



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JAILY KERLLER BATISTA DE ANDRADE

**PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE PAU-MULATO
(*Calycophyllum spruceanum* Benth.) DE PLANTIO EXPERIMENTAL**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES
JULHO – 2016

JAILY KERLLER BATISTA DE ANDRADE

**PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE PAU-MULATO
(*Calycophyllum spruceanum* Benth.) DE PLANTIO EXPERIMENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marina Donária Chaves Arantes.
Coorientadores: Prof. Dr. Juarez Benigno Paes, Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

JULHO – 2016

A553p Andrade, Jaily Kerller Batista de, 1989-
Propriedades da madeira e do carvão vegetal de pau-mulato
(*Calycophyllum spruceanum* Benth.) de plantio experimental /
Jaily Kerller Batista de Andrade. – 2016.
61f. : il.

Orientador: Marina Donária Chaves Arantes.

Coorientador: Juarez Benigno Paes ; Fabricio Gomes Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Biomassa. 2. Espécie florestal. 3. Carbonização. 4. Carvão vegetal. 5. Plantio experimental. 6. Amazônia. I. Arantes, Marina Donária Chaves. II. Paes, Juarez Benigno. III. Gonçalves, Fabricio Gomes. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

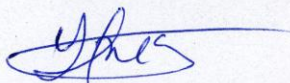
CDU: 630

**PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE PAU-MULATO
(*Calycophyllum spruceanum* Benth.) DE PLANTIO EXPERIMENTAL**

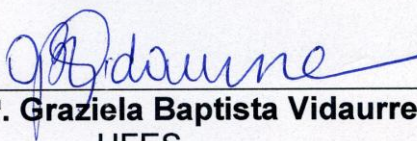
Jaily Kerller Batista de Andrade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 15 de julho de 2016.



Dr. Yonny Martinez Lopez
UFES
Examinador Externo



Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre
UFES
Examinadora Interna



Profª. Drª. Marina Donária Chaves Arantes
UFES
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui, meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma com o desenvolvimento dessa pesquisa. Sua realização não teria sido possível sem o apoio de vocês. Agradeço de modo especial:

À Embrapa Acre pela disponibilização do material referente a esta pesquisa, mais especificamente ao pesquisador Luis Cláudio de Oliveira e ao analista Robert Morais Thompson;

À Universidade Federal do Espírito Santo, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade de cursar o mestrado;

Aos meus pais João Claudino de Andrade e Anita Batista de Andrade (*in memorian*) por todos os ensinamentos e por trabalharem para que eu pudesse chegar até aqui;

À professora Marina Donária Chaves Arantes, minha orientadora; pela confiança e ensinamentos repassados ao longo do curso, os quais contribuíram significativamente para minha formação acadêmica;

Aos professores Juarez Benigno Paes, Fabricio Gomes Gonçalves e José Tarcísio de Oliveira pelo incentivo e sugestões de melhoria deste trabalho;

À banca examinadora, composta pela professora Graziela Baptista Vidaurre e o pesquisador Yonny Martínez López pelas valiosas contribuições;

À colega de curso Sandra Bezerra da Silva pela amizade e ajuda no desenvolvimento da pesquisa, me auxiliando sempre nas análises;

À Quetila Souza Barros, Raielle Freire e Marciel Souza Carvalho pela disponibilidade e ajuda na coleta em campo da madeira;

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, especialmente à Elecy Constantino, José Geraldo e aos técnicos de laboratório Gilson Barbosa, Luciano Dias e Damielle Leite, que me auxiliaram no decorrer das análises;

À Rafael Almeida, Anderson Bruno, Caio Dantas e Cássio Kennedy pela amizade e por me apoiarem em todos os momentos;

E aos colegas da República, Pedro Nicó, Anderson Firmino, Saulo Boldrini, José Clailson, Leandro Soares e Flávio Cipriano pela convivência e por se tornarem minha família durante esses dois anos.

“Construí amigos, enfrentei derrotas, venci obstáculos, bati na porta da vida e disse-lhe: Não tenho medo de vivê-la.”

Augusto Cury,
O vendedor de sonhos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo geral	10
1.1.1 Objetivos específicos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Características da espécie <i>Calycophyllum spruceanum</i> Benth.	11
2.2 Características da madeira	14
2.2.1 Colorimetria da madeira	14
2.2.2 Anatomia, densidade e retratibilidade da madeira	16
2.3 Carbonização da madeira	17
2.4 Carvão vegetal e parâmetros de qualidade	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Descrição do plantio, localização e processo de amostragem	21
3.1.1 Variáveis dendrométricas	23
3.2 Descrição anatômica, densidade e retratibilidade da madeira	23
3.3 Composição química e poder calorífico superior da madeira	25
3.4 Colorimetria da madeira	26
3.5 Carbonização e qualidade do carvão vegetal	27
3.6 Análise estatística dos dados	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Variáveis dendrométricas	30
4.2 Colorimetria da madeira	31
4.3 Características gerais e descrição macroscópica	33
4.4 Descrição microscópica	33
4.4.1 Mensuração dos vasos	35
4.4.2 Mensuração das fibras	37
4.4.3 Mensuração do parênquima radial	39
4.5 Retratibilidade e densidade básica	41
4.6 Caracterização química e energética da madeira	43
4.7 Propriedades avaliadas do carvão vegetal	46
5 CONCLUSÕES	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

RESUMO

ANDRADE, Jaily Kerller Batista de. **PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE PAU-MULATO (*Calycophyllum spruceanum* Benth.) DE PLANTIO EXPERIMENTAL**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marina Donária Chaves Arantes, Coorientadores: Prof. Dr. Juarez Benigno Paes, Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves.

Pau-mulato (*Calycophyllum spruceanum* Benth.) é uma espécie florestal nativa da região Amazônica, de rápido crescimento, que produz madeira densa e de alto poder calorífico. Tais características são desejáveis para produção de carvão vegetal, entretanto, estudos da madeira para sua produção são escassos, sendo necessária a caracterização adequada desse material a fim de conhecer melhor suas propriedades para uso energético. Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a madeira e carvão vegetal produzido de pau-mulato. O material foi coletado em um plantio experimental da Embrapa Acre, localizado no município de Rio Branco, AC, composto por 300 árvores com idade de seis anos, plantadas em espaçamento de 3 x 2 m. Para a caracterização da madeira, foram analisadas a composição química e energética; variação longitudinal das características anatômicas, colorimétricas, densidade e retratibilidade. Além disso, foram testadas três marchas de carbonização em laboratório para determinação do rendimento em carvão, gases condensáveis, não condensáveis; densidade aparente e energética; análise química imediata e poder calorífico superior do carvão produzido. Observou-se que as propriedades anatômicas, físicas e colorimétricas da madeira variaram no sentido longitudinal. Por terem apresentado maiores resultados de rendimento em carvão, poder calorífico superior, densidade aparente e energética, baixo teor de cinzas; as marchas que possuíram menores taxas de aquecimento foram consideradas melhores para a produção de carvão vegetal. Estudos sobre as características dessa espécie florestal contribuirão com o conhecimento científico, tornando uma ferramenta considerável para valorização e comercialização da madeira.

Palavras-Chave: Biomassa, Espécie Florestal, Carbonização.

ABSTRACT

ANDRADE, Jaily Kerller Batista de. **PROPERTIES OF WOOD AND CHARCOAL OF PAU-MULATO (*Calycophyllum spruceanum* Benth.) OF EXPERIMENTAL PLANTING**. 2016. Dissertation (Master's degree in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Advisor: Prof. D. Sc. Marina Donária Chaves Arantes. Co-advisors: Prof. D. Sc. Juarez Benigno Paes, Prof. D. Sc. Fabricio Gomes Gonçalves.

Calycophyllum spruceanum is a native tree species in the Amazon region, rapidly growing, producing dense, high calorific wood. These characteristics are desirable for the production of charcoal, however, studies of wood for their production are scarce, requiring an adequate characterization of this material in order to better understand their properties for energy use. Therefore, the objective of this study was to characterize the wood and charcoal produced *Calycophyllum spruceanum*. The material was collected in an experimental planting of Embrapa Acre, located in Rio Branco, AC, consisting of 300 trees aged six, planted at spacing of 3 x 2 m. For the characterization of wood were analyzed chemical composition and energy; longitudinal variation of the anatomical characteristics, colorimetric, density and shrinkage. In addition, we tested three carbonization marches in the laboratory to determine the charcoal yield, condensable gases, non-condensable; and apparent energy density; chemical analysis and gross calorific value of coal produced. It was observed that anatomical, physical and colorimetric properties of wood vary in the longitudinal direction. Because they have shown higher results charcoal yield, higher calorific value, density and energy, low ash content; marches that possessed lower heating rates were considered best for the production of charcoal. Studies on the characteristics of this forest species will contribute to scientific knowledge, making a considerable tool for recovery and sale of wood.

Keywords: Biomass, Forest Species, carbonization.

1 INTRODUÇÃO

A biomassa florestal é definida como todo material de origem orgânica produzido por sistemas florestais nativos ou implantados, derivados da manufatura de produtos florestais na indústria de base florestal e resíduos provenientes da utilização desses produtos (BRAND, 2010). É uma fonte de energia limpa, renovável e em equilíbrio com o meio ambiente, considerada uma forma de energia pobre, pouco utilizada em países desenvolvidos. Isso se deve ao uso predominante de combustíveis comerciais como, por exemplo, petróleo, gás, carvão mineral (ROSILLO-CALLE, 2005). Como alternativa à minimização dos efeitos da poluição dos combustíveis fósseis, a utilização da madeira como fonte de energia possui maior vantagem, pois é renovável e menos poluente.

A biomassa representa aproximadamente 27% da oferta interna de energia primária utilizada no Brasil, em que a madeira em conjunto com seus derivados representam 10,8% do total. O País consome cerca de 82 milhões de toneladas de madeira para produção de energia, dos quais 62% do total é oriundo de florestas nativas, contribuindo assim para o desmatamento da vegetação natural (ESCOBAR, 2015). Nesse contexto, destaca-se a produção de carvão vegetal como forma de uso da madeira para fins energéticos, estando sua qualidade diretamente relacionada à qualidade da madeira.

O carvão vegetal é o principal produto do processo de carbonização de diversos materiais, sendo a madeira a principal matéria-prima para sua produção. Variações nas características do carvão vegetal estão associadas ao sistema de carbonização empregado, às características da madeira e à mão de obra empregada.

O pau-mulato (*Calycophyllum spruceanum*) é uma espécie florestal nativa da Região Amazônica, de rápido crescimento, que produz madeira densa e de alto poder calorífico; tais características são desejáveis para produção de carvão vegetal (BOIVIN-CHABOT et al., 2004). Entretanto, apesar dessas qualidades, não há relatos na literatura sobre estudos de sua madeira para produção de carvão vegetal, uma vez que para avaliar a eficiência energética, torna-se necessário uma caracterização adequada da madeira, visando conhecer melhor suas propriedades.

Diante desse contexto, estudos sobre a caracterização da madeira e do carvão de pau-mulato são importantes, tendo em vista a escassez de trabalhos sobre o tema, além do conhecimento que servirá como base para futuras pesquisas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a madeira e carvão vegetal produzido de Pau-mulato (*Calycophyllum spruceanum* Benth.).

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a anatomia e os parâmetros colorimétricos da madeira;
- Analisar a variação longitudinal dos parâmetros de retratibilidade e densidade básica da madeira;
- Verificar a qualidade da madeira por meio de sua composição química e energética;
- Avaliar a influência da taxa de carbonização no rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características da espécie *Calycophyllum spruceanum* Benth.

Calycophyllum spruceanum é uma espécie florestal de grande porte, conhecida popularmente por pau-mulato, mulateiro, mulateiro da várzea e pau marfim. Pertence à família Rubiaceae, com ocorrência na Região Amazônica (Brasil, Colômbia, Equador, Peru e Bolívia), em áreas de várzea e de terra firme (LORENZI, 2002).

Segundo o mesmo autor, quando adulta, a árvore atinge uma altura de 20-40 m, possuindo tronco com diâmetro de 20-30 cm, retilíneo com poucas ramificações. Sua madeira possui densidade de aproximadamente 0,78 g cm⁻³, considerada moderadamente pesada, dura, compacta, de boa trabalhabilidade e resistente à deterioração. Com tais características, é comumente empregada em marcenarias para construção de móveis e também na construção civil. A árvore pode ser utilizada no paisagismo e também é indicada para recuperação de matas ciliares.

Record e Hess (1949) afirmaram que a boa durabilidade natural, coloração uniforme e elevada massa específica da madeira; tornam a espécie dentro dos padrões recomendados pelo mercado internacional para a fabricação de móveis.

Na Amazônia brasileira, mais especificamente em Macapá e Santana (AP), o pau-mulato vem sendo explorado para a comercialização de madeira devido ao grande potencial da espécie no setor moveleiro e construção de telhados. Estudos apontam que dos R\$ 16 milhões gerados com a venda de madeira, 20% dessa receita deve-se ao pau-mulato (GUEDES, 2015).

No Peru, o pau-mulato é considerado uma espécie de alto valor econômico, sendo utilizado por pequenos produtores rurais para a produção de madeira serrada, estacas, lenha e carvão. Para a produção de energia, o corte pode ser realizado a partir do segundo ano de plantio, já para a madeira serrada, recomenda-se o corte da árvore com idade entre 15 e 20 anos (BOIVIN-CHABOT et al., 2004; SOTELO MONTES et al., 2008).

Estudos realizados por Gomez et al. (2006) caracterizaram a madeira como de textura fina, lisa, brilho moderado, grã direita, cheiro e gosto imperceptíveis, poros solitários e múltiplos que variam de pequenos a médios e camadas de

crescimento delimitadas por zonas fibrosas. Tais características são intrínsecas à família Rubiaceae, estando relacionadas de acordo com suas formas de usos.

Baldin e Marchiori (2015) relataram que características anatômicas da espécie, como a presença de fibras com paredes moderadamente espessas associada à escassez de tecidos parenquimáticos, atribuem resistência mecânica e aumento da massa específica da madeira do pau-mulato.

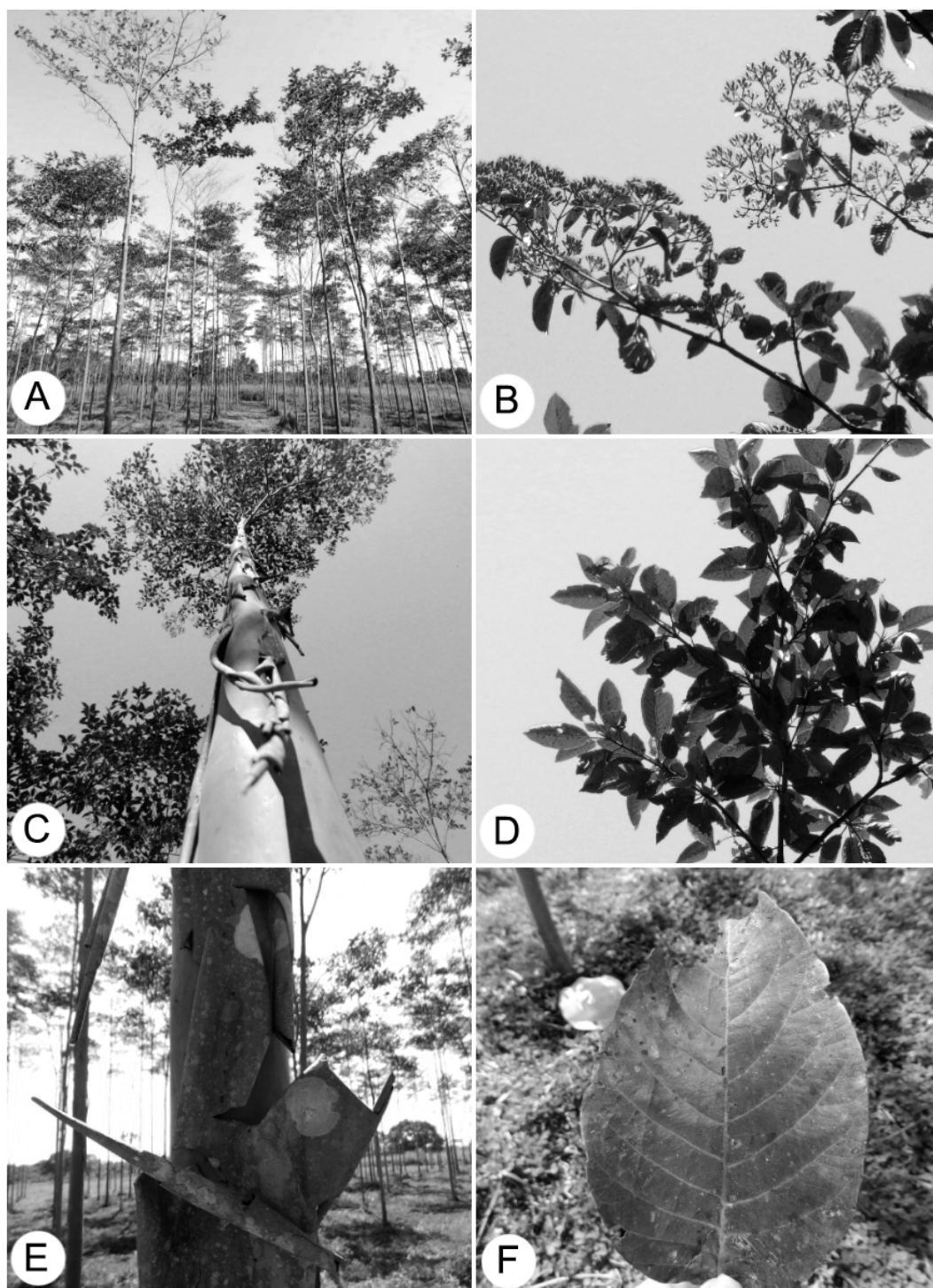
A planta possui folhas com tamanho de 9-17 cm de comprimento e 6-7 cm de largura, simples, opostas, glabras e de aspecto subcoriáceo, oblongas ou ovado-oblongas com ápice agudo ou obtuso e base pouco atenuada. As flores são aromáticas e de coloração branco-esverdeadas com 10-12 mm de comprimento, agrupadas em cimeiras triflorais envolvidas, quando em botão, numa bráctea foliácea. Floresce durante os meses de junho a julho com maturação dos frutos nos meses de outubro a novembro. O fruto é do tipo deiscente, formando uma cápsula elipsoidal de 10 mm de comprimento, possui em sua estrutura lenticelas, pêlos esparsos e duas valvas. As sementes possuem cor parda escura; pequenas, com aproximadamente 4 mm de comprimento são produzidas anualmente em grande quantidade e facilmente dispersas pelo vento (ALMEIDA, 2004).

Quanto à reprodução da espécie, poucos são os estudos que tratam de suas peculiaridades. Contudo, algumas características reprodutivas foram descritas, como a presença de flores hermafroditas; produção anual de grande quantidade de sementes, resultando em um fluxo gênico extensivo entre as populações (RUSSEL et al. 1999).

Segundo D'Oliveira (1992), o pau-mulato é uma espécie pioneira com seu período de maior crescimento nas condições de regime de inundação anual, que ocorre entre o fim de maturação dos frutos e o início da próxima floração. Apesar desse período coincidir com a época de alagamentos, o solo retém uma quantidade suficiente de oxigênio para promover o crescimento e floração da espécie. Essas condições de ambiente são favoráveis ao seu crescimento, implicando na boa qualidade da madeira, à qual é amplamente utilizada para produção de energia, tanto na forma de lenha como de carvão vegetal.

Na Figura 1, encontram-se algumas características morfológicas da espécie.

Figura 1. Características morfológicas da espécie *Calycophyllum spruceanum*. Copa das árvores (A); flores (B); tronco retilíneo (C); ramo foliar (D); casca (E); folha (F).



Fonte: O autor.

2.2 Características da madeira

2.2.1 Colorimetria da madeira

A cor é uma das características mais relevantes para a classificação, identificação e direcionamento dos usos da madeira, principalmente quando associada aos aspectos de textura e desenho. O teor de umidade, temperatura, degradações provocadas pelo ataque de organismos xilófagos ou, até mesmo, reações fotoquímicas dos componentes químicos presentes em sua estrutura, podem alterar a cor da madeira. (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

Sotelo Montes et al. (2008), ressaltaram que a idade da madeira e da árvore também são fatores que influenciam a cor natural deste material, assim como os tratamentos silviculturais e o tipo de solo em que o vegetal se desenvolveu.

O estudo da colorimetria é um método eficiente para a medição da cor da madeira, permitindo sua classificação com ajuda de coordenadas cromáticas. Como resultado desse estudo, tem-se melhorias de preço da madeira no mercado, tornando o produto mais homogêneo, além de ser um critério relevante na hora da compra (GONÇALEZ et al., 2001).

Na maioria das vezes, a qualidade da madeira é dada basicamente por suas características anatômicas, físicas e mecânicas. Entretanto, outras características menos comuns, como por exemplo, a cor, durabilidade natural e secagem da madeira, complementam essa caracterização (AUTRAN; GONÇALEZ, 2006).

Como sendo um componente de estética, a cor está associada à superfície e ao desenho de uma peça de madeira, tornando o produto mais atraente. Devido à crescente demanda do mercado na busca de produtos de melhor qualidade, esta propriedade deve ser incorporada ao planejamento, visando à caracterização tecnológica da madeira para atender aos usos mais nobres deste material (MORI et al., 2005).

A atribuição da coloração de uma madeira apenas pela análise visual é bastante subjetiva, visto que a cor pode ter tonalidade diferente, dependendo do observador e da luminosidade. Contudo, foram desenvolvidos métodos quantitativos que empregam variáveis numéricas para as interações provocadas pela luz em uma superfície, podendo ser definida de várias formas, em virtude de seu caráter abstrato. É uma característica de objetos que possuem capacidade de emitir, refletir

ou transmitir radiação numa faixa visível pelo homem e outros seres vivos (SILVA et al., 2015).

A determinação da cor é muito importante. Seja qual for o material, torna-se necessário sua caracterização, pois o contato visual é o primeiro passo para indicação imediata de sua finalidade. Quando se trata da madeira, esse atributo pode esteticamente classificá-la como parâmetro de aceitação no mercado, visto que a cor da madeira é muito instável e pode ser alterada por diversos fatores (CAMARGOS; GONÇALES, 2001).

Essa instabilidade na cor da madeira ocorre por causa dos elementos anatômicos que constituem o lenho, os quais possuem grande influência na formação da cor. A estrutura anatômica confere enorme variabilidade de cor entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e também dentro de uma mesma árvore (CAMARGOS; GONÇALES, 2001; MORI, et al., 2005; MÖTTÖNEN; KÄRKI, 2007).

A coloração da madeira pode variar do bege claro até a tonalidade do marrom escuro, com tendência ao preto. Dentro desse intervalo, existe uma gama de pigmentações que conferem as mais variadas cores de madeiras. Essas cores resultam da composição química das substâncias presentes no xilema, tais como os taninos, fenóis, flavonóides, entre outros (MADY, 2000; MORI et al., 2005).

O método comumente empregado para determinação da cor da madeira é realizado por comparação, com auxílio de um atlas de cores (Escala Munsell). Todavia, esse método é muito variável. Com isso, são necessárias técnicas aprimoradas que determinem a cor da madeira de forma mais precisa, como é o caso da colorimetria quantitativa (GONÇALEZ et al., 2001).

A colorimetria quantitativa é uma metodologia que determina a cor da madeira de maneira exata e eficaz, considerando aspectos superficiais como a grã, textura e desenho. É medida por meio de equipamentos específicos que descrevem numericamente cada elemento da composição de uma cor. Existem dois tipos de aparelhos capazes de descrever numericamente os elementos que compõem a cor de uma superfície, que são os colorímetros e espectrofotômetros (GONÇALES et al., 2001; MORI et al., 2005).

Um dos sistemas utilizados para a medição da cor da madeira é o sistema Comissão Internacional de Iluminantes (CIELAB). Esse sistema é baseado em três elementos que descrevem a sensação da cor do material: luminosidade ou

claridade, a tonalidade e a saturação ou cromaticidade, em que L^* indica a claridade e varia entre 0 e 100. O zero representa o preto e 100, o branco. O a^* indica a matriz vermelho, em que o número positivo indica o vermelho e o negativo, o verde. O b^* indica a matriz amarelo, sendo o número positivo amarelo e o negativo, o azul. A saturação (C) indica a pureza da cor, enquanto que o h^* corresponde ao ângulo de tinta (h^*) (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

O CIELAB é considerado o sistema mais utilizado quando se deseja quantificar e mensurar a cor de superfícies, pois fornece espaço mais uniforme de distribuição das cores. O modelo funciona como um tradutor universal de línguas entre dispositivos, permitindo controlar as cores que passam de um dispositivo para outro. Esse sistema tem como objetivo aumentar a uniformidade das cores perceptíveis ao homem (LEÃO et al. 2005).

A utilização desta ferramenta para a determinação da cor de madeiras tropicais é de suma importância, pois agrega valor a estas espécies pouco conhecidas, mas que possuem grande potencial para competitividade no mercado nacional. As propriedades colorimétricas dessas madeiras são desejadas principalmente para fabricação de móveis (ZANUNCIO et al., 2014).

2.2.2 Anatomia, densidade e retratibilidade da madeira

A madeira é um material heterogêneo, formado por diferentes tipos de células que desempenham funções vitais, como por exemplo, condução, armazenamento de substâncias e sustentação da árvore. Para entender o comportamento da madeira, é necessário o conhecimento da estrutura e organização dos elementos anatômicos que compõem o lenho, já que estes possuem influência sobre suas propriedades físicas e mecânicas (BURGER; RICHTER, 1991; OLIVEIRA et al., 1982).

O conhecimento da estrutura e organização da anatomia de um lenho, além de possibilitar a identificação de uma espécie florestal, permite a compreensão do comportamento da madeira perante operações de secagem, desdobro e preservação. O comportamento desse material é muito variável, podendo ocorrer variações nas direções radial, tangencial e longitudinal (PANSIN; DE ZEEUW, 1980).

O estudo anatômico aliado ao comportamento das propriedades físicas da madeira, como a densidade básica, tornam-se parâmetros essenciais para

estabelecer o melhor uso desse material, visto que a madeira é um material muito variável (BURGER; RICHTER, 1991, TRIANOSKI et al., 2013).

A densidade básica da madeira é a característica mais utilizada dentre as propriedades físicas da madeira. É a relação entre a massa seca da madeira e o seu volume saturado, representa a proporção do material lenhoso por unidade de volume ou o volume dos espaços vazios presentes na mesma, sendo um parâmetro muito utilizado para avaliar o potencial de utilização da madeira para diversos fins. Entretanto, não se deve considerá-la como índice isolado de qualidade da madeira. Sua composição química (lignina, hemicelulose e celulose) e características anatômicas também são indicadores de qualidade (PIMENTA et al., 2010).

Madeiras de baixa densidade são ricas em tecidos parenquimáticos, ou possuem paredes finas, influenciando nos teores de lignina e em sua resistência. Enquanto que madeiras de elevada densidade geralmente são mais resistentes, mais escuras e possuem maior contração volumétrica quando comparadas com as madeiras de densidade inferior. Assim, a densidade da madeira torna-se um bom indicativo da rigidez, podendo ser influenciada por diversos fatores como, a variação existente entre árvores de uma mesma espécie e pelas condições ambientais (PAULA, 2005; SOTELO MONTES et al., 2008).

Variações nas dimensões da madeira, ocasionadas pelo aumento ou diminuição da umidade são características importantes e que devem ser consideradas, pois como se sabe, a densidade está ligada à sua umidade devido às variações em massa e volume. Portanto, para a determinação da densidade, é importante conhecer a retratibilidade volumétrica da madeira (TRIANOSKI et al., 2013).

Quanto menor for a alteração volumétrica, juntamente com o baixo coeficiente de anisotropia, melhor será a qualidade da madeira, principalmente quando se deseja utilizá-la na fabricação de móveis. Alterações existentes entre umidade, densidade e retratibilidade devem ser estudadas para o máximo de aproveitamento da madeira (REZENDE, 2003).

2.3 Carbonização da madeira

A carbonização é o processo em que o hidrogênio e o oxigênio da madeira são eliminados com objetivo de concentrar o carbono em sua estrutura. A madeira

quando submetida a altas temperaturas, ocorre a decomposição de seus principais componentes: celulose, hemiceluloses e lignina por meio da degradação térmica. Como resultados desse processo têm-se o carvão e líquido pirolenhoso. Pode-se dizer que o objetivo maior da carbonização é elevar o teor de carbono fixo na madeira por ação de tratamento térmico (OLIVEIRA et al., 1982).

O processo de carbonização é antigo e por meio do controle das condições a qual a madeira é submetida, obtém-se variados produtos úteis ao homem e dentre eles o carvão vegetal. A variação de temperatura tem influência direta no processo, que se divide em quatro etapas: até 200°C, processo de secagem e início da degradação térmica; de 200 a 280°C, liberação de metanol, ácido acético, água, predominando as reações endotérmicas; de 280 a 500°C ocorrem as reações exotérmicas, com liberação de gases combustíveis; acima de 500°C, o carvão já possui estabilidade e libera pequena quantidade de material volátil (BRITO, 1990; MEDEIROS; REZENDE, 1983).

Diversos fatores que podem influenciar no processo de carbonização e no rendimento gravimétrico, como o alto teor de umidade, o qual torna o carvão frágil e sem resistência, consumindo muita energia durante a etapa de secagem da madeira. Altas concentrações de umidade diminuem significativamente o rendimento do carvão, pois quanto maior o teor de umidade do material, mais energia será necessária à secagem. Outros fatores como a temperatura final da carbonização, dimensionamento das peças de madeira, distribuição dos gases no interior dos reatores e a taxa de aquecimento dos fornos, exercem grande influência na quantidade e qualidade dos produtos da carbonização (PINHEIRO et al., 2006).

2.4 Carvão vegetal e parâmetros de qualidade

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal em escala mundial. O carvão destinado a siderurgia representa importante atividade no processo de desenvolvimento industrial e na economia brasileira, contudo, apesar do Brasil ocupar essa posição os métodos utilizados pelas indústrias na produção do carvão não acompanharam as novas tecnologias, o que gera menor rendimento operacional e capacidade energética do produto (BRASIL, 2015; BRITO, 1999).

Comparado ao carvão mineral, o de origem vegetal possui diversas vantagens em sua utilização sustentadas por aspectos como a pequena presença

de enxofre e fósforo em sua composição, é renovável e possui baixo teor de cinzas, o que o torna menos poluente (ANUÁRIO, 2011; TRUGILHO et al., 2005).

Na produção de carvão vegetal são necessárias condições controladas de oxigênio em ambiente fechado, expondo a madeira ao calor para que seja realizada a destilação e separação de subprodutos derivados do processo de carbonização. Uma característica fundamental analisada na produção do carvão é a correlação da massa seca produzida com as massas de lignina e de carvão vegetal produzido, em proporções definidas (TRUGILHO et al., 2001).

A qualidade da madeira empregada está diretamente relacionada com a qualidade do carvão vegetal. Suas características químicas, físicas e mecânicas são responsáveis por promover aumento na quantidade e qualidade do carvão produzido. Características da própria espécie, como idade, taxa de crescimento, procedência do material também influenciam nas propriedades do carvão vegetal (BRITO, 1990).

A qualidade do carvão é dada por suas propriedades físicas (densidade e friabilidade) e químicas (composição em carbono fixo, cinzas e materiais voláteis). A densidade é uma das propriedades que mais influencia na qualidade do carvão, de modo que quanto mais elevada, melhor a qualidade do produto. Madeiras com maior densidade possuem inúmeras vantagens para fins energéticos, tais como menor área de estocagem e manuseio, rendimento elevado dos gaseificadores da madeira e dos reatores para hidrólise ácida, e maior rendimento das caldeiras no processo de queima (PEREIRA et al., 2000; TRUGILHO et al., 2001).

O emprego de carvão vegetal com elevada umidade pode gerar mudanças na qualidade física do carvão, elevando a geração de finos, semelhante ao que ocorre quando do rápido desprendimento dos materiais voláteis. O poder de combustão é inversamente proporcional ao conteúdo de umidade do material, que consumirá mais energia para realizar a evaporação da água que o compõe (BRITO, 1993).

Para a obtenção de melhor potencial energético do carvão deve-se analisar o teor de carbono fixo, de cinzas e materiais voláteis, por haver considerável relação entre esses componentes químicos e o poder calorífico superior do carvão. O principal responsável pela energia armazenada no carvão é o carbono fixo, presente anteriormente como carbono e convertido durante o processo de produção do carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2014).

Carbono fixo é a quantidade de carbono que compõe o carvão, expressa em porcentagem. Possui relação direta com o teor de carbono fixo da madeira e seu respectivo rendimento gravimétrico. A quantidade de carbono fixo fornecida por uma unidade de madeira é função da porcentagem de lignina desta, considerando a interação dos extrativos e da densidade do material e a relação inversamente proporcional da hemicelulose durante carbonização (OLIVEIRA et al., 1982).

Para melhor qualidade do carvão é necessário baixo teor de cinzas, certo que a relação entre as cinzas e o poder calorífico tem proporções inversas. Isso se dá pelo fato dos minerais presentes no carvão não participarem processo de combustão (BRAND, 2010).

Os materiais voláteis são substâncias liberadas pela madeira no processo de carbonização e queima do carvão, sendo influenciados por fatores como a taxa de aquecimento e composição química da madeira de origem. Influenciam na estrutura do carvão, porosidade, diâmetro médio, perda de massa interna e resistência mecânica; estas duas últimas pelo desprendimento dos materiais voláteis durante a carbonização, promovendo rápida degradação e aumento da geração de finos na operação do alto-forno. O alto teor de materiais voláteis ocasiona maior produção de fumaça e perda energética do carvão, o que o tornaria inviável para uso comercial (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

Constituintes elementares como carbono, oxigênio, hidrogênio e teor de cinzas do carvão são aspectos importantes na avaliação de combustíveis de biomassa, podendo ser caracterizados como índice de potencial energético. Resumidamente, na produção de carvão vegetal, madeiras com elevada densidade, alto teor de lignina, baixo teor de cinzas e parede celular espessa conferem um produto de melhor rendimento e qualidade (PROTÁSIO et al., 2011; TRUGILHO et al., 1996).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do plantio, localização e processo de amostragem

A madeira foi coletada em um plantio experimental da Embrapa Acre, localizado no município de Rio Branco, AC; composto por 300 árvores com idade de seis anos, plantadas em espaçamento de 3 x 2 m. O plantio compreende uma área total de 1200 ha e está localizado entre as coordenadas geográficas de 10°01'22" e 10°04'14" de latitude sul e de 67°40'3" e 67°42'43" de longitude a oeste de Greenwich.

A região do campo experimental caracteriza-se pela existência de áreas aplainadas, ainda conservadas, e de relevos dissecados em interflúvios tabulares, com predominância de solos das classes latossolos e argissolos, distróficos, ácidos e com baixa reserva de nutrientes, podendo também ser encontrados solos plintossolos e gleissolos. A topografia varia de relevo plano a suave ondulado nos interflúvios e suave ondulado a ondulado nas áreas separadas pela rede de drenagem (RODRIGUES et al., 2001).

Segundo a classificação de Köppen, o clima do Estado do Acre é do tipo Am (equatorial quente e úmido), caracterizado por altas temperaturas e elevados índices pluviométricos, em que o regime hidrológico é bastante influenciado pelo período chuvoso, reduzindo bastante o volume de água durante o período de estiagem. A temperatura média anual está em torno de 24,5 °C, e máxima em torno de 32 °C, sendo aproximadamente uniforme para todo o Estado (ACRE, 2006).

Para o estudo, foram demarcadas aleatoriamente cinco árvores, as quais estavam livres de ataque de insetos ou qualquer tipo de injúria. Em seguida, as mesmas foram colhidas com motosserra (Figura 2) e retirados três discos com espessura de 3 cm cada um, por posição no tronco em proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo de 5 cm), e um suplementar na altura do peito, DAP, ou seja, 1,30 m acima do solo.

Figura 2. Etapas do processo de amostragem das árvores envolvendo o corte (A), retirada dos discos (B), identificação (C) e armazenamento em campo (D).



Fonte: o autor.

Os discos foram identificados e levados ao pátio da Embrapa Acre para secagem ao ar livre e posteriormente transportados para o Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da UFES em Jerônimo, ES, onde foram realizados os estudos anatômicos, físicos e químicos da madeira; produção de carvão vegetal e avaliação dos rendimentos da carbonização; características físicas, químicas e energéticas dos mesmos.

3.1.1 Variáveis dendrométricas

Foram mensuradas as alturas total e comercial das árvores com uma trena. Os volumes de madeira com e sem casca foram estimados pelo método de Smalian. A determinação do volume de casca foi realizada por diferença entre o volume de madeira e o volume de casca.

3.2 Descrição anatômica, densidade e retratibilidade da madeira

Para o estudo das características anatômicas da madeira, foram avaliadas as características macroscópicas e microscópicas do lenho visando um melhor entendimento de suas propriedades tecnológicas. Com isso, adotaram-se as recomendações da norma de procedimento em estudos de anatomia da madeira estabelecidas pela *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* – COPANT (1974) e *International Association of Wood Anatomists* – IAWA (2007).

A descrição macroscópica da madeira foi realizada com uso de uma lente de 10x de aumento. Os elementos anatômicos observados foram camadas de crescimento, poros, raios e tipo de parênquima.

Para a descrição microscópica, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 1,0 x 1,5 x 2,0 cm (tangencial x radial x longitudinal), obtidos do cerne periférico dos discos, nas posições 0, 25, 50, 75%, 100% e DAP. Em seguida, foram amolecidos em água. Os corpos de prova foram fixados em micrótomo de deslize e produzidos cortes histológicos em cada uma das seções, variando de 14 a 20 µm.

A mensuração anatômica foi realizada com um sistema de aquisição de imagens composto de câmera acoplada a um microscópio e com o auxílio do *software* Image-Pro Plus para análise das imagens. Os elementos anatômicos avaliados foram os vasos, fibras e raios (Tabela 1).

Tabela 1. Elementos anatômicos da madeira de *Calycophyllum spruceanum* e seus respectivos números de observação por posição longitudinal.

Elementos anatômicos		Número de observações
Vasos	Diâmetro (μm)	20
	Frequência ($\text{n}^\circ \text{mm}^{-2}$)	20
Fibras	Comprimento (μm)	20
	Largura (μm)	20
	Diâmetro do lume (μm)	20
	Espessura da parede (μm)	20
Raios	Altura (μm)	20
	Largura (μm)	20
	Frequência ($\text{n}^\circ \text{mm}^{-1}$)	20

Fonte: o autor.

A mensuração das fibras foi realizada com a dissociação dos elementos anatômicos que compõem a madeira, pelo uso da técnica de maceração, seguindo a metodologia proposta por Nicholls e Dadswell descrito por Ramalho (1987), em que foram preparados pequenos palitos de madeira no sentido radial, os quais foram alocados em tubos de ensaios contendo solução macerante. Os tubos foram lacrados e levados para estufa numa temperatura de 60 °C por um período de 48 horas. Em seguida, lavou-se o macerado com água destilada para remoção da solução ácida, e colorido com corante safranina 1% para o preparo de lâminas temporárias em glicerina. As lâminas foram visualizadas em microscópio com câmera fotográfica acoplada e retirada das fotomicrografias.

A densidade básica e retratibilidade da madeira foram determinadas ao longo do tronco. Em cada disco, retirou-se corpos de prova obtidos do cerne periférico com dimensões 2 x 2 x 3 cm (radial x tangencial x longitudinal).

Para a determinação da densidade básica, foram seguidas as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003).

A retratibilidade da madeira foi determinada de acordo com a NBR 7190 da ABNT (1997).

3.3 Composição química e poder calorífico superior da madeira

Para a determinação da composição química da madeira, foram utilizadas amostras compostas obtidas de cunhas opostas de cada posição. Nessa análise, foram determinados os teores de extrativos totais, lignina (insolúvel, solúvel e total) e cinzas da madeira, utilizando a serragem que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na peneira de 60 *mesh*.

O teor de extrativos foi obtido de acordo com *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* – TAPPI 264 om-88 (1992).

Para a determinação do teor de lignina insolúvel, adotou-se o método Klason descrito por Gomide e Demuner (1986).

O teor de lignina solúvel foi obtido por espectrometria UV com o líquido restante do processo de obtenção da lignina insolúvel. Para tanto, foi adotado o procedimento descrito por Goldshimid (1971). A equação utilizada para determinação desse teor de lignina encontra-se abaixo (Equação 1).

$$TLS = \frac{[(4,53 \times A_{215}) - A_{280}]}{90} \times 100 \quad (1)$$

em que: TLS = Teor de lignina solúvel (%); A_{215} = Absorbância para comprimento de onda de 215 nm; A_{289} = Absorbância para comprimento de onda de 280 nm.

Para a determinação do teor de cinzas presente na madeira, adotou-se as especificações sugeridas pela Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M 11/77 (1997). Foram alocadas 5 g de madeira seca em cadinhos de porcelana, os quais foram levados a um forno tipo mufla por 6 horas numa temperatura de 575°C. O procedimento iniciou-se dispondo os cadinhos com suas respectivas tampas na mufla até a completa carbonização das amostras. Em seguida, retiraram-se as tampas dos cadinhos, os quais permaneceram no interior do forno até a combustão total das amostras. Por fim, as amostras foram retiradas, resfriadas em dessecador e pesadas para a quantificação do teor de cinzas.

O poder calorífico superior da madeira foi obtido conforme a metodologia da NBR 8633 (ABNT, 1983). Para tanto, foram retiradas cunhas opostas ao longo do tronco, as quais foram transformadas em serragem, trituradas e classificadas em

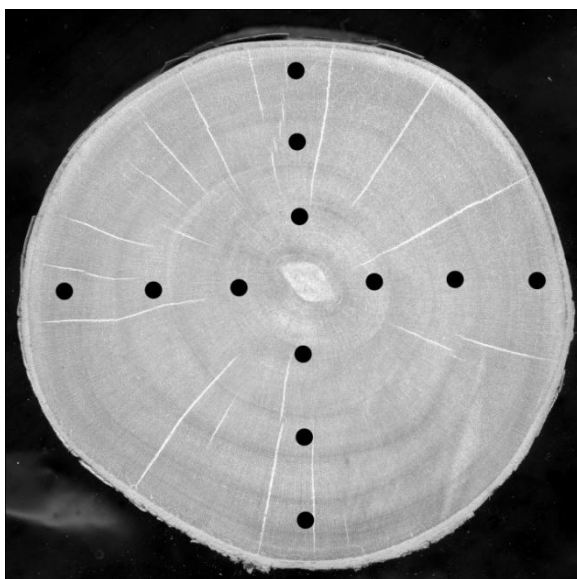
peneiras, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na malha de 60 *mesh*. O material foi homogeneizado e seco em estufa $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, até massa constante. A determinação do poder calorífico superior foi realizada em calorímetro adiabático, utilizando 1 g do material.

3.4 Colorimetria da madeira

Para a determinação da cor da madeira utilizou-se o método *CIELAB 1976* por meio do uso de espectrofotômetro Konica Minolta CM-2500D, com iluminante padrão D65, ângulo de observação de 10° e luz especular incluído. O equipamento foi calibrado com padrão preto e branco, sendo que para este último, utilizou-se a placa calibradora do próprio equipamento.

Foram utilizados os discos de cada uma das seis posições longitudinais, os mesmos foram lixados em lixa nº 80 e 150 e armazenados em sacos plásticos de cor escura para evitar o contato das amostras com a luz, antes da análise colorimétrica. Em seguida, foram obtidas 12 leituras na superfície transversal dos discos, como ilustra na Figura 3.

Figura 3. Pontos coletados de informação da cor na superfície transversal da madeira de *Calycophyllum spruceanum*.



Fonte: o autor.

Os parâmetros colorimétricos avaliados foram claridade (L^*), coordenada vermelho-verde ou matiz vermelho (a^*) e coordenada azul-amarelo ou matiz amarelo (b^*), fundamentados no Sistema CIEIAB (CIE,1976). Sendo a saturação (C) calculada pela Equação 2 e o ângulo de tinta foi determinado conforme Equação 3.

$$C = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0,5} \quad (2)$$

em que: C = saturação; a^* = matriz vermelho; b^* = matriz amarelo.

$$H = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3)$$

em que: H = ângulo de tinta; a^* = matriz vermelho; b^* = matriz amarelo.

3.5 Carbonização e qualidade do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas com os discos provenientes das posições 0, 25, 50, 75, 100% e DAP da altura comercial das árvores. Em cada disco, retiraram-se duas cunhas opostas, as quais foram previamente secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Foram testadas três marchas de carbonização, todas com temperatura inicial de 100°C e temperatura final de 450°C , estabilizada por 30 min (Tabela 2).

Tabela 2. Características das marchas de carbonização da madeira.

Marcha	Temperatura ($^\circ\text{C}$)		Aquecimento	Taxa de aquecimento ($^\circ\text{C}/\text{min}$)	Tempo total
	Inicial	Final			
M1	100	450	50 $^\circ\text{C}$ a cada 30 min	1,67	4 horas
M2	100	450	35 $^\circ\text{C}$ a cada 30 min	1,17	5h30min
M3	100	450	25 $^\circ\text{C}$ a cada 30 min	0,83	7h30min

Fonte: o autor.

As cunhas foram alocadas em cadinho metálico e levadas à mufla elétrica com controle manual de temperatura. A captação dos gases condensáveis foi realizada com um condensador acoplado a uma cápsula metálica dentro do forno.

No total, foram obtidas 15 carbonizações, sendo 5 para cada marcha testada. Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos do carvão, gases condensáveis (líquido pirolenhoso) e gases não condensáveis.

O rendimento gravimétrico da carbonização foi calculado em relação à madeira seca de cada amostra (Equação 4).

$$RGC = \left(\frac{Mc}{Mm} \right) \times 100 \quad (4)$$

em que: RGC = rendimento gravimétrico em carvão (%); Mc = massa do carvão (g); Mm = massa seca dos cavacos (g).

O rendimento em líquido pirolenhoso foi determinado por meio da relação entre o líquido condensado e a massa inicial das amostras (Equação 5) e o rendimento em gases não condensáveis foi calculado por gravimetria, subtraindo-se de 100% o somatório da massa de carvão e líquido pirolenhoso (Equação 6).

$$RGL = \left(\frac{Pl}{Pm} \right) \times 100 \quad (5)$$

em que: RGL = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (%); Pl = peso do líquido pirolenhoso (g); Pm = peso seco dos cavacos (g).

$$RGNC = 100 - (RGC + RGL) \quad (6)$$

em que: RGNC = rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%); RGC = rendimento em carvão (%); RGL = rendimento em líquido pirolenhoso (%).

Após as carbonizações da madeira, além da determinação dos rendimentos gravimétricos, foram analisadas as características do carvão vegetal, a fim de conhecer suas propriedades, como a densidade relativa aparente, análise química imediata, poder calorífico superior e densidade energética.

A determinação da densidade relativa aparente teve como base, o método de imersão em água, descrito por Vital (1984), determinado pela razão entre a massa e

o volume do carvão. A composição química imediata foi realizada conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986), com determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O poder calorífico superior foi determinado pelo emprego de um calorímetro adiabático de acordo com a NBR 8636 (ABNT, 1983).

A densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em MJ m⁻³.

3.6 Análise estatística dos dados

Na avaliação das características quantificadas da madeira e do carvão vegetal, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Os valores foram submetidos à análise de variância e quando detectadas diferenças significativas entre os tratamentos (teste F, $p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

A descrição das variáveis dendrométrica das árvores e caracterização química da madeira foram avaliadas por meio de estatística descritiva, considerando as médias de cada análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis dendrométricas

Observa-se que as árvores coletadas possuíram altura homogênea (Tabela 3), variando entre 8,70 e 9,30 m, com altura média de 9,90 m. Para a espécie, considerando árvores adultas, esse valor é baixo, já que as árvores podem atingir altura de 20-30 m (LORENZI, 2002). Estudo realizados por Sotelo Montes et al. (2008), em povoamentos naturais da Amazônia Peruana, relataram que árvores adultas (idade desconhecida) podem atingir altura de 35 m.

Tabela 3. Variáveis dendrométricas das árvores de *Calycophyllum spruceanum* coletadas em plantio experimental aos seis anos de idade.

Parâmetro	Árvore					Média
	1	2	3	4	5	
Altura total (m)	8,70	11,60	10,10	9,80	9,30	9,90
Altura comercial (m)	4,70	6,40	5,36	7,60	4,36	5,68
DAP com casca (cm)	8,25	9,85	8,85	7,80	9,75	8,90
DAP sem casca (cm)	8,00	9,65	8,70	7,55	9,49	8,68
Volume de madeira (m ³)	0,019	0,031	0,025	0,018	0,025	0,024
Volume de casca (m ³)	0,00105	0,00119	0,00130	0,00118	0,00112	0,00117
Teor de madeira (%)	94,56	96,14	95,51	93,14	96,10	95,09
Teor de casca (%)	5,44	3,86	4,49	6,86	3,90	4,91

DAP = Diâmetro à altura do peito.

Fonte: o autor.

A altura comercial das árvores variou entre 4,36 e 7,60 m, com média geral de 5,68 m. Estudos estimativos realizados por Franke (2000) sobre a produção total de um reflorestamento de *Calycophyllum spruceanum*, com árvores de 27 anos, plantadas em espaçamento de 3 x 3 m, e considerando uma densidade de 1000 árvores ha⁻¹; a altura comercial e diâmetro médio foi de 13,6 m e 27,1 cm; volume com casca de 351 m³ há⁻¹. Assim, espera-se que as árvores de pau-mulato ao atingirem essa idade, possuam características dendrométricas aproximadas ao estudo abordado pelo autor, já que a espécie possui rápido crescimento em altura.

Os diâmetros à altura do peito (DAP) com e sem casca da madeira obtiveram valores médios de 8,90 e 8,68, respectivamente. Guedes et. al. (2012) encontraram crescimento médio em DAP variando de 0,9 a 2,4 cm ano⁻¹ para as árvores de *Pau-mulato* com idade de 5 a 11 anos, em áreas de sistemas agroflorestais no Amapá. Os autores concluíram que a espécie possui elevada capacidade de crescimento.

O volume e teor médio de madeira produzidos pela espécie foi de 0,024 m³ e 95,09%. Enquanto que o volume e teor de casca foram 0,00117 m³ e 4,91%, respectivamente. O baixo teor de casca e volume significativo de madeira possui características desejáveis para a produção energética, principalmente para a produção de carvão vegetal, pois a casca pode aumentar negativamente os teores de cinzas e fósforo presentes no carvão (VITAL et al, 1989).

4.2 Colorimetria da madeira

Observa-se que houve diferença estatística em todos os parâmetros avaliados da cor (Tabela 4), evidenciando sua variação ao longo do tronco. Essas diferenças da coloração entre posições podem ter sido influenciadas por vários fatores, tais como a composição química da madeira, constituintes anatômicos, altura, diâmetro e fatores genéticos pertencentes à própria espécie (BURGER; RICHTER, 1991; SOTELO MONTES et al., 2008).

Tabela 4. Valores médios dos parâmetros colorimétricos da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.

Posição (%)	Parâmetros colorimétricos				
	L*	a*	b*	C	h*
0	69,68 a	7,48 a	21,34 b	22,63 b	70,79 c
DAP	63,39 d	7,86 a	22,82 a	24,16 a	71,07 c
25	64,95 c	6,93 b	21,04 b	22,19 b	72,01 c
50	66,71 b	6,28 c	20,47 c	21,44 c	73,08 b
75	67,02 b	5,95 c	19,93 c	20,83 c	73,56 b
100	66,14 b	5,60 c	20,03 c	20,84 c	74,58 a
Média	66,31	6,68	20,94	22,02	72,51
CV (%)	4,58	23,24	9,26	9,96	4,23

L* = claridade; a* = coordenada vermelho-verde ou matriz vermelho; b* = coordenada azul-amarelo ou matriz amarelo; C = saturação; h = ângulo de tinta. Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p > 0,05$). Fonte: o autor.

De acordo com Camargos e Gonzalez (2001), a madeira é um material muito instável e passível a rápidas alterações na sua cor, sendo a posição da amostra coletada na árvore, um dos fatores influentes na colorimetria da madeira. Fato este, pode ser observado para a espécie estudada, ao longo do tronco da madeira, confirmando a não uniformidade da cor entre as seis posições.

Analisando o parâmetro L^* (claridade), nota-se que a madeira obteve resultados estatisticamente semelhantes nas posições 50, 75 e 100% do tronco, os quais diferiram das demais posições. A posição 0% obteve maior resultado de claridade, destacando-se com pigmentação mais clara, visto que quanto maior o valor de L^* , maior a claridade ou luminosidade da cor. Enquanto que as posições do DAP e 25% foram mais escuras em relação às outras posições, com valores médios de 63,39 e 64,95, respectivamente. Essas diferenças de claridade na cor entre as posições próximas ao topo e base podem classificar a madeira de pau-mulato em dois grupos distintos de coloração, sendo uma forma de uniformização do material.

Os valores das coordenadas cromáticas a^* (vermelho) e b^* (amarelo) e de C (saturação) também foram estatisticamente iguais nas posições superiores do tronco (50, 75 e 100%), indicando que há uniformidade da cor em ambas as posições. A saturação foi proporcional aos valores das coordenadas cromáticas, aumentando conforme há o aumento dos parâmetros a^* e b^* . Observa-se que a maior saturação ocorreu nas posições inferiores (0, DAP e 25%), com valores de 22,63, 24,16 e 22,19, respectivamente. A baixa saturação nas posições 50, 75 e 100% é decorrente da diminuição dos valores das coordenadas a^* e b^* .

O parâmetro ângulo de tinta (h^*) aumentou gradativamente à medida que a posição do tronco se distanciou da base (70,79) ou com sua proximidade ao topo (74,58). Nas médias das posições 0, DAP e 25% não foram observadas diferenças significativas, diferindo das posições 50, 75 e 100%, entretanto as médias das posições 50 e 75% foram iguais. Em todas as posições, os valores médios do ângulo de tinta foram acima de 50, indicando que as médias desse parâmetro tendem ao amarelo.

De modo geral, a madeira de Pau-mulato foi caracterizada pela claridade ou luminosidade ($L^* = 66,31$), pelas coordenadas a^* (6,68) e b^* (20,94), além da saturação ($C = 22,02$) e ângulo de tinta ($h^* = 72,51$). Classificada como madeira de cor clara ($L^* > 54$), segundo classificação proposta por Camargos e Gonzalez (2001). A coloração da madeira enquadra-se no grupo 18 com a cor oliva-amarelado

dentro do agrupamento de Cluster. As coordenadas cromáticas são determinantes no processo de descrição da pigmentação dessa madeira, com forte influência da coordenada b^* , evidenciando a tonalidade amarelada.

Sotelo Montes et al. (2008) estudaram a cor da madeira de *Calycophyllum spruceanum* procedente da Amazônia peruana aos 39 meses de idade e descreveram-na como madeira de cor clara, com expressiva tonalidade amarelada em seu lenho. Apesar de a madeira possuir idade inferior à coletada neste estudo, os valores dos parâmetros colorimétricos foram próximos, com $L^* = 67,63$; $a^* = 5,34$; $b^* = 22,12$; $C = 22,76$ e $h^* = 76,46$. Os autores ressaltam ainda, que estudos sobre a variação da cor da madeira de Pau-mulato são necessários para entendimento do comportamento desse fenótipo na árvore e sua relação com as características ambientais, além disso, a determinação da cor da madeira é muito relevante, pois é uma característica utilizada para a caracterização de sua qualidade, influenciando na comercialização do produto, devido o aspecto visual proporcionado pela cor.

4.3 Características gerais e descrição macroscópica

A madeira de *Calycophyllum spruceanum* possui textura fina com grã direita, é moderadamente dura ao corte manual no plano transversal e de boa trabalhabilidade, lisa ao tato, brilho moderado, cheiro e gosto imperceptíveis. Possui massa específica aparente média de $0,636 \text{ g/cm}^3$, sendo considerada madeira de peso moderado.

Possui parênquima axial ausente, mesmo sob lente de 10x aumentos; camadas de crescimento distintas, demarcadas por zonas fibrosas, com células dos raios alargadas na transição entre o lenho inicial e tardio, havendo a presença de fibras estreitas no lenho outonal. Poros pequenos e muito numerosos, somente visíveis sob lente de 10x.

4.4 Descrição microscópica

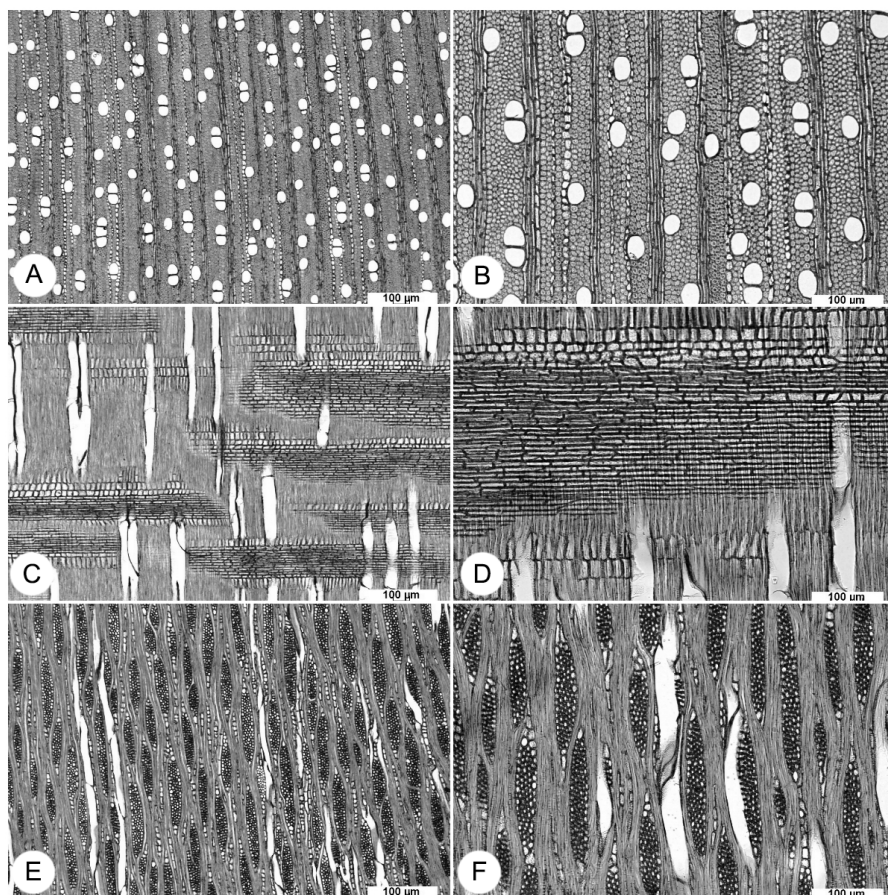
Vasos: em porosidade difusa uniforme, de seção ovalada, com diâmetro tangencial pequeno ($62,33 \mu\text{m}$); poros solitários e múltiplos de dois (Figura 4A, B), arranjo radial predominantemente. A frequência média é muito numerosa

(42,57 vasos/mm²). Possui elementos vasculares com presença de apêndices em suas extremidades (Figura 5B), indicando um baixo grau de evolução da espécie.

Raios: Visíveis a olho nu no plano transversal. Exclusivamente multisseriados, não estratificados (Figura 4E, F). Heterogêneos, composto por células eretas, quadradas e procumbentes (Figura 4C, D). São finos (37,46 µm), extremamente baixos (0,46 mm) e pouco frequentes (11,14 raios/ mm).

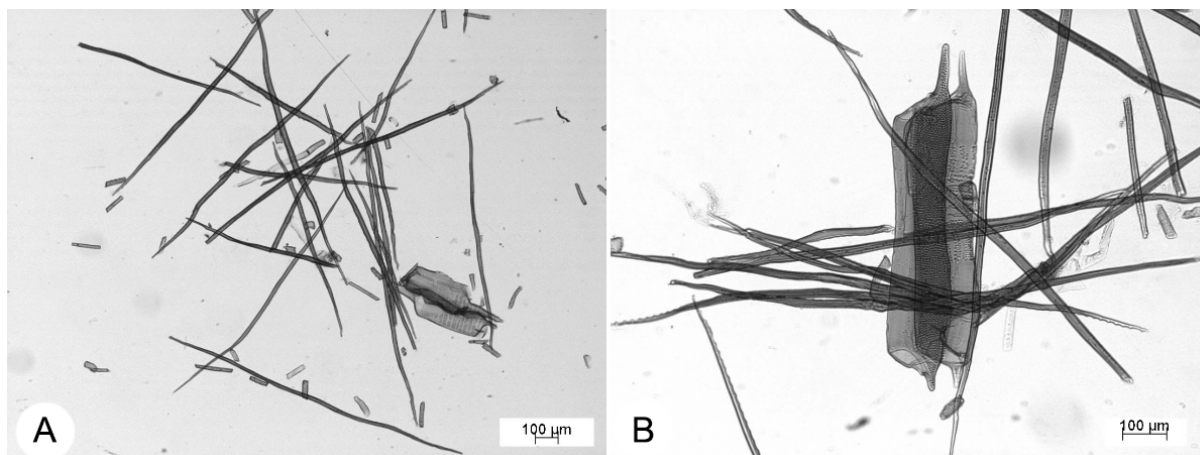
Fibras: libríformes (Figura 5A), curtas (1349,57 µm), com paredes delgadas a espessas (5,81 µm).

Figura 4. Fotomicrografias do lenho de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade. Seção transversal com poros/vasos solitários e múltiplos de dois, muito frequentes (A); mesma seção, em maior aumento, evidenciando os poros ovalados (B); Seção radial indicando os raios heterogêneos (C); seção em maior aumento, destacando as células eretas, quadradas e procumbentes (D); seção tangencial mostrando os raios não estratificados (E); seção em maior aumento, com raios multisseriados (F).



Fonte: o autor.

Figura 5. Fibras libriformes (A); vasos com apêndices nas extremidades (B).



Fonte: O autor.

A descrição anatômica da espécie *Calycophyllum spruceanum* corrobora com os resultados mencionados por Baldin e Marchiori (2015), descrevendo-a com raios heterogêneos, presença de células eretas, quadradas e procumbentes; vasos em porosidade difusa, solitários e em cachos, menos comumente; parênquima axial ausente; Fibras libriformes, curtas, com paredes delgadas a espessas.

4.4.1 Mensuração dos vasos

Os valores médios e o coeficiente de variação dos parâmetros relacionados ao diâmetro e frequência de vasos da madeira de *Calycophyllum spruceanum* nas posições longitudinais do tronco, estão apresentados na Tabela 5.

De um modo geral, o diâmetro dos vasos foi crescente, da base à posição 75%, tendo leve decréscimo na posição 100%. Observa-se que a espécie possui vasos de maiores diâmetros tangenciais nas posições 50, 75 e 100% do tronco, sendo destacada a posição 75% por possui maior valor, com diâmetro médio de 68,52 µm. A mesma não diferiu estatisticamente da posição 50%, a qual obteve o valor de 68,32 µm. O menor diâmetro vascular foi encontrado na posição 0% do lenho, ou seja, na base das árvores, cujo valor foi de 49,33 µm.

Tabela 5. Valores médios do diâmetro e frequência de vasos da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.

Parâmetro	Posição longitudinal (%)						Média Geral
	0	DAP	25	50	75	100	
Diâmetro (μm)	49,33 c (16,06)	61,66 b (16,70)	62,53 b (19,53)	68,32 a (18,55)	68,52 a (19,23)	63,65 b (25,16)	62,33 (19,74)
Frequência (nº mm⁻²)	39,97 b (21,49)	40,99 b (16,29)	44,57 a (16,90)	41,51 b (21,19)	42,28 b (19,65)	46,08 a (24,17)	42,57 (20,25)

DAP = diâmetro à altura do peito. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra em cada linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p>0,05$).

Fonte: O autor.

Rocha et al. (2004), em estudo realizado sobre a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, relataram um padrão de variação semelhante para o diâmetro tangencial dos vasos. Os autores relatam que o maior valor de diâmetro de vaso foi obtido na posição 75% e o menor na base.

Variações nas dimensões dos elementos celulares no sentido longitudinal do fuste da árvore são normalmente menos consistentes do que no sentido radial (WILKES, 1988).

Segundo Maranhão et al. (2006), mudanças nas dimensões das células estão correlacionadas com mudanças correspondentes na organização da parede celular, cuja alteração mais importante está associada ao ângulo de orientação das microfibrilas presentes na camada S₂ da parede secundária.

Nota-se que os coeficientes de variação para o diâmetro dos vasos, observados nas seis posições, variaram entre 16,06 a 25,16%, indicando uma variação mediana. Isso evidencia a pouca heterogeneidade entre os elementos anatômicos mensurados nas posições ao longo do tronco.

As médias dos tratamentos da frequência de vasos também diferiram estatisticamente ao nível de 5% de significância. As posições 25 e 100% foram semelhantes, com frequência média de 44,57 e 46,08 nº mm⁻², diferindo das médias das posições 0, DAP, 50 e 75%; sendo estas, iguais. O coeficiente de variação variou entre 16,90 a 24,17%, indicando que a frequência de vasos foi pouco heterogênea entre as posições.

O diâmetro dos vasos é inversamente proporcional à sua frequência, em que os maiores diâmetros estão associados a menores frequências (Bamber et al. 1982). Ao contrário do esperado, a madeira do pau-mulato obteve maior frequência de vasos justamente nas posições com maiores diâmetros tangenciais, contrariando as observações citadas pelos autores.

Alterações na frequência, diâmetro e disposição dos vasos são explicadas pela necessidade das plantas aumentarem sua capacidade de transportar substâncias no sentido ascendente, ao passo que se processa o seu crescimento e aumento de suas dimensões (TOMAZELLO FILHO, 1987).

4.4.2 Mensuração das fibras

Nota-se que houve diferença ao nível de 5% de significância pelo teste de Sknott-Knott entre as médias dos parâmetros relacionados às dimensões das fibras (Tabela 6). Ao analisar os resultados, observa-se que os valores de comprimento de fibra nas posições DAP, 25 e 50% não diferiram estatisticamente entre si e obtiveram maiores valores, com médias de 1459,79; 1447,40 e 1424,53 μm , respectivamente. Nas posições 0, 75 e 100%, os valores médios de comprimento foram iguais, obtendo menores resultados, com médias de 1219,51; 1269,15 e 1277,04 μm , respectivamente; as quais diferiram das médias das demais posições. Os coeficientes de variação referentes ao comprimento das fibras variaram entre 14,88 a 28,20%, podendo ser considerados medianos. A média geral obtida para esse parâmetro foi 1349,57 μm .

Baldin e Marchiori (2015) estudando a anatomia da madeira de *Calycophyllum spruceanum*, encontraram valor aproximado ao deste trabalho para o comprimento médio das fibras dessa espécie, concluindo que as mesmas representam 47% do volume da madeira. Os mesmos autores também estudaram a anatomia do lenho de outras espécies pertencentes a este gênero, *Calycophyllum candidissimum* e *Calycophyllum multiflorum*, ressaltando que as fibras da madeira dessas espécies ocupam 48 e 40%, do volume de madeira, respectivamente.

Tabela 6. Valores médios dos parâmetros mensurados das fibras da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.

Posição (%)	C (µm)	L (µm)	DL (µm)	EP (µm)	FP (%)
0	1219,51 b (28,20)	20,93 a (14,84)	8,88 a (27,18)	6,03 a (15,66)	57,98 a (12,57)
DAP	1459,79 a (15,74)	20,09 b (12,51)	8,27 b (22,15)	5,91 a (12,44)	59,09 a (9,55)
25	1447,40 a (17,20)	20,11 b (14,68)	8,18 b (25,67)	5,97 a (17,69)	59,49 a (12,33)
50	1424,53 a (14,88)	20,88 a (13,16)	8,97 a (25,83)	5,96 a (17,70)	57,27 b (14,98)
75	1269,15 b (16,60)	20,10 b (17,80)	9,06 a (33,64)	5,52 b (19,12)	55,55 b (16,91)
100	1277,04 b (19,67)	19,58 b (13,53)	8,68 a (24,29)	5,46 b (16,83)	55,95 b (13,33)
Média	1349,57 (18,78)	20,28 (14,52)	8,67 (26,91)	5,81 (16,59)	57,55 (13,39)

C = comprimento da fibra; L = largura da fibra; DL = diâmetro do lume; EP = espessura de parede; FP= fração parede; DAP = diâmetro à altura do peito. Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p>0,05$). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%).

Fonte: O autor.

O comprimento das fibras é influenciado pelas divisões que ocorrem nas direções longitudinais e tangenciais no câmbio, como resultado da taxa de hormônios da árvore, que pode variar com a sazonalidade, características do ambiente, genética e idade da árvore (MOREIRA, 1999).

Quanto à largura das fibras, os valores médios nas posições amostradas também diferiram estatisticamente. Os maiores valores foram encontrados nas posições da base e 50% da altura comercial do tronco, com valores médios de 20,93 e 20,88 µm. Os valores dos coeficientes de variação foram considerados baixos, variando entre 13,53 e 17,80%.

Para o diâmetro do lume, os menores resultados foram observados nas posições do DAP e 25% (8,27 e 8,18 µm), sendo estes considerados semelhantes. A média geral foi de 8,67 µm, cujos maiores valores de diâmetro do lume das fibras foram obtidos nas posições 0 (8,88 µm), 50 (8,97 µm), 75 (9,06 µm) e 100% (8,68 µm). Os coeficientes de variação foram considerados elevados, variando entre 22,15 a 33,64 %, demonstrando alta variação para esta característica.

Na produção de carvão vegetal, o diâmetro do lume das fibras influencia significativamente em sua qualidade, sendo desejáveis fibras com paredes celulares mais espessas e com lumes menores. Couto (2014) estudando a influência das propriedades anatômicas em madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão siderúrgico relatou que fibras com maior diâmetro do lume tendem a produzir carvão com menor densidade aparente, menor rigidez e resistência mecânica.

Em relação à espessura de parede, as posições mais próximas da base foram as que obtiveram maiores valores de espessura de parede. As posições 75 e 100% foram iguais estaticamente, com menores valores (5,52 e 5,46 μm) e diferiram das demais posições. Essa diminuição do espessamento da parede das fibras no sentido longitudinal pode ser dada pela maior proporção de madeira juvenil presente no topo das árvores, onde a espessura da parede é menor e o diâmetro do lume das células, maior. A espessura da parede possui relação com a qualidade da madeira. Quanto maior a espessura, maior será sua densidade e consequentemente a densidade do carvão produzido.

A fração parede foi maior nas três posições iniciais, já nas posições próximas ao topo, o percentual diminuiu. Os coeficientes de variação foram considerados baixos, com variação entre 9,55 a 16,91%. A média geral para esse parâmetro foi de 57,55%. A maior fração parede encontrada nos discos próximos à base indicam a tendência de menos espaços vazios na madeira, sendo uma característica desejável quando se quer produzir carvão vegetal com maior rendimento. Entretanto, segundo Paula (2005), a madeira destinada à produção energética deve possuir fração parede superior a 60%, seja para a queima direta ou para produção de carvão vegetal.

4.4.3 Mensuração do parênquima radial

Os valores médios e os coeficientes de variação dos parâmetros relacionados ao tecido radial da madeira de *Calycophyllum spruceanum* ao longo do tronco encontram-se na Tabela 7.

Não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos avaliados, referentes à altura do parênquima radial. A espécie obteve raios com altura média de 465,22 μm . Os coeficientes de variação referentes a este parâmetro variaram de

27,46 a 31,85%, sendo considerados elevados. Isso indica muita heterogeneidade no sentido axial.

Tabela 7. Valores médios dos parâmetros mensurados dos raios da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.

Posição (%)	Altura (μm)	Largura (μm)	Frequência ($\text{n}^\circ \text{mm}^{-1}$)
0	495,97 a (29,83)	42,78 a (34,20)	11,68 a (12,04)
DAP	465,22 a (27,46)	36,64 b (24,29)	11,11 b (12,33)
25	451,58 a (30,40)	36,35 b (27,14)	11,32 a (11,70)
50	458,36 a (30,29)	34,15 b (24,53)	10,80 b (13,36)
75	474,18 a (30,03)	38,02 b (25,26)	10,77 b (14,14)
100	446,04 a (31,85)	36,82 b (27,58)	11,14 b (13,32)
Média	465,22 (30,14)	37,46 (28,05)	11,14 (12,81)

DAP = diâmetro à altura do peito. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p > 0,05$).

Fonte: O autor.

Houve diferença entre as médias das posições relacionadas à largura dos raios, porém a média da posição 0% foi a única que diferiu das demais, com valor de 42,78 μm . Os elevados coeficientes de variação desse parâmetro indicam que o material possui alta variação em seu tecido radial na direção longitudinal.

Não foi observada uma tendência de variação de frequência dos raios em relação às posições. As médias das posições DAP, 50, 75 e 100% foram estatisticamente iguais, com menores valores em relação às posições 0 e 25%.

Segundo Oliveira et al. (2006), é importante que a madeira destinada à produção de carvão vegetal possua baixa proporção de tecidos parenquimáticos, visto que a presença desses elementos anatômicos pode interferir na qualidade do carvão. As células de parênquimas são pouco especializadas e possuem a capacidade de armazenar substâncias, as quais não são desejáveis durante o

processo de carbonização. Além disso, a elevada frequência de raios interfere na densidade da madeira e consequentemente na densidade do carvão.

Devido à baixa idade e diâmetro das árvores coletadas, as informações sobre a anatomia do lenho da espécie *Calycophyllum spruceanum* servem apenas para descrevê-la com a idade em que se encontravam antes da colheita em campo, e não como uma caracterização geral da espécie.

4.5 Retratabilidade e densidade básica

Houve diferença significativa entre as médias das posições no sentido longitudinal para a retratabilidade tangencial (Tabela 8). Os valores foram decrescentes do DAP ao topo da árvore, variando entre 6,00 e 7,45%, com média geral de 6,79%. Já para a retratabilidade radial, não houve diferença entre as médias das posições. Observa-se ainda, que a retratabilidade radial foi sempre menor que a tangencial, concordando com os estudos realizados por Oliveira et al. (2010) para madeiras de *Eucalyptus*. com idade aproximada de 16 anos, provenientes de uma plantação experimental em Anhembi, SP.

Tabela 8. Valores médios da retratabilidade e densidade básica da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.

Posição (%)	Retratabilidade (%)			Fator anisotrópico	Densidade básica (g cm ⁻³)
	Tangencial	Radial	Volumétrica		
0	7,29 a	4,04 a	11,34 a	1,80 a	0,690 a
DAP	7,45 a	4,86 a	12,30 a	1,53 a	0,652 a
25	6,95 a	4,93 a	11,88 a	1,41 a	0,650 a
50	6,82 a	5,07 a	11,89 a	1,34 a	0,616 b
75	6,25 b	4,51 a	10,77 b	1,39 a	0,606 b
100	6,00 b	4,15 a	10,15 b	1,44 a	0,602 b
Média	6,79 (7,29)	4,59 (16,68)	11,39 (7,89)	1,49 (16,47)	0,636 (6,00)

DAP = diâmetro à altura do peito. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p>0,05$).

Fonte: O Autor.

A retratabilidade volumétrica obteve comportamento semelhante ao da retratabilidade tangencial, com maiores resultados nas posições iniciais e menores nas posições do topo. Segundo Oliveira et al. (1997), a retratabilidade volumétrica

determina a variação total ocorrida na madeira, em função de sua higroscopicidade. Entretanto, as contrações lineares são mais relevantes, pois refletem no coeficiente de anisotropia da madeira.

Não foi observado diferença significativa entre os valores médios de coeficiente de anisotropia nas posições estudadas. A média geral foi de 1,49; considerado como excelente, segundo classificação proposta por Durlo e Marchiori (1992). Isso indica que a madeira é mais resistente a rachaduras e possui maior estabilidade dimensional. Quanto mais próximo do topo da árvore, menor será o fator anisotrópico da madeira e consequentemente maior sua estabilidade dimensional. Ressalta-se que árvores da mesma espécie com idade superior ou inferior a esta, podem não possuir as mesmas características.

Silva et al. (2006) estudando madeiras de *Eucalyptus grandis* em idades de 10, 14, 20 e 25 anos, relataram que houve variação crescente do fator anisotrópico em relação a idade, com médias de 1,67; 1,68; 1,74 e 1,72; respectivamente. Os autores concluíram que a idade influenciou nos valores de retratibilidades linear e volumétrica das madeiras em questão. Os valores dos fatores anisotrópicos cresceram positivamente com a idade e com o sentido radial.

Houve diferença significativa entre as médias dos valores de densidade básica da madeira. A densidade decresceu no longitudinal, sendo os maiores valores encontrados nas posições 0, DAP e 25% da altura comercial do tronco, com médias de 0,69; 0,65 e 0,65 g cm⁻³, respectivamente. As posições 50, 75 e 100% foram estatisticamente semelhantes, diferindo das demais posições, as quais também foram iguais. Observa-se que a madeira de Pau-mulo exibiu dois padrões diferenciados de densidade, em que da base à metade do tronco os valores foram maiores e da metade ao topo do tronco, os valores foram menores.

Essa diminuição dos valores de densidade básica da madeira no sentido longitudinal pode ser explicada pela diminuição da espessura da parede das fibras, em que as maiores espessuras de parede desses elementos anatômicos se encontram nas posições próximas à base e as menores próximas ao topo.

Para a produção de carvão vegetal, seria interessante o uso da madeira proveniente das posições iniciais, já que estas obtiveram maiores densidades; entretanto, outras características da madeira devem ser consideradas, como a composição química, física, energética e anatômica da madeira em cada uma dessas posições. Além disso, os discos da base possuem diâmetros maiores

comparados aos do topo, o que pode gerar um carvão com rachaduras e alta friabilidade. Contudo, é possível a separação da madeira de pau-mulato em duas classes de diâmetro para a carbonização, visto que a uniformidade do tamanho das peças de madeira influencia no processo.

Em peças de madeira com tamanho pequeno, a taxa de carbonização é maior quando comparada às peças de tamanho superior, pois as peças menores possuem maior superfície específica do que as maiores, carbonizando de forma mais rápida. Além disso, peças com maiores diâmetros devem ser organizadas no interior do forno, em que ocorrem as maiores temperaturas durante a carbonização (BRITO, 1999; FIGUEROA; MEDEIROS, 2009).

Os valores médios obtidos para a retratibilidade e densidade da madeira foram inferiores aos encontrados por Torre e Martina (2006), os quais estudaram a madeira de *Calycophyllum spruceanum* coletada na Amazônia Peruana, com idade desconhecida. A retratibilidade tangencial obtida pelos autores foi de 9%; retratibilidade radial 5%; retratibilidade volumétrica 15%; fator anisotrópico 1,80 e densidade básica de $0,76 \text{ g cm}^{-3}$.

4.6 Caracterização química e energética da madeira

O teor de extrativos da madeira foi de 7,79% (Tabela 9), considerado baixo quando se trata de uma espécie nativa tropical. Esse resultado observado está dentro do padrão referido por Jankowsky (1988), cujas madeiras em geral, possuem teor de extrativos inferior a 10%, entretanto, madeiras tropicais podem apresentar maiores quantidades.

Tabela 9. Caracterização química e energética da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade.

Parâmetro	Valor médio
Teor de extrativos totais (%)	7,79
Teor de lignina total (%)	30,93
Teor de cinzas (%)	0,66
Poder calorífico superior (kcal kg^{-1})	4788
Densidade energética (MJ m^{-3})	12759

Fonte: O Autor.

Castro et al. (2015), ao estudarem oito espécies da Amazônia coletadas em áreas de manejo, verificaram teores de extrativos superiores a 10%, como foram os casos do Jatobá (13,3%), louro-vermelho (15,4%) e carvalho (12,1%). O baixo teor de extrativos da madeira de Pau-mulato, comparado a outras espécies nativas tropicais, pode influenciar na quantidade de carvão produzido.

Oliveira et al. (2006) afirmam que quanto mais elevado o teor de extrativos e lignina presentes na madeira, maior será a qualidade do carvão vegetal, pois o elevado teor desses componentes resulta em um carvão com melhores características físico-mecânicas quando comparado às madeiras com baixo teor desses componentes; e, além disso, madeiras com maior teor de extrativos tendem a ser mais densas, o que é uma característica indispensável para a produção de carvão vegetal.

A madeira de *Calycophyllum spruceanum* possuiu alto teor de lignina, com média de 30,93%. Esse valor enquadra-se no padrão de lignina estabelecido por Santana e Okino (2007) para folhosas da Amazônia, o qual varia entre 28 e 36%. O alto teor de lignina encontrado nesse estudo também pode ser explicado pela baixa idade das árvores e, conseqüentemente pela quantidade de madeira juvenil presente no lenho. A lignina é um componente muito importante para produção de energia e carvão vegetal, pois segundo Silva et al. (2014), apresenta alto poder calorífico, cerca de 6100 kcal kg⁻¹.

Segundo Velden et al. (2010), a lignina produz mais carvão vegetal e alta fração de componentes aromáticos do que os outros componentes químicos constituintes da madeira, pois é termicamente mais estável e resistente; sua decomposição térmica ocorre em uma ampla faixa de temperatura. De acordo com Bartkowiak e Zakrzewski (2004), em temperatura de 600 °C, perdas de massa da lignina não ultrapassam a 60%. Isso explica sua relação com a qualidade do carvão vegetal, sendo o componente responsável por maior parte de sua produção.

Pereira et al. (2013) em estudo com seis clones de eucalipto aos oito anos de idade, coletados em plantio florestal no município de Lassance, MG, destacaram que madeiras mais lignificadas proporcionam maior produção em carvão vegetal e elevado poder calorífico, em virtude da degradação mais rápida dos componentes químicos ricos em oxigênio.

Outro ponto positivo de madeiras com elevados teores de lignina para a carbonização é que provavelmente o carvão obtido nesse processo possuirá

maiores teores de carbono fixo, em consequência das porcentagens de carbono elementar presentes na composição da lignina. O teor de carbono na lignina da madeira de folhosas é de 60% (KLOCK et al., 2013).

O teor de cinzas encontrado para a espécie foi de 0,66%, considerado baixo, que de acordo com Brand et al. (2013), madeiras com teores de cinzas abaixo de 5% são ideais para uso energético, seja na forma de lenha ou carvão vegetal, visto que o uso da madeira pra tais finalidades não serão prejudicados pelo elevado teor de tais constituintes. Elevados teores de cinzas são características negativas para utilização da madeira como fonte de energia, pois as fornalhas deverão ser limpas com maior frequência e em outros sistemas em que a madeira também é utilizada como fonte energética, pode até causar a danificação dos equipamentos.

Trugilho et al. (1991) em seu trabalho sobre as características da madeira e carvão vegetal de doze árvores exóticas da Amazônia, observam variações nos teores de lignina. Os valores de lignina variaram entre 17,94 e 35,21%; cinzas entre 0,15 e 0,87%. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, pode-se inferir que o pau-mulato obteve resultados dentro do esperado para espécies nativas do bioma Amazônia.

A espécie obteve poder calorífico superior de 4788 kcal kg⁻¹, conforme esperado para madeiras de folhosas, que se encontra entre 3500 e 5000 kcal kg⁻¹ (BRITO, 1993). Esse valor é considerado bom para a utilização como fonte de energia e pode estar relacionado com a constituição química da madeira, tendo como influência principal dos teores de lignina e extrativos da madeira em estudo.

A densidade energética da madeira foi de 12759 MJ m⁻³, estando próxima aos valores encontrados por Santos e Oliveira (2014) para espécies lenhosas da Amazônia de uso energético. Os mesmos identificaram dez espécies nativas com densidade energética que variou entre 7148 e 29549 MJ m⁻³. Os valores são desejáveis para utilização da madeira como fonte de energia, visto que quanto maior densidade energética, maior será a quantidade de energia liberada durante o processo de combustão (PROTÁSIO, 2011).

Os valores de densidade energética foram inferiores aos encontrados por Moutinho et al. (2011), os quais estudaram madeiras de espécies conhecidas na Amazônia como matá-matá (*Eschweilera* Mart Ex Dc) em comparação com um clone de *Eucalytus* sp. aos cinco anos de idade. Os autores constataram que a densidade energética das espécies amazônicas variou entre 14951 e 18020 MJ m⁻³; os quai

foram superiores ao da madeira de *Eucalytus* sp., com 9085 MJ m⁻³, sendo a densidade energética da madeira do Pau-mulato também superior à do clone avaliado, porém inferior à densidade energética das espécies amazônicas.

De modo geral, pode-se dizer que a madeira de Pau-mulato obteve características químicas e energéticas dentro do esperado para espécies nativas da região amazônica.

4.7 Propriedades avaliadas do carvão vegetal

As marchas de carbonização obtiveram diferenças significativas para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em líquido pirolenhoso (Tabela 10). O rendimento médio em carvão vegetal foi de 36,65%. Observa-se que as marchas com maiores taxas de aquecimento resultaram em menores rendimentos em carvão. Isso ocorre devido à rápida eliminação dos gases gerados no leito de carbonização em maiores velocidades, gerando maiores quantidades de finos quando comparado com taxas de aquecimento menores (VELLA et al., 1989).

Tabela 10. Rendimentos gravimétricos, análise química imediata, poder calorífico superior, densidade aparente e energética do carvão vegetal de *Calycophyllum spruceanum* em diferentes marchas de carbonização.

Parâmetros	M1	M2	M3	Média/CV
RGC (%)	35,41 b	36,08 b	38,47 a	36,65 (1,64)
RGL (%)	46,80 a	43,56 b	41,22 b	43,86 (6,31)
RGNC (%)	17,78 a	20,36 a	20,31 a	19,48 (13,19)
TMV (%)	22,33 a	21,78 a	22,83 a	22,31 (2,56)
TCz (%)	1,76 a	1,66 a	1,41 b	1,61 (8,72)
TCF (%)	75,90 a	76,56 a	75,76 a	76,07 (0,72)
PCS (Kcal kg ⁻¹)	7374 b	7509 a	7525 a	7469 (0,90)
Densidade aparente (g cm ⁻³)	0,498 c	0,607 b	0,649 a	0,585 (11,11)
Densidade energética (MJ m ⁻³)	15371 c	19104 b	20469 a	18314 (11,10)

RGC = rendimento gravimétrico em carvão, RGL = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso, RGNC = rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis, TMV = Teor de materiais voláteis, TCz = teor de cinzas, TCF = teor de carbono fixo, PCS = poder calorífico superior. M1 = marcha de carbonização com taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹, M2 = marcha de carbonização com taxa de aquecimento de 1,12 °C min⁻¹, M3 = marcha de carbonização com taxa de aquecimento de 0,83 °C min⁻¹. Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott (p>0,05).

Fonte: O autor.

Os valores de rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso foi inversamente proporcional ao rendimento em carvão vegetal, ou seja, as marchas com maiores rendimentos em carvão foram as que geraram menores quantidades de líquido pirolenhoso. As marchas M2 e M3 não diferiram estatisticamente entre si e obtiveram menores resultados, com médias de 43,56 e 41,22%, enquanto que a marcha M1 apresentou média de 46,80%, diferindo significativamente das demais. Já o rendimento em gases não condensáveis não foi afetado pelas marchas de carbonização, pois não houve diferença significativa entre as médias avaliadas. O rendimento médio foi de 19,48%.

Andrade e Carvalho (1998) avaliaram as potencialidades energéticas de oito espécies coletadas em um trabalho de manejo florestal no Rio de Janeiro, com idades não informadas. Os autores testaram duas marchas distintas de carbonização, com temperaturas máximas de 250 e 400 °C. Na temperatura máxima de 250 °C, o Pau-mulato obteve rendimento em carvão vegetal de 39,01%; líquido pirolenhoso de 36,82% e gases não condensáveis de 24,16%. Na temperatura de 400 °C, a mesma espécie possuiu rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis de 31,76; 41,22 e 27,02%, respectivamente. Os resultados não se assemelharam aos encontrados nesse estudo, entretanto a temperatura máxima de 400 °C foi a que apresentou resultados mais próximos.

Quanto à análise química imediata, o carvão vegetal obteve baixos teores de materiais voláteis e de cinzas e elevado teor de carbono fixo. Essas características químicas são essenciais para a utilização energética do carvão, que de acordo com Brand (2010), combustíveis com baixos teores de materiais voláteis somado ao elevado teor de carbono fixo, queimam lentamente e em consequência disso, permanecem por mais tempo na fornalha até a queima total.

Em relação ao teor de materiais voláteis, não houve diferença significativa entre as médias das marchas de carbonização, cuja média geral foi de 22,31%. Esse valor enquadra-se no padrão citado por Santos (2008), a qual determina que o carvão utilizado na siderurgia deva possuir percentagens inferiores a 25%. Além disso, baixos teores de materiais voláteis são desejados para o uso doméstico, pois liberam menos substâncias tóxicas e possuem maior eficiência energética.

As médias do teor de carbono fixo também não diferiram significativamente entre si, indicando que não houve influência das marchas de carbonização. Como

esperado, as marchas que produziram carvões que obtiveram o menor teor de materiais voláteis foram os que possuíram maior teor de carbono fixo, ou seja, são inversamente proporcionais.

Para o teor de cinzas do carvão, houve diferença significativa entre as médias das marchas avaliadas. As marchas M1 e M2 possuíram maiores percentuais, foram estatisticamente semelhantes e diferiram da marcha M3.

Observa-se que o teor de cinzas foi decrescente, com diminuição de 19,89% da marcha M1 para a M3, o que pode ser explicado pela diminuição da taxa de aquecimento e aumento do tempo de carbonização da madeira. O teor de cinzas obteve resultados inversos ao rendimento em carvão vegetal, visto que as marchas com maiores valores de rendimentos em carvão possuíram menores teores de cinzas. É preferível que o carvão possua menores teores de cinzas, já que esses minerais não participam do processo de combustão e contribuem para a redução do poder calorífico (BRAND, 2010). O carvão com elevado teor de cinzas não é aconselhável para uso industrial, pois indica que o combustível possui altos níveis de minerais em sua composição, os quais podem prejudicar o metal que será fabricado, causando segregação (PEREIRA et al., 2013).

Andrade e Carvalho (1998) analisaram a composição química imediata do carvão vegetal proveniente da madeira de pau-mulato com idade não informada, os quais foram produzidos em temperatura máxima de 400 °C. Como resultados, obtiveram carvão vegetal com 22,00% de materiais voláteis, 3,25% de cinzas e 74,75% de carbono fixo. Apesar das condições operacionais da carbonização terem sido diferentes da empregada nesse estudo, os teores de materiais voláteis e carbono fixo foram próximos, enquanto que o teor de cinzas foi mais elevado.

A análise do poder calorífico superior mostrou ter ocorrido diferença significativa entre as marchas, em que os carvões produzidos na M2 e M3 obtiveram maiores resultados (7509 e 7525 Kcal kg⁻¹), diferindo da marcha M1, a qual possuiu valor médio de 7374 Kcal kg⁻¹. A diminuição da taxa de aquecimento e aumento do tempo de carbonização da madeira fez com que ocorresse um aumento de 2,06% do poder calorífico da marcha M1 para a M3, mostrando efeito significativo. Já da marcha M2 para a M3, o aumento foi de apenas 0,22%. Esse resultado também apresentou relação com o aumento da densidade relativa aparente do carvão vegetal e diminuição do teor de cinzas.

Oliveira et al. (2010), analisando o carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell aos cinco anos de idade, proveniente de um plantio florestal no estado de Minas Gerais, com árvores plantadas em espaçamento de 3,0 x 2,0 m, constataram que o poder calorífico foi pouco influenciado pelas marchas de carbonização. Os valores variaram entre 8023 e 8339 Kcal kg⁻¹.

A composição química do carvão também possui influência sobre o poder calorífico. Segundo Oliveira (1982), a relação entre carbono fixo e materiais voláteis confere um carvão com maior poder calorífico. Os resultados obtidos nesse trabalho vêm a confirmar tal argumentação, visto que os altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis presentes no carvão do pau-mulato proporcionaram um poder calorífico satisfatório.

A análise de variância indicou que o efeito das marchas de carbonização foi significativo para a densidade aparente do carvão. A densidade foi crescente da marcha M1 à M3, com aumento significativo de 23,27%. Como esperado, os carvões produzidos nas marchas de menor taxa de aquecimento e maior tempo de carbonização, obtiveram carvões com maiores densidades. A marcha M3 possuiu maior média, com densidade de 0,649; g cm⁻³. Já as marchas M1 e M2 obtiveram resultados inferiores, com valores de 0,498 e 0,607 g cm⁻³.

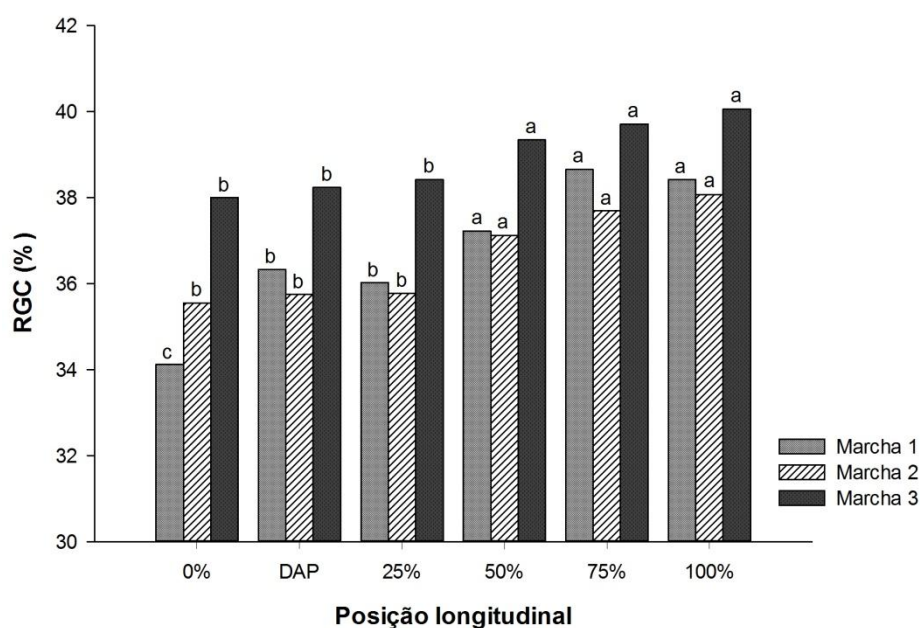
Esse aumento dos valores de densidade aparente do carvão é explicado pelas reações decorrentes do processo de carbonização, em que há a adsorção dos materiais voláteis à superfície do carvão, os quais são rapidamente carbonizados, liberando água, metano, dióxido de carbono, entre outros coprodutos. A diminuição da taxa de aquecimento eleva o aumento do rendimento em carvão como resultado dessas reações, aumentando sua densidade (ANTAL et al., 2000).

Quando avaliados os valores de rendimento gravimétrico em carvão nas posições longitudinais (Figura 6), verifica-se que houve diferença significativa entre as médias, com padrão crescente para as três marchas avaliadas. Apesar de nas posições longitudinais de 50, 75 e 100% a madeira ter menor densidade básica, fibras com lumes maiores e menor espessura de parede; as mesmas também possuíram maiores rendimentos em carvão.

O aumento gradativo do rendimento em carvão vegetal da madeira de pau-mulato ao longo do tronco pode ser explicado pela maior proporção de madeira juvenil presente no topo das árvores, e consequentemente pela maior deposição de lignina presente na parede das células. Portanto, a madeira juvenil tende a

apresentar maior teor de lignina, exercendo grande influência sobre as características físicas e químicas dos seus derivados energéticos (TRUGILHO et al., 1996).

Figura 6. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal da madeira de *Calycophyllum spruceanum* aos seis anos de idade no sentido longitudinal.



Médias de uma mesma marcha de carbonização, seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p > 0,05$).

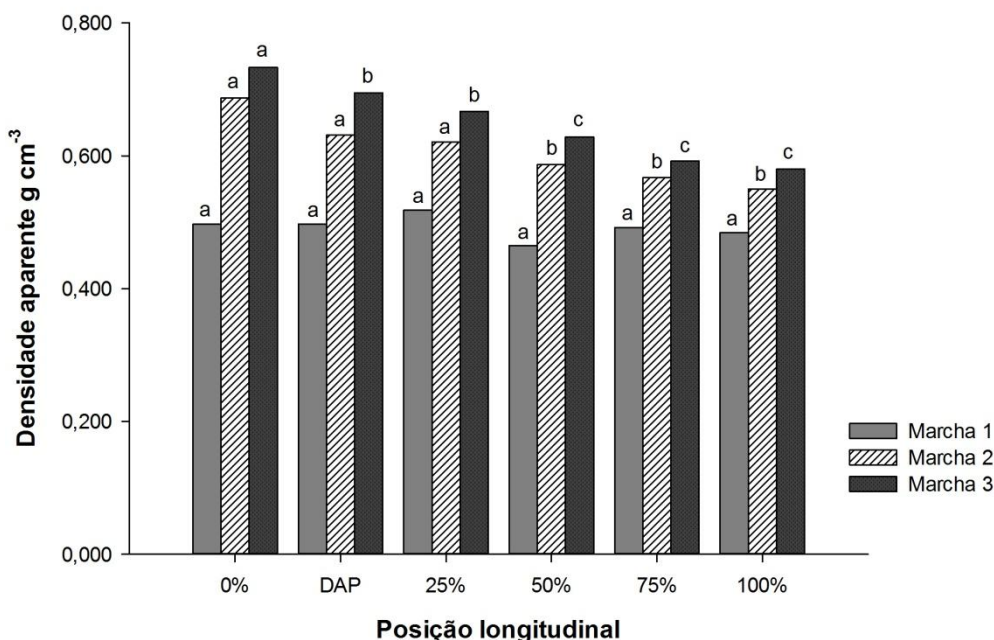
Observa-se ainda, que a marcha M3 possuiu maior rendimento em carvão vegetal em todas as posições analisadas. Entretanto, o processo de carbonização teve duração de sete horas e meia, duas horas a mais do que a marcha M2 e três horas e meia a mais do que a marcha M1. Quando se deseja produzir carvão vegetal, o tempo de carbonização também precisa ser avaliado, já que poderá influenciar tanto na qualidade do produto final, quanto nos custos de produção.

A qualidade do carvão vegetal foi influenciada pelas marchas de carbonização. As madeiras carbonizadas nas marchas M1 e M2 produziram carvões com mais trincas e fissuras do que os carvões produzidos na marcha M3, pois o tempo de carbonização foi menor, havendo o aumento repentino de temperatura. As trincas e fissuras surgem durante a transformação da madeira em carvão vegetal, devido o aumento na pressão de vapor de água no interior das células fibrosas,

causando rupturas. Maiores taxas de aquecimento geralmente produzem carvões mais friáveis (OLIVEIRA, 1982).

No sentido longitudinal, houve um decréscimo dos valores de densidade aparente do carvão produzido nas marchas M2 e M3 (Figura 7). A análise de variância constatou que não houve diferença significativa entre as posições longitudinais para a marcha M1, possuindo valores médios muito próximos.

Figura 7. Densidade aparente do carvão vegetal de *Calycophyllum spruceanum* no sentido longitudinal proveniente de árvores aos seis anos de idade.



Médias de uma mesma marcha de carbonização, seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Sknott - Knott ($p > 0,05$).

O comportamento da densidade foi similar nas marchas M2 e M3, com maiores valores nas posições próximas à base e menores nas posições próximas ao topo. Essa tendência é explicada pela densidade básica da madeira do Pau-mulato, a qual possuiu o mesmo comportamento. As madeiras das posições 0, DAP e 25% obtiveram maior densidade e por conseguinte, o carvão vegetal obteve maior densidade aparente. Assim, é possível afirmar que as baixas taxas de aquecimento associadas à madeira com elevada densidade, resultaram em um carvão com maior densidade.

A densidade energética, assim como a densidade aparente do carvão vegetal também foi influenciada pelas marchas de carbonização. A marcha M3 obteve maior densidade energética, com valor de 20469 MJ m^{-3} , enquanto que a marcha M1 possuiu menor resultado, sua média foi de 15371 MJ m^{-3} . Ocorreu um aumento significativo de aproximadamente 25% da marcha M1 à M3. Esse resultado deve-se também ao aumento do poder calorífico superior e densidade aparente do carvão vegetal.

Há uma escassez de trabalhos para a espécie em questão, envolvendo a produção de carvão vegetal que possam ser comparados. Os baixos coeficientes de variação das análises dos rendimentos gravimétricos, análise química imediata, poder calorífico superior, densidade aparente e energética do carvão vegetal de *Calycophyllum spruceanum* indicam a homogeneidade dos dados observados.

5 CONCLUSÕES

As propriedades anatômicas juntamente com as propriedades físicas, conferem à madeira de pau-mulato boas características tecnológicas, devido à relação entre os elementos anatômicos com a densidade básica da madeira.

O estudo da variação longitudinal da densidade básica da madeira de *Calycophyllum spruceanum* permitiu o entendimento do seu comportamento ao longo do tronco, podendo indicar as madeiras próximas do topo para uso energético.

O carvão vegetal produzido a partir da madeira de pau-mulato, procedente de árvores com seis anos de idade, possui potencial para comercialização e utilização como fonte energética, tanto na forma de lenha como carvão vegetal, inclusive para fins siderúrgicos.

Os carvões produzidos na marcha M1 tornaram-se mais quebradiços, com presença de trincas e fissuras. As análises químicas e energéticas verificaram a qualidade inferior do carvão.

Por terem apresentado maiores resultados de rendimento em carvão vegetal, poder calorífico superior, densidade aparente e energética, baixo teor de cinzas; as marchas M2 e M3 foram consideradas melhores para a produção de carvão vegetal da espécie.

As menores taxas de aquecimento são recomendadas para carbonização da madeira de pau-mulato, em virtude de sua influência na quantidade e qualidade do carvão vegetal.

Ainda que, considerada uma espécie de alto valor econômico na região Amazônica, pouco se conhece sobre as características do pau-mulato. Estudos sobre suas características, como a cor, densidade e retratibilidade contribuirão com o conhecimento científico, tornando uma ferramenta considerável para valorização e comercialização da madeira.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE (Estado). Governo do Estado do Acre. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre. Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre Fase II: documento Síntese** – Escala 1:250.000. Rio Branco: SEMA, 2006. 354 p.

ALMEIDA, M. C. **Pau-mulato-da-várzea *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum.** Manaus: Rede de Sementes da Amazônia, 2004. 2p. (Informativo Técnico Rede de Sementes da Amazônia, 6).

ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.

ANTAL, M. J. et al. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & engineering chemistry research**, Washington, v. 39, n. 11, p. 4024-4031, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: projeto de estruturas da madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112**: carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro, 1983.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2011**: ano base 2010. Brasília: ABRAF, 2011. 130p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – **ABTCP**: normas técnicas. São Paulo, 1997.

AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006.

BALDIN, T; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) K. Schum. E *Calycophyllum spruceanum* F. *Brasiliensis* K. Schum. **Balduinia**, Santa Maria, n. 50, p. 16-23, 2015.

BAMBER, R. K.; HORNE, R.; GRAHAM HIGGS, A. Effect of fast growth on the wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Australian Forest Research**, Canberra, v. 12, p. 163-7, 1982.

BARTKOWIAK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignins isolated from Wood. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, Oxford, v. 77, n. 1, p. 296-304, 2004.

BOIVIN-CHABOT et al. Variation in coppice-shoot growth among provenances of *Calycophyllum spruceanum* Benth. in the Peruvian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 198, n. 1, p. 249-260, 2004.

BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido à partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília: **Ministério de Minas e Energia**. 2015.

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos. Avançados**, São Paulo, v.4, n.9, p.221-227, 1999.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos florestais**, v. 9, p. 1-19, 1990.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. (Circular Técnica, 181).

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 71, p. 30-41, 2001.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CASTRO, J. P. et al. Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 319-327, 2015.

COMMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS – COPANT. Descripción de características generales, macroscópicas de lãs maderas angiospermas dicotiledóneas. **COPANT**, Buenos Aires, v. 30, p.1-19, 1974.

COUTO, A. M. **Influência das propriedades, anatômicas, químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão para uso siderúrgico**. 2014. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/4584>>. Acesso em: 10 maio 2016.

D'OLIVEIRA, M. V. N. **Estudo do mulateiro, *Calycophyllum spruceanum* Benth, em condições de ocorrência natural e em plantios homogêneos**. Rio Branco: EMBRAPA-CPAF-Acre, 1992.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira**: Retratibilidade. Santa Maria: CEPEF/FATEC. Série técnica, 1992. 33 p.

ESCOBAR, J. Madeira: o combustível do futuro. **Biomais**, Campos Novos, v. 2, n. 8, p. 23-31, 2015.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FRANKE, I. L. Levantamento de uma população de mulateiro (*Calycophyllum spruceanum*) em pastagem no Acre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 3., 2000, Manaus. Manejando a biodiversidade e compondo a paisagem rural. **Anais...** Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2000. p.229-231. (Embrapa Amazônia Ocidental, Documentos, 7).

GOLDSHIMID, O. Ultraviolet spectre. In: SARKANEN, K. V., LUDWING, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: J. Wiley, p. 241 – 298, 1971.

GOMEZ, F. M. et al. Caracterização da estrutura anatômica do lenho de árvore de *Calycophyllum spruceanum* Benth. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2006, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: USP, 2006. Disponível em: <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoObter?numeroInscricaoTrabnume=4190&numeroEdicao=14&print=S>>. Acesso em: 10 set. 2015.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, São Paulo, v.47, n.8, p36-38, 1986.

GONÇALEZ, J. C. et al. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 72, p. 47-58, 2001.

GUEDES, M. C. **Embrapa Amapá desenvolve pesquisas para regeneração natural do pau mulato**. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf/busca-de-noticias/-/noticia/3162581/embrapa-amapa-desenvolve-pesquisas-para-regeneracao-natural-do-paumulato>> Acesso em: 10 fev. 2016.

GUEDES, M. C. et al. **Regeneração do pau-mulato**: manejo para uso sustentável da várzea. Amapá: Embrapa Amapá, 2012. 2p. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/122256/1/CPAF-AP-2012-pau-mulato.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS – IAWA Committee. List of microscopic features for hardwood identification, with an appendix on non-anatomical information. **IAWA Bulletin**, Leiden, n. 10, v. 3, p. 219-332, 2007.
JANKOWSKY, I.P. **Colagem de madeiras**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1988. 45 p.

KLOCK, U.; ANDRADE, A.S. **Química da madeira**. 4. ed. Curitiba: Fupef, 2013. 87p.

LEÃO, A.C.; ARAÚJO, A. A; SOUZA, L.A.C. **Implementação de sistema de gerenciamento de cores para imagens digitais**. Poços de Caldas: PUC-Minas, 2005. 37 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.

MARANHO, L. T. et al. Variação dimensional das traqueídes ao longo do caule de *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl., Podocarpaceae. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 20, n. 3, p. 633-640, 2006.

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

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira**: informações sobre 90 espécies comerciais. Manaus: SEBRAE-AM, 2000. 212 p.

MORI, C.L.; C.L.S.O.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; TRUGILHO, P.F.; GONÇALEZ, J.C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v.11, n. 2, p. 137-146, 2005.

MÖTTÖNEN, V.; KÄRKI, T. Effect of drying force on birch wood colour change during high temperature drying. **Baltic Forestry**, Kaunas, v. 13, n. 1, p. 126-130, 2007.

MOUTINHO, V. H. P. et al. Energetic characterization of matá-matá wood from the brazilian rainforest (*Eschweilera* Mart Ex Dc). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 457-461, 2011.

OLIVEIRA, A. D. et al. Determinação da variação dimensional da madeira em clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* aos 90 meses de idade. In: IUFRO: CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPT, 1997, Colombo. **Anais...** Colombo: Embrapa/CNPQ, 1997.

OLIVEIRA, E. et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. (Org.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 60-73. (Série de Publicações Técnicas, 8).

OLIVEIRA, J. T. et al. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: Mc. Graw-Hill, 1980. 705p.

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

PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, North Carolina, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p.(EMBRAPA Florestas. Documentos, 38).

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C.; OLIVEIRA E. **Curso de carbonização**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. 2010. 94p.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. 2. ed. Belo Horizonte, 2006. 120p.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.

RAMALHO, R. S. **O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras**. Viçosa: UFV, 1987. 4p.

RECORD, S. J.; HESS, R. W. **Timbers of the new world**. New Haven: Yale University Press, 1949. 640p.

REZENDE, M. A. Retratabilidade da madeira de *Pinus caribæa* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 120-127, 2003.

ROCHA, F. T. et al. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2004.

RODRIGUES, T. E. et al. **Caracterização e Classificação dos Solos do Campo Experimental da Embrapa Acre, Rio Branco, Estado do Acre**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 45 p. (Documentos, 122).

ROSILLO-CALLE, F. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: UNICAMP, 2005. 447p.

RUSSELL, J. R. et al. Genetic variation of riverine populations of *Calycophyllum spruceanum* in the Peruvian Amazon Basin, revealed by AFLP analysis. **Molecular Ecology**, Malden, v 8, p. 199–204, 1999.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. **Holzforschung**, Berlin, v.61, n.5, p. 469-477, 2007.

SANTOS, E. C. S.; OLIVEIRA, F. M. Densidade energética de espécies lenhosas para uso energético. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/12107056/Densidade_energ%C3%A9tica_de_esp%C3%A9cies_lenhosas_para_uso_energ%C3%A9tico>. Acesso em: 10 maio 2016.

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

SILVA, D. A. et al. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SILVA, E. S. et al. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 1, p. 31-37, 2015.

SILVA, J. C. et al. Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 803-810, 2006.

SOTELO MONTES, C. et al. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **New Forests**, West Lafayette, v. 35, n. 1, p. 57-73, 2008.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Test methods T 257 om-92**: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, v.1, 1992.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, p. 35-42, 1987.

TORRE, C. R.; MARTINA, A. M. S. **Guía de procesamiento industrial**: fabricación de muebles con maderas poco conocidas – LKS. Lima: Argentina S.R.L, 2006. 20 p. Disponível em: <http://plantarperu.com/guia_capirona.pdf>. Acesso em: 15 maio 2016.

TRIANOSKI, R. et al. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de *Pinus* tropicais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 3, p. 398-406, 2013.

TRUGILHO P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F. et al. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 144-151, 1991.

TRUGILHO, P. F. et. al. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VELDEN, M. V. et al. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 232-242, 2010.

VELLA, M. M. C. F. et al. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **IPEF**, Piracicaba, n.41/42, p.64-76, 1989

VITAL, B. R. et al. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 41/42, p. 44-49, 1989.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim Técnico, 1).

WILKES, J. Variations Inwood anatomy within species of *Eucalyptus*. **IAWA Journal**, v. 9, n. 1, p. 13-23, 1988.

ZANUNCIO, A. J. V.;FARIAS, E. S.; SILVEIRA, T. A. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 1, p. 85-90, 2014.