indivíduos analisados. No entanto, foi observada uma aparente redução na altura dos raios nas espécies *Stryphnodendron polyphyllum* e *Tapirira guianensis*. Os autores ressaltam que essa variação não pode ser atribuída exclusivamente ao processo de carbonização, mas provavelmente se deve a diferenças naturais na altura dos raios entre espécies. Além disso, eles apontam para a grande variabilidade interespecífica e intraespecífica na altura dos raios, que também varia consideravelmente dentro de cada indivíduo. Já em outro estudo, Prior e Gasson (1993) observaram uma redução significativa na altura dos raios em todas as seis espécies africanas analisadas.

O aumento da frequência de raios após a carbonização foi significativo em apenas seis espécies. *Caryocar glabrum*, *Caryocar villosum* e *Goupia glabra* apresentaram redução significativa de -56%, -17% e -18% respectivamente. Observou-se que nestas espécies houve diversas rachaduras no sentido do raio impedindo a contagem (Figura 24). Nas espécies estudadas por Gonçalves *et al.* (2012), os autores não verificaram diferença significativa na frequência de raios.



**Figura 24.** (a, d) *Caryocar glabrum*; (b, e) *Caryocar villosum*; (c, f) *Goupia glabra*.

Micrografias na seção tangencial da madeira (linha superior) e carvão (linha inferior).

Barra de escala- *C. glabrum* e *C. villosum*: 200  $\mu\text{m}$ ; *G. glabra*: 100  $\mu\text{m}$ .

### 3.3. Densidade da madeira e do carvão vegetal

Os valores médios da densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal, estão apresentados na Tabela 6 e Figura 25.

Anatomicamente, as espécies que apresentaram maiores densidades básica foram madeiras que tinham maiores frações de parede das fibras, poros de menores diâmetros e maiores frequências a exemplo de *Manilkara elata*. O mesmo resultado foi constatado por Pereira *et al.* (2016), ao avaliarem seis clones de eucalipto para a produção do carvão. Os autores apontaram que as madeiras dos clones com maiores proporções de parede das fibras e poros de menores diâmetros e maior frequência apresentaram as maiores densidades básicas. Na produção de carvão vegetal, é vantajoso ter um menor conteúdo de espaços vazios, representados pelos lumes das fibras e vasos, uma vez que esses

espaços não contribuem para o rendimento gravimétrico do carvão e prejudicam sua qualidade.

Densidade básica(g/cm <sup>3</sup> )	Densidade básica(g/cm <sup>3</sup> )	Madeira			Carvão			Re/Au (%)	p
		Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP		
Média densidade (0.50-0.75)	<i>C. glabrum</i> <sup>1</sup>	0.74 (0.71-0.77)	0.02	0.01	0.40 (0.34-0.45)	0.04	0.02	-46	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>G. glabra</i> <sup>1</sup>	0.70 (0.64-0.73)	0.04	0.02	0.50 (0.46-0.52)	0.02	0.001	-29	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>P. altissimum</i> <sup>2</sup>	0.75 (0.71-0.82)	0.05	0.02	0.52 (0.48-0.57)	0.04	0.02	-31	3.5 <sup>e-6</sup>
	<i>P. suaveolens</i> <sup>2</sup>	0.73 (0.63-0.90)	0.1	0.05	0.40 (0.34-0.52)	0.07	0.03	-45	2 <sup>e-4</sup>
	<i>P. oblanceolata</i> <sup>3</sup>	0.64 (0.63-0.65)	0.01	0.004	0.48 (0.46-0.50)	0.01	0.006	-25	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>C. guianensis</i> <sup>3</sup>	0.55 (0.52-0.60)	0.03	0.01	0.39 (0.36-0.43)	0.03	0.01	-29	4.1 <sup>e-6</sup>
	<i>C. oblongifolia</i> <sup>3</sup>	0.55 (0.53-0.56)	0.01	0.005	0.40 (0.40-0.41)	0.005	0.002	-27	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>E. grandiflora</i> <sup>3</sup>	0.69 (0.64-0.76)	0.05	0.02	0.39 (0.18-0.47)	0.1	0.04	-43	1 <sup>e-4</sup>
Alta densidade (0.75-1.00)	Densidade básica(g/cm <sup>3</sup> )	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	p
	<i>C. villosum</i> <sup>1</sup>	0.76 (0.71-0.81)	0.03	0.01	0.42 (0.37-0.51)	0.06	0.02	-45	2.2 <sup>e-16</sup>
	<i>D. excelsa</i> <sup>2</sup>	0.91 (0.72-1.00)	0.1	0.06	0.60 (0.52-0.71)	0.09	0.04	-34	1 <sup>e-3</sup>
	<i>L. pisonis</i> <sup>3</sup>	0.75 (0.69-0.77)	0.03	0.01	0.48 (0.44-0.63)	0.07	0.03	-36	1.6 <sup>e-11</sup>
	<i>L. lurida</i> <sup>3</sup>	0.86 (0.84-0.88)	0.02	0.006	0.61 (0.41-0.81)	0.1	0.05	-29	6.1 <sup>e-5</sup>
	<i>P. rodolphii</i> <sup>3</sup>	0.77 (0.75-0.80)	0.02	0.008	0.60 (0.56-0.67)	0.05	0.02	-22	3.9 <sup>e-12</sup>
	<i>L. canescens</i> <sup>3</sup>	0.86 (0.78-0.90)	0.05	0.02	0.63 (0.55-0.75)	0.07	0.03	-29	7.8 <sup>e-5</sup>
	<i>M. elata</i> <sup>3</sup>	0.91 (0.88-0.94)	0.02	0.009	0.52 (0.49-0.55)	0.02	0.001	-43	2.2 <sup>e-16</sup>

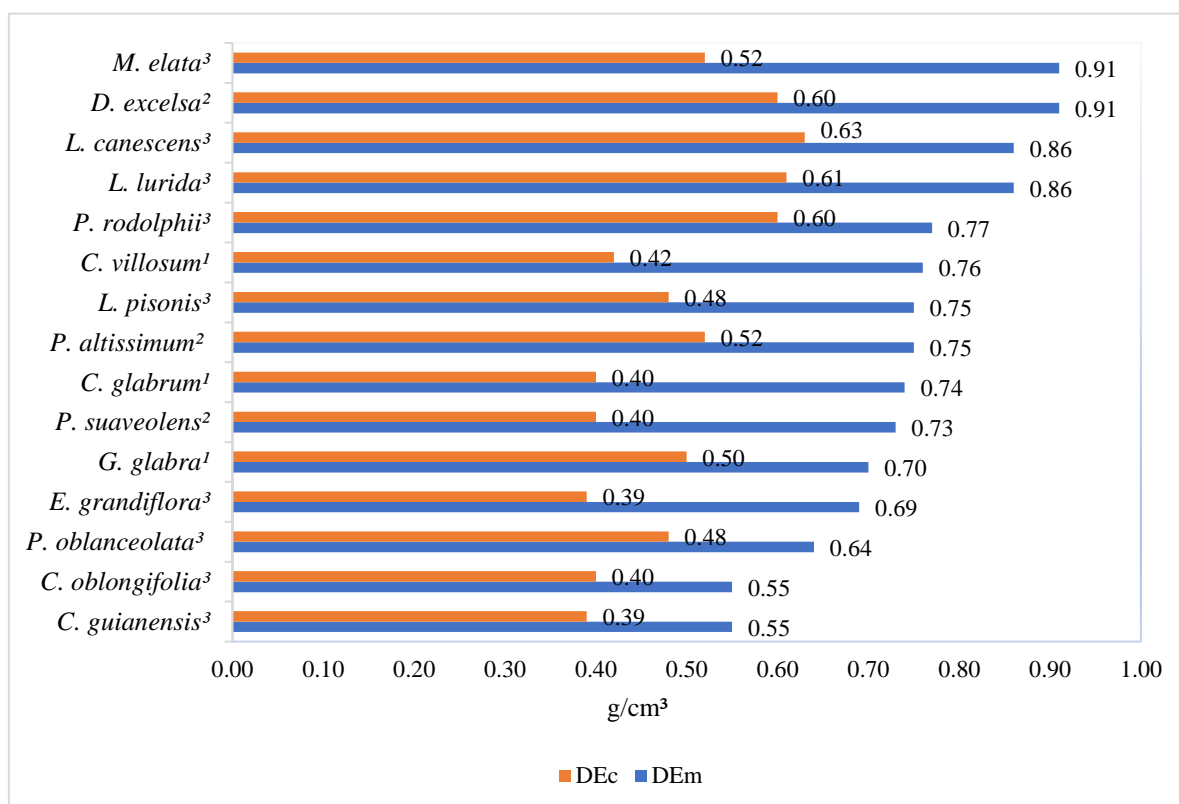
**Tabela 6.** Dados da densidade básica das espécies estudadas.

Onde: min: mínimo; máx: máximo; Re: Redução; Au: Aumento; DP: desvio padrão; EP: erro padrão; p; nível de significância entre madeira e carvão.

Parênquima axial apotraqueal<sup>1</sup>; Parênquima axial paratraqueal<sup>2</sup>; Parênquima axial em faixa<sup>3</sup>

Por outro lado, Lima *et al.*, 2011, verificaram que maiores densidades básicas estavam relacionadas à baixa frequência de poros e maiores diâmetros. No estudo feito por Pereira *et al.* (2016), também foi observado o mesmo resultado, constatou-se que madeiras contendo uma alta frequência de poros e menores diâmetros exibiram maiores densidades, enquanto o oposto também foi verdadeiro: clones com madeira de baixa frequência de poros e diâmetros maiores tiveram densidades maiores. No presente trabalho, foi possível verificar que *Dinizia excelsa*, *Parinari rodolphii* e *Licania canescens* tiveram baixa frequência de vaso e diâmetros maiores e apresentaram maiores densidade básica (Tabela 4).

Pereira *et al.* (2016) apontaram que a densidade básica é uma das propriedades físicas da madeira importante na seleção de espécies para a produção do carvão vegetal. A preferência deve ser dada a madeiras com maior densidade básica, uma vez que seu uso resulta em maior produção de carvão vegetal para um determinado volume de madeira utilizada no forno. Além disso, o produto obtido a partir dessas madeiras apresenta melhor qualidade para diversas finalidades.



**Figura 25.** Densidade da madeira e do carvão vegetal.

Onde: <sup>1</sup> Parênquima apotraqueal; <sup>2</sup> Parênquima paratraqueal; <sup>3</sup> Parênquima em faixa;  
DEc: Densidade do carvão; DEm: Densidade da madeira

A qualidade da madeira é influenciada pela interação de suas propriedades físicas, mecânicas, anatômicas e químicas. Dessa forma, outro fator que justifica a alta densidade de algumas espécies é o teor de lignina. Lima *et al.*, 2020, ao avaliarem o teor de lignina total de 20 das 15 espécies analisadas no presente estudo, verificaram que *Parinari*

*rodolphii*, *Dinizia excelsa* e *Licania canescens* apresentaram os maiores teores, respectivamente 38,1%, 37,6% e 36,6%.

Em termos gerais, após a carbonização tanto as espécies de média quanto as de alta densidade apresentaram uma proporção similar de diminuição na densidade (34%) (Tabela 6).

Perdigão *et al.* (2020) observaram diminuição da densidade da madeira após a carbonização de 31%, variando de 29% em *Eucalyptus* sp. híbrido, 30% em *Bertholletia excelsa* e 33% em *Swietenia macrophylla* e *Hevea brasiliensis*. Os autores mencionam que essas duas últimas espécies apresentaram menor densidade de madeira e, conseqüentemente, uma maior perda de massa, provavelmente devido ao baixo teor de lignina.

Durante o processo de carbonização, ocorre a degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira. As hemiceluloses são as primeiras a se degradarem, geralmente entre 200°C e 300°C, seguidas pela celulose acima de 240°C e pela lignina acima de 280°C (Browne 1958; Paris *et al.* 2005; Yang *et al.* 2006). Essa degradação resulta em perda de massa, especialmente até 300-350 °C (Prior e Gasson 1993; Kwon *et al.* 2009).

A densidade aparente ( $D_a$ ) do carvão vegetal apresentou variação de 0.39 g/cm<sup>3</sup> a 0.63 g/cm<sup>3</sup> (Figura 26). Lima *et al.*, 2022b, classificaram a densidade dos carvões em três classes, sendo: classe 1 ( $0.250 \leq D_a < 0.400$  g/cm<sup>3</sup>), classe 2 ( $0.400 \leq D_a < 0.550$  g/cm<sup>3</sup>) e classe 3 ( $\geq 0.550$  g/cm<sup>3</sup>). De acordo com essa classificação, as espécies do presente estudo podem ser classificadas de acordo com a figura 26.

As maiores densidades foram de *Licania canescens*, *Lecythis lurida*, *Parinari rodolphii* e *Dinizia excelsa*. Já as menores densidade foram de *Eschweilera grandiflora* e *Couratari guianensis*.



Após a carbonização, foi constatado que as espécies apresentaram redução significativa na densidade. Por exemplo, considerando *Manilkara elata*, apesar de possuir uma alta densidade na madeira, sofreu uma redução de -43% após o processo de carbonização (Tabela 6). A quantidade de lignina pode ter influenciado essa diferença. De acordo com o estudo realizado por Lima *et al.*, 2020, observou-se que *M. elata* apresentou um dos menores teores de lignina total quando comparado com *Dinizia excelsa* e *Licania canescens*.



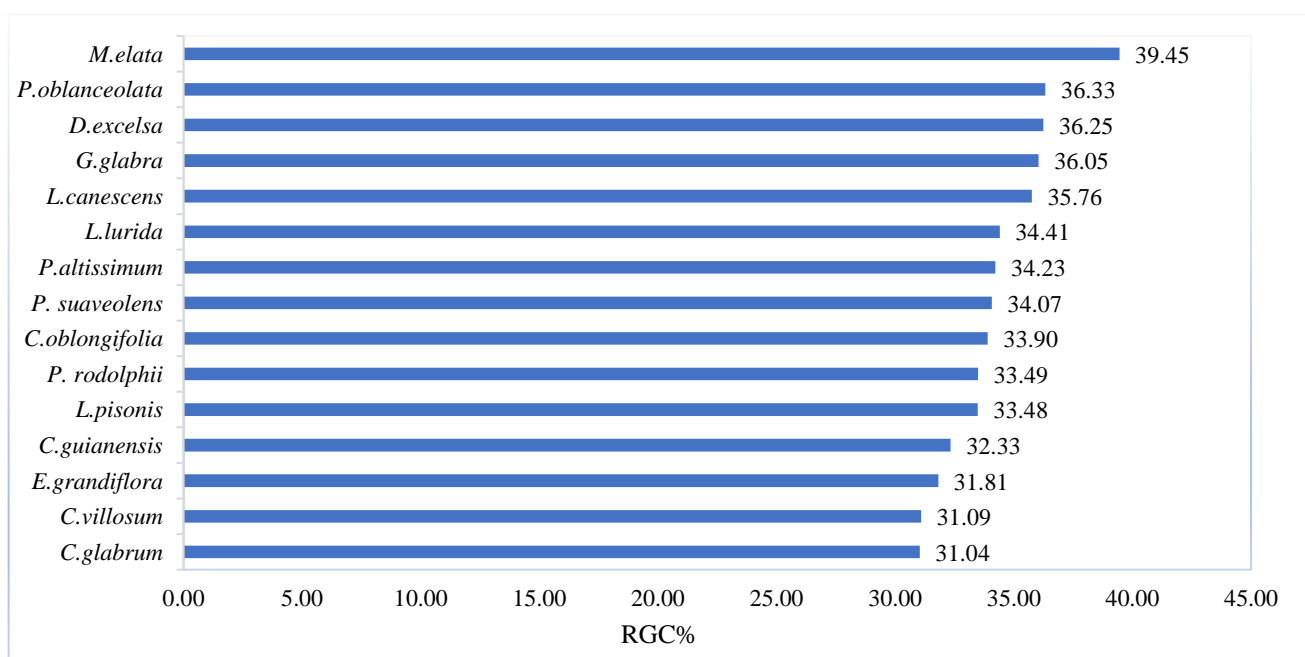
**Figura 26.** Classificação da densidade aparente do carvão vegetal das espécies estudadas.

### 3.4. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

O rendimento do carvão refere-se à proporção em massa do resíduo sólido restante ao final do processo de carbonização e varia de acordo com a espécie da matéria-prima da madeira e as condições operacionais utilizadas durante o processo, incluindo a temperatura de aquecimento (Kim e Kwon, 2015). Neste estudo, as três espécies que apresentaram maior rendimento gravimétrico foram *Manilkara elata*, *Pouteria*

*oblanceolata* e *Dinizia excelsa* com 39,45%, 36,33%, 36,25% respectivamente (Figura 27).

Estudos anteriores analisaram as alterações estruturais que ocorrem na madeira durante a carbonização. McGinnes *et al.* (1971), com o objetivo de avaliar a qualidade do carvão de *Quercus alba* L., submeteram amostras dessa madeira a temperaturas entre aproximadamente 270°C e 400°C. Os autores observaram que o rendimento após a carbonização variou de 41,5% a 34,5%. Em um estudo realizado por Kim e Hanna (2006) em *Quercus variabilis* foram observadas perdas de massa de 74,4%, 81,3% e 83,4% a 400°C, 600°C e 800°C, respectivamente. Osterkamp *et al.* (2018), ao avaliarem espécies de *Araucaria* spp., constataram uma perda de aproximadamente 80% a 300-350°C e 500°C.



**Figura 27.** Rendimento gravimétrico do carvão vegetal das espécies estudadas.

Onde: RGC: Rendimento Gravimétrico do Carvão

### 3.5. Agrupamento das espécies para madeira e o carvão vegetal.

Buscando agrupar as espécies e avaliar o comportamento destas antes e após a carbonização, foi utilizado a análise de componentes principais. A aplicação da análise

de componentes principais com base nos valores médios dos constituintes da madeira (Tabela 7), revelou que três componentes foram suficientes para explicar 75.3% da variabilidade dos dados. As variáveis que mais influenciaram cada um dos componentes principais foram: Componente principal 1 (PC1)- diâmetro de vaso, frequência de vaso e altura de raio; Componente principal 2 (PC2)- largura de raio e densidade básica; Componente principal 3 (PC3)- frequência de vaso, frequência de raio e largura de raio (Tabela 8). Na análise do autovetor, os sinais positivos ou negativos indicam o tipo de relação entre a variável e o componente principal

Espécies	DV	FV	FR	LR	AR	PO	DE
<i>Caryocar glabrum</i>	187	8	16	21	765	5	0.74
<i>Glabra glabra</i>	138	8	11	26	509	2	0.70
<i>Protium altissimum</i>	86	30	10	28	176	5	0.75
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	110	16	6	17	180	5	0.73
<i>Pouteria oblanceolata</i>	72	47	10	39	365	3	0.64
<i>Couratari guianensis</i>	147	7	8	44	747	8	0.55
<i>Couratari oblongifolia</i>	138	8	8	63	455	3	0.55
<i>Eschweilera grandiflora</i>	147	12	11	31	336	6	0.69
<i>Caryocar villosum</i>	189	12	12	64	421	5	0.76
<i>Dinizia excelsa</i>	191	4	6	55	280	3	0.91
<i>Lecythis pisonis</i>	139	15	6	39	362	5	0.75
<i>Lecythis lurida</i>	106	14	6	48	342	4	0.86
<i>Parinari rodolphii</i>	227	2	11	15	418	7	0.77
<i>Licania canescens</i>	163	4	15	13	486	4	0.86
<i>Manilkara elata</i>	87	29	9	34	318	3	0.91

**Tabela 7.** Valores médios dos parâmetros quantitativos da madeira.

Onde: DV: Diâmetro de vaso ( $\mu\text{m}$ ); FV: Frequência de vaso ( $\mu\text{m}$ ); FR: Frequência de raio ( $\mu\text{m}$ ); LR: Largura de raio ( $\mu\text{m}$ ); AR: Altura de raio ( $\mu\text{m}$ ); PO: Diâmetro da pontuação ( $\mu\text{m}$ ); DE: Densidade básica da madeira ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Espécies com baixos escores para PC1, provavelmente, apresentam maior diâmetro de vaso, maior altura de raio e menor frequência de vaso. Por outro lado, maiores escores para PC1 devem indicar espécies com menor diâmetro de vaso, menor altura de raio e maior frequência de vaso. Escores positivos (maiores escores) para PC2 indicam

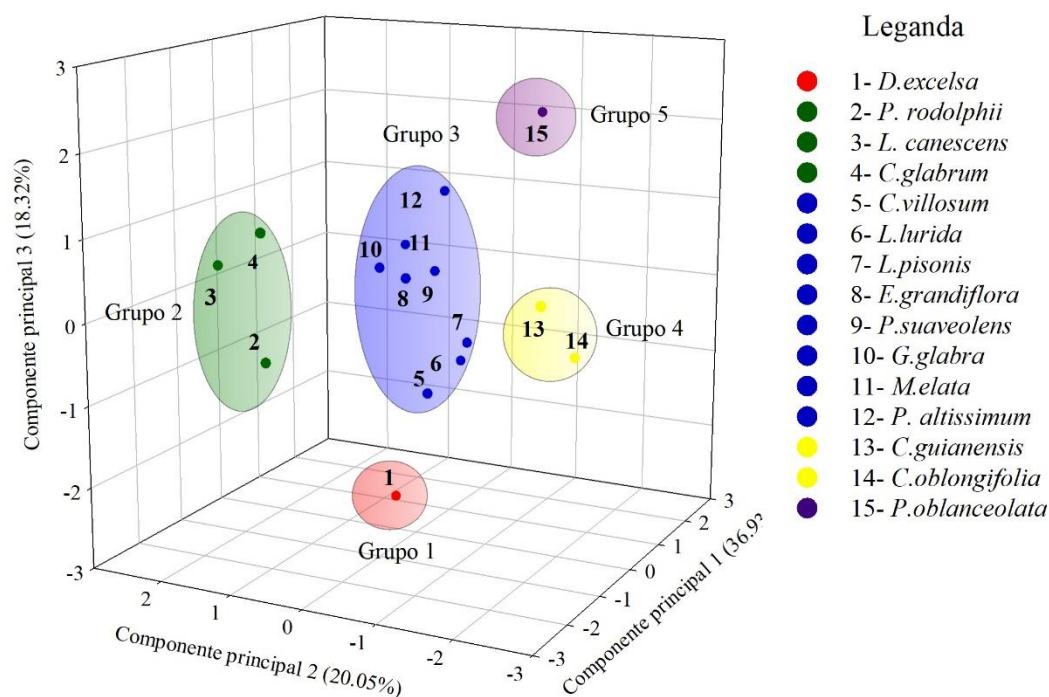
madeiras de média densidade básica e menor largura de raio. Escores negativos (menores escores) para PC2 indicam madeiras de alta densidade e maior largura de raio. Para a PC3, com escores positivos para frequência de vaso e raio, as espécies apresentaram menor frequência. Escores negativo para largura de raio, maior largura de raio.

Variável	PC1 (36.93%)	PC2 (20.05%)	PC3 (18.32%)
Diâmetro de vaso	<b>-0.5225*</b>	0.0978	-0.3830
Frequência de vaso	<b>0.4781*</b>	-0.0309	<b>0.4675*</b>
Frequência de raio	-0.3581	0.3372	<b>0.4546*</b>
Largura de raio	0.1508	<b>-0.5431*</b>	<b>-0.4556*</b>
Altura de raio	<b>-0.4661*</b>	-0.2475	0.2453
Ø Pontoação	-0.3437	-0.2279	0.1031
Densidade básica	0.1096	<b>0.6838*</b>	-0.3870

**Tabela 8.** Autovetores dos três primeiros componentes principais para as características da madeira.

\* Variáveis com contribuição significativa nos componentes principais.

Com base na análise da dispersão dos escores das espécies estudadas em função das componentes principais foi possível identificar cinco grupos distintos de espécies com constituintes da madeira e densidade básica semelhantes (Figura 28). O grupo 1 composto por *Dinizia excelsa* apresentou maior distinção em relação as demais espécies devido a combinação de alta densidade, maior diâmetro de vaso, menor frequência de vasos e menor frequência de raios.



**Figura 28.** Agrupamento multivariado dos constituintes da madeira das espécies estudadas

O grupo 2, formado por *Parinari rodolphii*, *Licania canescens* e *Caryocar glabrum*, apresentou maiores diâmetros de vaso, menor frequência de vaso e menor largura de raio. O grupo 3 (*Caryocar villosum*, *Lecythis lurida*, *Lecythis pisonis*, *Eschweilera grandiflora*, *Pseudopiptadenia suaveolens*, *Goupia glabra*, *Manilkara elata* e *Protium altissimum*) revelou menores diâmetros de vaso, alta frequência de vaso e alta frequência de raios.

O grupo 4 compostos por *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia* foi formado por terem menor densidade, maiores largura de raio e menor frequência de raio. O grupo 5 composto apenas por *Pouteria oblanceolata* apresentou alta frequência de vaso e menor diâmetro de vaso.

Após a carbonização o agrupamento das espécies mudou consideravelmente. A análise dos componentes principais por meio dos valores quantitativos médios do carvão vegetal (Tabela 9), mostrou que três componentes foram necessários para explicar 77.52% da variabilidade dos dados (Tabela 10).

Espécies	DV	FV	FR	LR	AR	PO	DE
<i>Caryocar glabrum</i>	119	11	7	29	602	2	0.40
<i>Glabra glabra</i>	88	13	9	25	394	3	0.50
<i>Protium altissimum</i>	58	27	10	24	177	5	0.52
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	92	21	8	13	198	4	0.40
<i>Pouteria oblanceolata</i>	61	87	11	23	308	4	0.48
<i>Couratari guianensis</i>	120	14	9	37	652	3	0.39
<i>Couratari oblongifolia</i>	131	13	11	43	454	2	0.40
<i>Eschweilera grandiflora</i>	131	12	13	24	315	3	0.39
<i>Caryocar villosum</i>	146	5	10	27	516	3	0.42
<i>Dinizia excelsa</i>	92	21	8	13	198	4	0.40
<i>Lecythis pisonis</i>	128	9	7	30	257	2	0.60
<i>Lecythis lurida</i>	180	5	8	23	214	2	0.48
<i>Parinari rodolphii</i>	96	29	7	29	303	2	0.61
<i>Licania canescens</i>	167	4	16	10	349	3	0.60
<i>Manilkara elata</i>	122	5	15	10	345	2	0.63

**Tabela 9.** Valores médios dos parâmetros quantitativos do carvão.

Onde: DV: Diâmetro de vaso ( $\mu\text{m}$ ); FV: Frequência de vaso ( $\mu\text{m}$ ); FR: Frequência de raio ( $\mu\text{m}$ ); LR: Largura de raio ( $\mu\text{m}$ ); AR: Altura de raio ( $\mu\text{m}$ ); PO: Diâmetro da pontuação ( $\mu\text{m}$ ); DE: Densidade básica da madeira ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Escores positivos (maiores escores) indicam valores inversos, ou seja, para PC1 o diâmetro da pontuação será menor. Já para escores negativos, as espécies apresentaram maiores diâmetros de vaso e altura de raio. Para PC2 indicam madeiras com maior frequência de raio, menor largura de raio e alta densidade. Já para a PC3, escore negativo para densidade aponta para madeiras de alta densidade, escores positivos espécies com baixa frequência raio e menores diâmetros da pontuação (Tabela 10).

Variável	PC1 (33.54%)	PC2 (28.62%)	PC3 (15.36%)
Diâmetro de vaso	<b>-0.4618*</b>	-0.3718	0.1498
Frequência de vaso	<b>0.4370*</b>	0.3577	-0.0210
Frequência de raio	0.1222	<b>-0.4271*</b>	<b>0.6233*</b>
Largura de raio	-0.3638	<b>0.4753*</b>	-0.1692
Altura de raio	<b>-0.4564*</b>	0.2274	0.3462



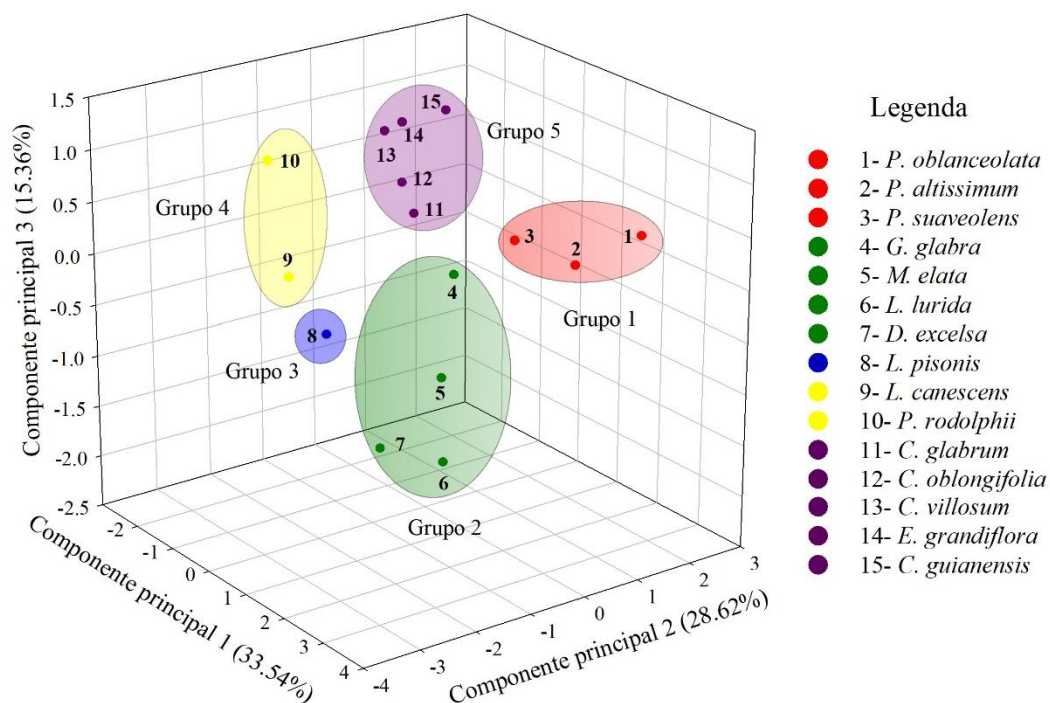
Ø Pontoação	<b>0.4337*</b>	0.2452	<b>0.4725*</b>
Densidade básica	0.2282	<b>-0.4623*</b>	<b>-0.4656*</b>

**Tabela 10.** Autovetores dos três primeiros componentes principais para o carvão vegetal.

\* Variáveis com contribuição significativa nos componentes principais.

Os grupos formados após a carbonização estão apresentados na figura 29. O grupo 1 composto por *Pouteria oblanceolata*, *Protium altissimum* e *Pseudopiptadenia suaveolens*, tiveram menor diâmetro de vaso, maior frequência de vaso e maior diâmetro da pontuação.

O grupo 2 formado por *Goupia glabra*, *Manilkara elata*, *Lecythis lurida* e *Dinizia excelsa*, apresentaram alta densidade, maior largura de raio, menor diâmetro de vaso e maior frequência de vaso. O grupo 3 (*Lecythis pisonis*), apresentou maior diâmetro de vaso e menor frequência de vaso



**Figura 29.** Agrupamento multivariado dos constituintes do carvão das espécies estudadas.

O grupo 4 (*Licania canescens* e *Parinari rodolphii*), tiveram alta densidade, alta frequência de raio, menor largura de raio. O grupo 5 composto por *Caryocar glabrum*, *Couratari oblongifolia*, *Caryocar villosum*, *Eschweilera grandiflora* e *Couratari guianensis* apresentaram menor densidade, maior altura de raio, maior largura de raio.

Após a carbonização ocorreram mudanças nos agrupamentos de algumas espécies. *Dinizia excelsa*, anteriormente separada das demais devido à sua elevada densidade, agora se reuniu com outras espécies de menor densidade. Isso se deve à considerável perda de massa sofrida após a madeira ser carbonizada. *Caryocar villosum* e *Caryocar glabrum*, anteriormente agrupados separadamente, após a carbonização formaram um único grupo. Observou-se que após a carbonização de *C. villosum* as espécies tiveram densidade aparente semelhantes, 0.42 g/cm<sup>3</sup> e 0.40 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

*Pouteria oblanceolata* se reagrupou com *Protium altissimum* e *Pseudopiptadenia suaveolens* (Figura 29), mesmo apresentando elevada frequência de vasos. Esse agrupamento provavelmente ocorreu, pois, as três espécies tiveram maiores diâmetro da pontuação após a carbonização. *Lecythis pisonis* se agrupou em único grupo (Figura 4). Isso ocorreu porque entre todas as espécies estudadas, esta foi a única a ter considerável expansão dos vasos após a carbonização.

#### **4. Conclusão**

Em todas as espécies estudadas, foram observadas variações morfométricas na anatomia do lenho. A conversão da madeira em carvão provocou variação nas seguintes características:

- Diâmetro tangencial de vaso foram reduzidos em 11 das 15 espécies estudadas. Em *Lecythis pisonis* ocorreu aumento de 29% e em *Couratari oblongifolia*, *Eschweilera grandiflora* e *Lecythis lurida* não houve diferença estatística.
- A frequência de vasos aumentou na maioria dos indivíduos analisados, porém reduziu consideravelmente em *Lecythis pisonis*, *Caryocar villosum* e *Manilkara elata*. Este efeito foi ocasionado por diversas rachaduras no sentido raio.
- A frequência de raios após a carbonização aumentou significativamente em apenas seis espécies. *Caryocar glabrum*, *Caryocar villosum* e *Goupia glabra* apresentaram redução significativa. Observou-se que nestas espécies houve diversas rachaduras no sentido do raio impedindo a contagem.
- A largura dos raios reduziu em 12 das 15 espécies estudadas. Apenas em *Caryocar glabrum* houve expansão significativa.
- A altura dos raios reduziu em apenas cinco espécies após o processo de carbonização e aumentou para 23% em *Caryocar villosum*.
- O diâmetro da pontoação intervascular reduziu na maioria das espécies, apresentando aumento significativo apenas em *G. glabra* e *Pouteria oblanceolata*.
- A redução da densidade foi observada em todos os indivíduos estudados.

O rendimento gravimétrico variou entre 31.04 e 39.05%. As espécies com menores rendimentos foram *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* e *Dinizia excelsa* com 39,45%, 36,33%, 36,25% respectivamente. Não foi observado um padrão de contração ou aumento considerando espécies de média e alta densidade. Neste estudo as espécies de média densidade reduziram mais do que as de alta densidade. Da mesma forma, não se observou relação quando a contração em espécies com maior quantidade de parênquima. De maneira geral, o efeito da carbonização foi bastante variável, mesmo em

espécies do mesmo gênero. Estudos posteriores precisam ser realizados para compreender melhor o efeito da carbonização na anatomia da madeira.

## Referências

Andrade, F. W. C.; Filho, M. T.; Moutinho, V. H. P. 2018. Influence of wood physical properties on charcoal from Eucalyptus spp. *Floresta e Ambiente*. 25 (3): 1-8. DOI: 10.1590/2179-8087.017615

Braga Junior MM, Matos TS, De Andrade GM, Dos Santos LDJ, Vieira ALM, Gonçalves TAP, Nisgoski S, Pereira Motta J, Melo LEDL. 202. Forestry control in the Brazilian Amazon: Charcoal anatomy of tree species from protected areas. *Aust. J. Bot.* 70 (1): 13–31. DOI: 10.1071/BT21062

Braga Júnior MM, Santana D da SS de, Rêgo GL, Souza FIB de, Melo LE de L. 2019. Effects of carbonization in the anatomical structure of *Alexa grandiflora*'s Ducke wood. *Rev. Ciências Agrárias* 62 DOI: 10.22491/rca.2019.3027.

Browne, C. F. L. 1958. Theories of the combustion of wood and its control: A Survey of the Literature. p. 1-69.

EPE. Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021 - Relatório Final. p. 264, 2022.

Gasson, P.; Cartwright, C.; Leme, C. L. DI. 2017. Anatomical changes to the wood of *Croton sonderianus* (Euphorbiaceae) when charred at different temperatures. *IAWA Journal*. 38 (1): 117–123. DOI: 10.1163/22941932-20170161.

Gonçalves, T. A. P.; Marcati, C. R.; Scheel-Ybert, R. The Effect of Carbonization on Wood Structure of. *IAWA Journal*. 33 (1): 73–90.

Jahirul MI et al. 2012. Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review. *Energies* 5 (12): 4952–5001. DOI: 10.3390/en5124952

Johansen, D.A. 1940. *Plant microtechnique*. New York: McGraw-Hill, 523p.

Kim DY, Kwon GJ, Kang JH. 2015. Dependence of the characteristics of wood charcoal on the carbonization conditions. *J. Korean Phys. Soc.* 67 (4): 694–699. DOI: 10.3938/jkps.67.694

Kim, N. H.; Hanna, R. B. 2006. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures. *Wood Science and Technology*. 40 (5): 392–401. DOI: 10.1007/s00226-005-0062-5.

Kwon, S. M.; Kim, N. H.; Cha, D. S. 2009. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. *Wood Science and Technology*. 43 (5): 487–498. DOI: 10.1007 / s00226-009-0245-6.

Lima IL, Garcia R, Longui EL, Florsheim SMB. 2011. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. *Sci. For. Sci.* (89): 61–68.

Lima MDR et al. 2020. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy* 140 (December 2019) DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105660

Lima MDR et al. 2022a. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renew. Energy* 193: 584–594. DOI: 10.1016/j.renene.2022.05.048

Lima MDR, Massuque J, Bufalino L, Trugilho PF, Ramalho FMG, Protásio T de P, Hein PRG. 2022b. Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 166 (July) DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105636

Mancini M, Rinnan. 2021. Near infrared technique as a tool for the rapid assessment of waste wood quality for energy applications. *Renew. Energy* 177: 113–123. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.137

McGinnes EA, Kandeel SA, Szopa PS. Some structural changes observed in the transformation of wood into charcoal. *Wood Fiber Sci.* 3: 77–83. 1971.

Meira AM et al. 2021. Insights into the reuse of urban forestry wood waste for charcoal production. *Clean Technol. Environ. Policy* 23 (10): 2777–2787. DOI: 10.1007/s10098-021-02181-1

Moreno AI, Font R. 2015. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 113: 464–473. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.03.008

Muñiz GIB, Carneiro ME, Batista FRR, Schardosin FZ, Nisgoski S. 2016. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. *Maderas Cienc. y Tecnol.* 18 (3): 505–522. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000045

Muñiz GIB, França RF, Fiorese AE, Nisgoski S. 2013. Análisis de la estructura anatómica de la madera y del carbón de dos especies de sapotaceae. *Maderas Cienc. y Tecnol.* 15 (3): 311–320. DOI: 10.4067/S0718-221X2013005000024

MUÑIZ, G. I. B. et al. Charcoal anatomy of forest species. *Cerne*, v. 18, n. 3, p. 471–477, 2012.

Muniz, G. I. B. et al. 2016. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. *Maderas: Ciencia y Tecnologia.* 18 (3): 505–522.

Nisgoski, S. et al. 2019. Impact of carbonization parameters on anatomic aspects and near-infrared spectra of three species from Mozambique. *Wood Science and Technology.* 53 (6): 1373–1394.

Nisgoski, S. et al. 2014. Influence of carbonization temperature on the anatomical characteristics of *Ocotea porosa* (Nees & Mart. Ex Nees) L. Barroso. *Wood Science and Technology.* 48 (2): 301–309.

Oliveira RS et al. 2019. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. *Rev. Ciências Agrárias* 62: 1–9. DOI: 10.22491/rca.2019.3017

Osterkamp, I. C. et al. 2018. Changes of wood anatomical characters of selected species of *araucaria* during artificial charring: Implications for palaeontology. *Acta Botanica Brasilica.* 32 (2): 198–211.

Paradella WR et al. 2015. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Eng. Geol.* 193: 61–78. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.04.015



Paris, O; Zollfrank, C; Zickler, G. A. 2005. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers-a microstructural study of softwood pyrolysis. *Carbon*. 43: 53-66.

Paula JE. 2005. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do Cerrado, visando sua utilização na produção de energia. *Rev. Cern*. 11 (1): 90–100.

Perdigão, C. R. V. et al. 2020. Forestry control in the Brazilian Amazon I: Wood and charcoal anatomy of three endangered species. *IAWA Journal*. 41 (4): 490–509. DOI: 10.1163/22941932-bja10058

Pereira, B. L. C. et al. 2016. Effect of wood carbonization in the anatomical structure and density of charcoal from Eucalyptus. *Ciencia Florestal*. 26 (2): 545–557. DOI: 10.5902/1980509822755

Prior J, Gasson P. Anatomical changes on six African hardwoods. *IAWA J*. 14: 77–86. 1993.

Rodríguez-Rodríguez RM et al. 2021. Native arbuscular mycorrhizal fungi respond to rehabilitation in iron ore mining areas from the Eastern Brazilian Amazon. *Pedobiologia (Jena)*. 89 (August) DOI: 10.1016/j.pedobi.2021.150768.

Silva, L. F. F. DA et al. 2020. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. *Pesquisa Florestal Brasileira*. 40: 1-11. DOI: 10.4336/2020.pfb.40e201801737

SINDIFER. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. 2021. Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil. *Anuário Estatístico*.

Stange, R. et al. 2018. Wood and charcoal anatomy of four myrtaceae species. *Cerne*. 24 (3): 190–200. DOI: 10.1590/01047760201824032552

Yang, H et al. 2006. In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose and Lignin. *Energy & Fuel*. 20: 388-393. DOI: 10.1021/ef0580117

## CONCLUSÕES GERAIS

As características diagnosticáveis como agrupamentos de vasos, tipo de parênquima axial e em alguns casos placas de perfuração, raios exclusivamente unisseriados foram fundamentais para subsidiar e identificar a madeira e o carvão. A respeito das alterações que ocorreram após a carbonização, observou-se que houve alterações morfológicas em todas as espécies. O diâmetro de vaso reduziu em 11 espécies. A frequência de vasos aumentou na maioria dos indivíduos analisados. A largura dos raios reduziu em 12 das 15 espécies. O rendimento gravimétrico variou entre 31.04 e 39.05%. As espécies com maiores rendimentos foram *Manilkara elata*, *Pouteria oblanceolata* e *Dinizia excelsa* com 39,45%, 36,33%, 36,25% respectivamente. Não foi observado padrão de contração ou aumento para os parâmetros quantitativos da madeira após a carbonização, considerando espécies de média e alta densidade e abundância de parênquima. De maneira geral, o efeito da carbonização foi bastante variável, mesmo em espécies do mesmo gênero.

Estudos posteriores precisam ser realizados para compreender melhor o efeito da carbonização na anatomia da madeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, J. S. et al. Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, v. 379, n. 6630, 2023.

ALVES, D. S; MORTON, D. C; BATISTELLA, M; ROBERTS, D. A; JUNIOR SOUZA, C. 2009. The Changing Rates and Patterns of Deforestation and Land Use in Brazilian Amazonia.

ASSIS, M. R. et al. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Science and Technology*, v. 50, n. 3, p. 519–536, 2016.

ATZBERGER, C; ZEUG, G; DEFURNY, P; ARAGÃO, L; HAMMARSTRÖM, L; IMMITZER, M. 2020. Monitoring of Forests through Remote Sensing.

Publications Office of the European Union. DOI: 10.2779/175242.Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series 186: 11-23. DOI: 10.1029/2008GM000722.

BODIN, S. C. et al. CharKey : uma chave de identificação eletrônica para carvão vegetal da guiana francesa. 2019.

BOURGOIN, C; BLANC, L; BAILLY, J.-S; CORNU, G; BERENQUER, E; OSZWALD, J; TRITSCH, I; LAURENT, F; HASAN, A.F; SIST, P; GOND, V. 2018. The Potential of Multisource Remote Sensing for Mapping the Biomass of a Degraded Amazonian Forest. *Forests*. 9; 303. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9060303>

BRAGA JUNIOR, M. M.; SOUZA, F. I. B; MELO, L. E. L. Forestry control in the Brazilian Amazon II: Charcoal anatomy of 21 species. *IAWA Journal*, v. 42, n. 3, p. 299–321, 2021.

CARVALHO, W.D; MUSTIN, K; HILÁRIO, R. R; VASCONCELOS, I. M; EILERS, V; FEARNside, P. M. 2019. Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. *Perspectives in ecology and conservation*

COSTA, G. T. et al. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. *Cerne*, v. 20, n. 1, 2014. DOI: 10.1590/S0104-77602014000100005.

MEIRA, A. M. et al. Insights into the reuse of urban forestry wood waste for charcoal production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 23, n. 10, p. 2777–2787, 2021.

DORMONTT, E. E et al. 2015. Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging. *Biological Conservation*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.038>.

FEARNside, P. M. 2017. Deforestation of the Brazilian Amazon. In: H. Shugart (ed.) *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press, New York, USA. Doi:10.1093/acrefore/9780199389414.013.102.

GONÇALVES, T. A. P.; MARCATI, C. R.; SCHEEL-YBERT, R. the Effect of Carbonization on Wood Structure of. *IAWA Journal*, v. 33, n. 1, p. 73–90, 2012.

HASAN, A. F; LAURENT, F; MESSNER, F; BOURGOIN, C; BLANC, L. 2019. Cumulative disturbances to assess forest degradation using spectral unmixing in the northeastern Amazon. *Applied Vegetation Science* 22: 394-408. DOI: 10.1111/avsc.12441.

HILLIG, É.; DIGNER, T.; DIAS, A. N. Propriedades físico-mecânicas da madeira de uva-do-japão. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 38, p. 1–6, 2018.

JESUS, M. S. et al. Energy characterization of different species of Eucalyptus.

Floresta, v. 47, n. 1, p. 11–16, 2017.

KIM, N-H; HANNA, R. B. 2006. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures. *Wood Sci Technol*, v. 40, p. 392-401, 2006.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6630, 2023.

LEITE, E. R. et al. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. *Coffee Science*, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015. DOI: 10.25186/cs.v10i2.881.

LIMA, M. D. R et al. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, v. 140, n. December 2019, 2020.

LIMA, M. D. R. et al. Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 166, n. July, 2022b.

LIMA, M. D. R. et al. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy*, v. 193, p. 584–594, 2022a.

LOWE, A. J. et al. Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. *BioScience*, v. 66, n. 11, p. 990–998, 2016.

MANCINI, M.; RINNAN. Near infrared technique as a tool for the rapid assessment of waste wood quality for energy applications. *Renewable Energy*, v. 177, p. 113–123, 2021.

MCGINNES, E. A. J; KADEEL, S. A; SZOPA, P. S. Some structural changes observed in the transformation of wood into charcoal. *Journal of the Society of Wood Science and Technology*. v. 3, n. p. 77-83, 1971.

MORENO, A. I.; FONT, R. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 113, p. 464–473, 2015.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do Cerrado, visando sua utilização na produção de energia. *Revista Cerne*, v. 11, n. 1, p. 90–100, 2005.

PERDIGÃO, C. R. V et al. Forestry control in the Brazilian Amazon I: wood and charcoal anatomy of three endangered species. *IAWA Journal*, v. 41, p. 490-509, 2020.

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

SILVA, R. C. DA et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 38, p. 1–10, 2018.

SOUZA REIS, A. R. et al. The quality of artisanal charcoal sold for domestic use in Tucuruí municipality in the Brazilian Amazon. *International Wood Products Journal*, v. 13, n. 4, p. 211–218, 2022.