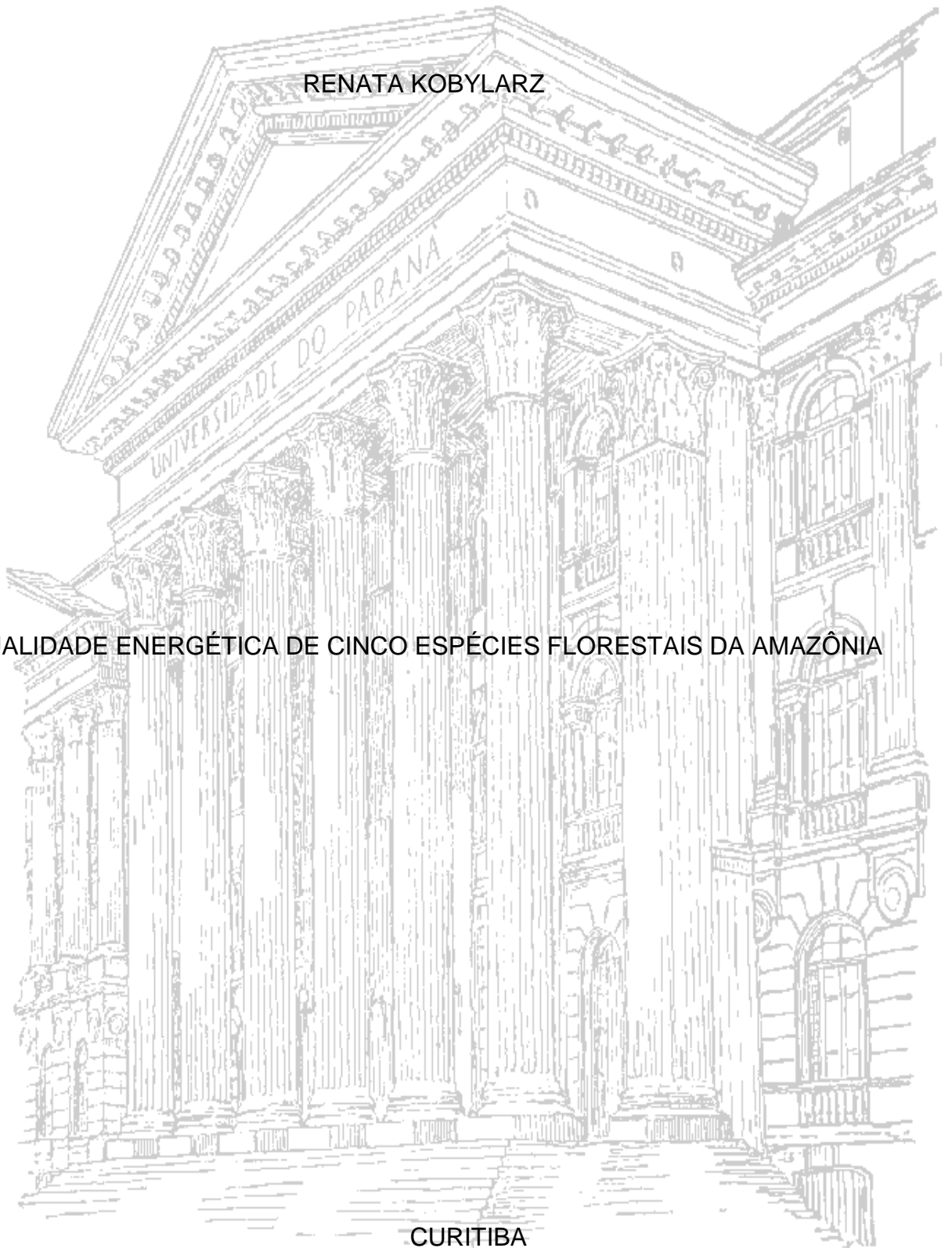


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

RENATA KOBYLARZ

QUALIDADE ENERGÉTICA DE CINCO ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA



CURITIBA

2016

RENATA KOBYLARZ

QUALIDADE ENERGÉTICA DE CINCO ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do título.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

CURITIBA

2016

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade energética da madeira de cinco espécies amazônicas: *Protium spp.* (Breu Vermelho), *Eschweilera coriaceae* (DC.) Mart (Piaozinho), *Eschweilera odora* (Mata-Matá), *Byrsonima crista* A. Juss. (Murici), *Inga spp.* (Inga Vermelho). Foram confeccionados corpos de prova de dimensões 2x2x3cm e determinadas as seguintes propriedades: densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão, análise química imediata e poder calorífico superior da madeira e do carvão, rendimentos do carvão vegetal, análise termogravimétrica da madeira e extrativos totais e lignina da madeira. A carbonização foi realizada em forno mufla com taxa de aquecimento de 5°C por minuto e temperatura de 450°C. Os resultados foram tratados estatisticamente através de análises de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias de Tukey para as propriedades estudadas. Os resultados mostraram que há diferenças significativas entre as espécies para todas as propriedades avaliadas e que todas as espécies apresentam o potencial como fonte bioenergética. Entretanto, a espécie *Eschweilera coriaceae* (DC.) Mart apresentou a maior densidade básica e energética tanto na madeira quanto no carvão.

**Palavras Chaves:** energia de biomassa, carvão vegetal de espécies nativas, qualidade energética.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the power quality of wood from five amazonian species: *Protium spp.* (Red Breu), *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart (Piaozinho) *Eschweilera odora* (Mata-Mata), *Byrsonima crispera* A. Juss. (Murici), *Inga spp.* (Inga). The samples were made by test pieces with 2x2x3cm dimensions and energetic properties were determined as following: basic wood density and apparent coal density, proximate chemical analysis and higher calorific value for wood and coal; charcoal income, thermal gravimetric analysis of wood, total extractives and lignin of wood. Carbonization was performed in a muffle furnace at a heating rate of 5°C per minute and 450°C temperature. The results were statistically treated with analysis of variance (ANOVA) and Tukey's range test, for all studied properties. The results showed that there are significant differences between species to all assessed properties and they all have potential as a source of bioenergy. The specie *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart presented the major basic density and energy both in wood as no coal.

**Keywords:** biomass energy, charcoal from native species, energy quality.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Valores médios das propriedades energéticas da madeira. ....	30
<b>Tabela 2:</b> Valores médios para Teores de Extrativos Totais, lignina e Holocelulose para a madeira. ....	34
<b>Tabela 3:</b> Valores médios das propriedades energéticas do carvão vegetal. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>8</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	8
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	8
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>9</b>
3.1	RESÍDUOS DE MADEIRA PARA ENERGIA .....	9
3.2	CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA .....	10
3.3	CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL .....	12
3.4	PROPRIEDADES ENERGÉTICAS .....	13
3.5	PIRÓLISE .....	19
3.6	DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA .....	20
3.7	ESPÉCIES ESTUDADAS .....	21
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1	MATERIAL BIOLÓGICO E PIRÓLISES.....	26
4.2	AVALIAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL .....	27
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	29
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>30</b>
5.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES DA MADEIRA.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
5.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES DO CARVÃO .....	35
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A região amazônica é considerada uma das maiores reservas de madeira tropical do mundo em função da extensão de sua área, variabilidade de suas espécies, e importância econômica e ecológica que a região e suas espécies representam.

Um ponto importante à respeito das espécies amazônicas é a falta de informações técnicas sobre as mesmas, o que impede o uso racional, o manejo sustentável e até mesmo estudos sobre a preservação das espécies da região (SBS, 2006).

Obter conhecimento das propriedades energéticas das espécies florestais amazônicas é de fundamental importância para definir a utilização potencial dos resíduos madeiros proveniente de flora nativa da região amazônica.

A utilização desses resíduos na produção de energia para utilização em caldeiras ou fornos já é uma realidade no Brasil. Esse processo apresenta vantagens como baixo custo de aquisição, não emissão de dióxido de enxofre, cinzas menos agressivas ao meio ambiente que as geradas de combustíveis fósseis, menor risco ambiental e recurso renovável.

Os resíduos madeiros podem ser carbonizados e transformados em carvão vegetal onde o Brasil é um grande produtor e sua produção corresponde a 1/3 da produção mundial. Grande parte desse carvão é utilizado por indústrias siderúrgicas nacionais, especialmente em regiões do Sudeste (MG) e do Norte (PA), onde a demanda é maior dessa fonte de energia, agente redutor de minério de ferro em substituição ao coque de carvão mineral, principalmente na produção de ferro-gusa por empresas independentes denominadas guseiras (SBS, 2005).

Por possuir pouco enxofre em sua composição química, o carvão vegetal proporciona uma qualidade melhor ao ferro-gusa e ao aço produzidos, o que leva a uma valorização dos produtos no mercado, e que analistas apontam que o carvão vegetal é uma realidade difícil de ser retirada na siderurgia brasileira.

Em função da falta de dados técnicos de pesquisas sobre as propriedades energéticas de espécies nativas da Amazônia, foi realizado esse trabalho que avaliou resíduos de cinco espécies utilizadas fins diversos na região.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as espécies amazônicas: *Protium spp.*, *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart, *Eschweilera odora*, *Byrsonima crispera*, *Inga spp.*, visando ao aproveitamento dos resíduos dessas madeiras para fins energéticos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as propriedades químicas e energéticas das madeiras;
- Analisar a degradação térmica da madeira;
- Analisar a qualidade / propriedade do carvão vegetal obtido.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 RESÍDUOS DE MADEIRA PARA ENERGIA

Segundo Aguilar (2015), a produção de resíduos é decorrente de matérias-primas parcialmente empregadas em processos produtivos. Quando esses processos buscam maior sustentabilidade têm como resultado menor geração de resíduos ou recorre-se à adoção de tecnologias para recuperar os resíduos gerados, transformando-os em subprodutos e obtendo benefícios ambientais e econômicos.

O resíduo no setor florestal é o que sobra da colheita florestal e da produção madeireira (desdobro e beneficiamento). Estes resíduos podem ser reutilizados pela própria indústria ou podem ser convertidos em subprodutos que podem ser vendidos e gerar lucros (AGUILAR, 2015).

Estima-se que do volume total de uma árvore sejam aproveitados em torno de 40% a 60% no processamento da tora. Dessa forma, a cada 10 árvores colhidas para produção de madeira serrada, apenas o volume referente a cinco são aproveitadas comercialmente. O restante quando não são aproveitados podem ser considerados passivos ambientais (MOUTINHO, 2016).

Os resíduos lignocelulósicos provenientes de serrarias são classificados basicamente em três tipos (TINTI, 2015):

- Serragem: encontrado na maioria das indústrias de madeira (serrarias). Gerado pelo processo de usinagem com serras;
- Cepilho: proveniente de indústrias beneficiadoras da madeira. Gerado nas plainas;
- Lenha: são resíduos maiores, como aparas, refilos, casca e roletes. Presente também em todas as indústrias madeireiras

A representatividade, segundo Aguilar (2015), dos tipos de resíduo correspondente a lenha, serragem e cepilho são dos 71%, 22% e 7%, respectivamente, existindo diversas aplicações que podem ser dadas aos resíduos de madeira:

- Queima direta, em caldeiras, como lenha ou resíduo, gerando calor ou vapor de processo;

- Queima direta em termelétrica para produção e comércio de energia elétrica;
- Queima direta em queimadores de partículas como ocorre na indústria de cerâmica vermelha;
- Compactação de resíduos, transformando-os em briquetes para posterior utilização;
- Produção de carvão utilizando comumente para carbonização de lenha;
- Produção de carvão ativo, a partir de finos de carvão ou de finos de madeira, através de ativação física ou química;
- Chapas de partículas e fibras;
- Polpa - para produção de papel.
- Cargas para compostos poliméricos - o uso dos resíduos de madeira como aditivo de polímeros termoplásticos é bastante viável e possui diversas aplicações.

Nesse sentido, nos últimos anos, a madeira tornou-se uma fonte energética ambientalmente favorável, por causa do balanço de carbono, em que tecnologias mais eficientes para a conversão da biomassa em energia térmica e elétrica têm sido promovidas, visando melhor aproveitamento da matéria-prima (MOUTINHO, 2016).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

A madeira é constituída por macromoléculas de lignina, celulose e hemiceluloses, sendo holocelulose a combinação dessas duas últimas.

Além desses componentes, a madeira ainda apresenta quantidades variáveis de substâncias de baixa massa molecular, como compostos fenólicos, terpenos, ácidos alifáticos, alcoóis, componentes inorgânicos (Ca, K e Mg), mono e dissacarídeos e pequenas quantidades de aminas e extrativos (SILVA, 2013).

A celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais e o composto orgânico mais abundante na natureza. É caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente de  $\beta$ -D-glucose (KLOCK,

2005). A degradação térmica da celulose pode formar diversos compostos devido a inúmeras reações como: hidroxiacetaldeído, ácido fórmico, ácido acético, etilenoglicol, gases leves, resíduos sólidos e outros (SILVA, 2013).

A hemicelulose (polioses) encontra-se em estreita associação com a celulose na parede celular, sendo constituída por monossacarídeos de cinco átomos de carbono (pentoses), a xilose e a arabinose. O componente mais frequente na composição dos pentosanos é o xilano, sendo que sua decomposição ocorre entre 150 – 350°C, formando como produto um aldeído heterocíclico denominado furfural. (SILVA, 2013). As folhosas, de maneira geral, contém maior teor de polioses que as coníferas, cuja composição é diferenciada (KLOCK, 2005).

TABELA 1: Composição Média de Madeiras de Coníferas e Folhosas

<b>Constituinte</b>	<b>Coníferas</b>	<b>Folhosas</b>
Celulose	41 ± 2%	45 ± 2%
Polioses	27 ± 2%	30 ± 2%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 2%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: KLOCK, 2005

A lignina está presente na biomassa com moléculas completamente diferentes dos polissacarídeos. A presença de unidades de fenil-propano no esqueleto polimérico da lignina origina, durante sua decomposição, uma série de compostos aromáticos, dos quais se destaca o denominado álcool coniferílico. (SILVA, 2013). Coníferas apresentam maior teor de lignina do que folhosas (KLOCK, 2005). As estruturas também são diferenciadas, enquanto coníferas apresentam, praticamente, apenas lignina composta por guaiacil, as folhosas apresentam valores mais elevados de lignina formadas por siringil (FENGEL, 1989).

As substâncias de baixa massa molecular pertencem a classes muito diferentes no que se refere à composição química. O material orgânico é chamado de extrativos e o inorgânico de cinzas (KLOCK, 2005).

A composição e quantidade dos teores de extrativos variam não só com a espécie, mas também dentro da espécie de árvore para árvore ou mesmo dentro da própria árvore com a posição do tronco (GONÇALVES, 2013). Os teores de extrativos e lignina tendem a aumentar com a idade da árvore e apresentam maiores

concentrações próximo à base. De forma oposta o teor de holocelulose tende a diminuir com idade e próximo a base (NEVES et al, 2011; SILVA et al, 2005).

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal é a resultante de alterações químicas que ocorrem na madeira quando submetida ao aquecimento da madeira em temperaturas superiores a 200°C, provocando modificações na sua composição química, com o desprendimento das frações mais voláteis e o aumento no teor de carbono (SIMETTI, 2016).

Durante a conversão da madeira em carvão vegetal ocorre uma série de outros fenômenos, além da concentração de carbono. O nível de ocorrência de tais fenômenos está associado ao nível de temperatura que se alcança durante a conversão. São observados diminuição de volume e escurecimento da madeira, abertura e fechamento de poros, fissuração entre outros. O processo de carbonização libera, em sua fumaça, mais de 130 substâncias tóxicas, sendo 10 delas classificadas como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, que podem causar problemas na saúde humana. Portanto, é preciso saber quais os níveis seguros para se produzir um carvão de qualidade e garantir que tal processo (BRAND, 2015)

Para a produção do carvão vegetal, tem destaque a qualidade da madeira. As características como: densidade básica, constituição química, composição elementar e poder calorífico, dentre outras, são critérios, para seleção de uma madeira com potencial para esta finalidade, sendo desejável aquela que esteja associada ao alto rendimento, elevada qualidade e baixo custo (LOUREIRO, 2016).

Os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e cinzas podem contribuir, efetivamente, na avaliação de combustíveis de biomassa, pois estão conectados ao índice de desempenho energético (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Trabalhando com 20 espécies nativas da Amazônia, Pastore (1989), encontrou correlação positiva e significativa entre o teor de lignina mais extrativos e rendimento em carvão vegetal, correlação positiva entre a densidade da madeira e o teor de lignina mais os extrativos, sugere que o aumento da densidade básica, quando associado ao aumento do teor de lignina, implica em maior rendimento em carvão (SANTOS, 2008).

As madeiras com elevado teor de lignina produzem carvão com maiores teores de carbono fixo em decorrência do alto teor de carbono elementar ( C = 65 %) presente na lignina, valores superiores aos das hemiceluloses e da celulose. A composição química também é influenciada pela temperatura final da carbonização e taxa de aquecimento, indicando, assim, a lignina como o componente químico da madeira mais importante quando a produção desejada é o carvão vegetal (BRITO e BARRICHELO, 1977).

Brito e Barrichelo (1977) salientam que ao carbonizar madeiras cujo aumento da densidade básica é proporcional ao aumento do teor de lignina, aumentará a produção de carvão vegetal. Já no caso do aumento da densidade básica da madeira ser acompanhado a um aumento do teor de holocelulose esta relação será inversa, uma vez que praticamente toda a holocelulose tem degradação térmica entre 200 e 350 ° C.

O carvão vegetal, dentro do setor industrial, destaca-se como importante combustível e o Brasil é líder mundial na produção siderúrgica que utiliza este bioredutor, oriundo de plantações florestais. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, existem cerca de 125 indústrias que utilizam o carvão no processo de produção de ferro-gusa, ferro-ligas e aço (LOUREIRO, 2016).

Para determinar o padrão de qualidade do carvão vegetal, considerando suas propriedades energéticas, no Estado de São Paulo foi criado o Selo Premium, promulgado pela Resolução nº10 SAA, de 11 de julho de 2003. Segundo essa Resolução, a umidade do carvão vegetal deve estar abaixo de 5%, o teor de carbono fixo (TCF) deve ser maior que 75% e o teor de materiais voláteis (TMV) e o teor de cinzas devem ser menores que 23,5% e 1,5%, respectivamente. (BRAND, 2015).

### 3.4 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS

#### 3.4.1 Composição Química Elementar

A composição química pode ser um considerável parâmetro no uso da madeira como fonte de energia. A madeira possui, aproximadamente, 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 43% de oxigênio e 0,5% de nitrogênio. Enquanto a

presença de enxofre é insignificante, quando comparado aos combustíveis fósseis (LOUREIRO, 2016).

Para a produção de energia, como já citado, é desejável altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio, pois esses componentes elementares irão influenciar o poder calorífico. Maiores concentrações de oxigênio refletem em menor poder calorífico, enquanto altos teores de carbono e hidrogênio favorecem o aumento no poder calorífico (LOUREIRO, 2016).

A cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio ocorre um aumento de aproximadamente 515 kcal/kg no poder calorífico superior e a cada 1% de acréscimo no teor de carbono ocorre um aumento de apenas 64,14 kcal/kg no valor calórico da biomassa (PROTÁSIO *et al.*, 2011)

Os teores de enxofre e nitrogênio contribuem relativamente pouco na liberação de energia de um combustível (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; ASSIS *et al.*, 2012). O nitrogênio está diretamente relacionado com a emissão de componentes  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrogênio tóxicos), corrosão e deposição de cinzas (DEMIRBAS, 2004). Já uma maior concentração de enxofre pode ocasionar a formação de  $\text{FeCl}_2$  e  $\text{ZnCl}_2$ , componentes corrosivos nas caldeiras (TELMO *et al.*, 2010). Além de apresentarem correlação negativa com o poder calorífico (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; HUANG *et al.*, 2009; KUMAR *et al.*, 2010, NEVES *et al.*, 2013).

### 3.4.2 Análise Química Imediata

A análise química imediata é uma análise que fornece a percentagem de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas. Assim, ela representa a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como dá uma indicação do material residual (cinzas).

#### 3.4.2.1 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo representa a massa restante, avaliado através de análise gravimétrica, após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002). O teor de carbono fixo depende

principalmente do teor de material volátil, já que os teores de cinzas para madeira são baixos. Desta forma, madeira com maiores teores de material volátil tem menores teores de carbono fixo (COTTA, 1996).

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira. No entanto, é inversamente proporcional ao teor de holocelulose. É uma função direta do rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo presente na madeira (OLIVEIRA, 1988), apresentando relação direta com o poder calorífico. Um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do aparelho de queima, sendo preferíveis porque queimam mais lentamente (PEREIRA *et al.*, 2000).

O controle da composição química, principalmente do carbono fixo, é importante, pois seu efeito reflete a utilização do forno por unidade de volume. Considerando-se um determinado alto forno e as mesmas condições operacionais à medida que se aumenta o teor de carbono fixo do carvão, maior é utilização volumétrica do alto forno (SCREMIN, 2012).

#### 3.4.2.2 Teor de Materiais Voláteis

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que são desprezadas da madeira na forma gasosa durante a queima ou carbonização. Os fatores que influenciam os materiais voláteis são a temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira (CARMO, 1988).

Os voláteis compreendem a parte do combustível que se volatiliza quando ele é aquecido a altas temperaturas e têm um importante papel na combustão. Após a volatilização, misturam-se com o oxigênio do ar e entram em combustão. De um modo geral, as madeiras com altos teores de voláteis queimam mais rapidamente (PEREIRA *et al.*, 2000). Assim, os materiais voláteis durante a queima da biomassa volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão, o que contribui para uma baixa eficiência energética (CHAVES *et al.*, 2013).

Para Klautau (2008), o material volátil interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e, conseqüentemente, a ignição. Assim, determina a facilidade com que uma biomassa queima. A biomassa ao apresentar um alto teor de materiais voláteis tem maior facilidade de incendiar e queimar.



Embora o processo de combustão seja rápido, o mesmo, é de difícil controle. Um alto teor de matérias voláteis também pode afetar o processo de combustão em geral (SCREMIN, 2012).

#### 3.4.2.3 Teor de Cinzas

O teor de cinzas corresponde a substâncias que não entram em combustão ficando na forma sólida, e são indesejáveis para uso energético. Ou seja, são substâncias compostas de material inorgânico e tem relação inversa com o poder calorífico (CHAVES *et al.*, 2013).

Para Nogueira e Rendeiro (2008) são caracterizadas como teor de cinzas os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. Dessa forma, as cinzas são resultados da combustão da biomassa, a qual se processa em altas temperaturas, tornando-se necessário conhecimento do comportamento destas cinzas para evitar operações inadequadas. As mesmas podem originar-se de elementos metálicos já presentes no combustível, de argila, areia e sais que possam estar na biomassa, e ainda por solos misturados a biomassa durante sua colheita ou manuseio.

As cinzas são constituídas de composto de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Quando presentes em alta concentração podem diminuir o poder calorífico, causando perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor (KLAUTAU, 2008).

Segundo Vieira *et al.* (2013) um alto teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas e pela perda de calor com a saída das cinzas do reator, que não pode ser plenamente recuperado. Relata ainda que para a gaseificação o menor teor de cinzas reduz o entupimento e incrustações por escórias no equipamento.

Como a umidade, o teor de cinzas também interfere no poder calorífico causando perda de energia, além de prejudicar a transferência de calor. Brand (2010) e Klautau (2008) concordam quando se referem na necessidade de remoção das cinzas, pois quando a mesma permanece no local do processo de combustão, devido ao fato que as cinzas serem consideradas material abrasivo, podem vir a causar problemas de corrosão em equipamentos metálicos.

O conhecimento do teor de cinzas permite avaliar o seu comportamento em diversos aspectos, como por exemplo, o ataque a refratários pelas cinzas pode ser evitado, ou seja, os refratários devem apresentar o mesmo comportamento químico ao das cinzas e, ainda devem ter baixa porosidade para que as cinzas ao se alojarem não provoquem rachaduras na superfície do mesmo. Outro critério que deve ser visto é o ponto de amolecimento e fusão das cinzas, pois processos de combustão com temperaturas maiores ao seu amolecimento podem propiciar a aglomeração de material particulado denominado fusão da cinza, que geralmente inviabilizam a continuidade do processo ou reduzem a eficiência da troca de calor no equipamento (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

### 3.4.3 Poder Calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de energia na forma de calor liberado durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível, expresso em caloria por grama ou quilocaloria por quilograma, para combustíveis sólidos podendo ser avaliado o poder calorífico superior (PCS) e o inferior (PCI). (CINTRA, 2009).

No PCS a água formada durante a combustão na reação entre o hidrogênio elementar da madeira e o oxigênio é condensada, e seu calor latente é recuperado e adicionado à energia mensurada, mostrando o máximo potencial de fornecimento energético da madeira. Enquanto, no PCI o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor. Em termos de pesquisa e comparação de combustíveis o PCS é mais usual (CINTRA, 2009).

O poder calorífico depende dos teores de carbono e hidrogênio, sendo esses os elementos que têm maior contribuição na energia liberada durante a combustão (SIMETTI, 2016). Segundo Quirino *et al.* (2005), entre diferentes espécies florestais tropicais, o valor médio de PCS é igual a 4732 kcal/kg, variando do limite inferior de 3350 kcal/kg ao limite superior de 5260 kcal/kg.

Pesquisa de Loureiro (2016) com espécies tropicais observou que quanto maior o teor de lignina e extrativos maior é o poder calorífico. O aumento do teor de carbono fixo e a redução no teor de materiais voláteis também faz com que ocorra

um acréscimo no poder calorífico superior do carvão. A umidade presente no combustível afeta, negativamente, o poder calorífico da madeira (LOUREIRO, 2016).

A umidade presente na madeira quando nos processos de combustão, necessita que seja evaporada e, portanto, afeta a energia gasta no processo, diminuindo o poder calorífico. Além do mais, a variabilidade da umidade pode tornar o controle do processo de combustão mais difícil (COTTA, 1996)

#### 3.4.4 Densidade

A densidade é o índice de qualidade da madeira relacionada diretamente às suas características tecnológicas e na qual ficam inscritas muitas condições fisiológicas e ambientais de formação do lenho na árvore. Assim sendo, é uma característica que se revela importante ao nível do uso e qualidade industrial da madeira. De maneira geral quanto maior a densidade (GONÇALVES, 2013):

- Maior a retração;
- Maior dificuldade de laboração;
- Maior resistência mecânica;
- Maior durabilidade natural;
- Maior rendimento em pasta por unidade de volume; e
- Maior concentração do valor energético.

As madeiras comerciais apresentam densidade entre 300 a 550 kg/m<sup>3</sup>, e as madeiras tropicais têm densidades superiores a 1040 kg/m<sup>3</sup>. A densidade básica é influenciada por alterações na espessura da parede das fibras, redução do lume ou aumento do comprimento das fibras e no teor de extrativos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987; RAGLAND, AERTS, BAKER, 1991 e VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013, citados por SIMETTI, 2016)

Devido ao maior teor de extrativos, o cerne apresenta muitas vezes uma densidade mais elevada do que o albúrnio, embora a variação radial de densidade que ocorre em geral nas árvores, crescente no sentido medula-casca, possa sobrepor-se a este efeito (GONÇALVES, 2013).

A densidade básica é a propriedade física de maior atuação na qualidade do carvão, pois está associada com diversas outras propriedades da madeira e

interfere, de forma significativa, na qualidade de seus derivados. Existe uma forte correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade do carvão. Quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido e, conseqüentemente, maior será a produção em massa em carvão vegetal.

Assim sendo, a avaliação da densidade básica da madeira, é um importante parâmetro na escolha de matérias – primas destinadas à produção de carvão vegetal, bem como para pesquisas em melhoramento genético florestal (LOUREIRO, 2016).

### 3.5 PIRÓLISE

O processo de pirólise é caracterizado pela degradação térmica de biomassa na ausência de atmosfera oxidante. É um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas em torno de 250 a 800°C, com o menor teor possível de oxigênio, resultando em três frações: sólida (carvão vegetal), líquida (licor pirolenhoso) e gasosa (gases não condensáveis). As proporções destes compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características da biomassa (SILVA, 2013; SIMETTI, 2016).

Durante a pirólise ocorrem reações sucessivas, tais como: craqueamento, isomerização, desidrogenação, aromatização e coqueamento, sendo que os produtos gasosos majoritários são: H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros compostos orgânicos (bio-óleo), Ou seja, o processo é resultante da concentração de carbono e da expulsão do oxigênio, aumentando a densidade energética do material final (SILVA, 2013; SIMETTI, 2016).

O rendimento de materiais voláteis aumenta na medida em que a taxa de aquecimento aumenta. Em altas temperaturas os produtos líquidos da pirólise podem sofrer craqueamento dentro da zona de reação, maximizando a quantidade de gás. O rendimento em resíduo sólido é máximo quando a taxa de aquecimento e a temperatura são baixas, embora os tempos de residência sejam elevados (SILVA, 2013).

O processo de pirólise é influenciado pela temperatura de carbonização, a taxa de aquecimento e a pressão. O aumento da temperatura de carbonização

acarreta em maior teor de carbono, e menores teores de hidrogênio e oxigênio, ou seja, reduz o teor de materiais voláteis, e conseqüentemente da resistência mecânica e o rendimento do carvão vegetal. Já a taxa de aquecimento tem relação inversa com o rendimento do carvão e taxas maiores resultam em carvão mais friável, com mais fissuras e trincas (OLIVEIRA et al, 2010; SIMETTI, 2016).

### 3.6 DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

O uso de qualquer biomassa para fins energéticos necessita do entendimento e do conhecimento das suas propriedades físico-químicas, sendo importante para o cálculo de projeto das mais diferentes instalações de conversão termoquímica (SILVA, 2013).

A pirólise de biomassa é um processo complexo do ponto de vista cinético. A natureza do substrato influencia no processo em função da estrutura e composição dos principais macrocomponentes (hemicelulose, celulose e lignina), que acabam por determinar reações secundárias, em reações paralelas, consecutivas e competitivas durante a degradação desses componentes (SILVA, 2013).

A análise termogravimétrica da madeira determina a perda de massa, em um determinado programa de temperatura, obtendo informações da composição e da estabilidade térmica, além de conhecer as faixas de temperaturas em que a decomposição é maior (LOUREIRO, 2016).

Para esse mesmo autor, a cinética da degradação da biomassa é importante para entender os fenômenos da degradação térmica. Divide-se, em duas formas, o uso das análises termogravimétricas:

- Termogravimetria isotérmica: é feito o registro da massa em função do tempo com a temperatura constante;
- Termogravimetria dinâmica: ocorre um aumento de temperatura definindo uma taxa de aquecimento constante.

A ocorrência de curvas termogravimétricas quando a pirólise é aplicada em materiais lignocelulósicos levou os pesquisadores a concluir que o mecanismo cinético da pirólise destes materiais é uma superposição dos mecanismos envolvidos na decomposição térmica de seus componentes. O processo de volatilização inclui a formação de voláteis pela degradação térmica dos

componentes da biomassa, a celulose e a hemicelulose, sendo que a lignina é o componente termicamente mais estável (SILVA, 2013).

A celulose e a hemicelulose iniciam a decomposição em temperaturas próximas a 160°C e a lignina em temperaturas menores, aproximadamente 110°C, se estendendo até 900°C, em taxas relativamente baixas quando comparadas às taxas da celulose e da hemicelulose (SILVA, 2013).

O estudo dos mecanismos e da cinética envolvida na degradação térmica de biomassa é de suma importância para o entendimento da dinâmica do processo, bem como para explicar os fenômenos envolvidos durante a degradação térmica. Desta maneira, podem-se entender melhor tais mecanismos e cinética através das curvas de perda de massa (SILVA, 2013).

### 3.7 ESPÉCIES ESTUDADAS

De maneira geral, as espécies tropicais possuem um grande diâmetro, textura atraente, alta durabilidade e resistência à decomposição, por isso são usadas em várias indústrias, como a moveleira, estrutural e de painéis de madeira reconstituída.

As dez famílias mais comuns, abrangendo 74% das árvores na região amazônica brasileira, são: Fabaceae, Sapotaceae, Lecythidaceae, Moraceae, Burseraceae, Chrysobalanaceae, Malvaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae e Myristicaceae. Vinte e cinco por cento de todas as árvores de grande porte pertencem a Fabaceae. Os dez gêneros mais comuns em relação a frequência dos indivíduos são *Eschweilera* (5,6%), *Pouteria*, *Licania*, *Tetragastris*, *Eperua*, *Inga*, *Protium*, *Swartzia* e *Virola* (STEEGE *et al.*, 2006).

#### 3.7.1 *Protium* spp. (Breu Vermelho)

Árvore da família das Burseráceas, a qual compreende 16 gêneros e mais de 800 espécies tropicais e subtropicais. Espécies de Burseraceae são endêmicas na região amazônica e possuem enormes possibilidades econômicas, destacando seus óleos essenciais, que é um dos mais importantes grupos de matérias primas

para várias indústrias, notadamente as de perfumaria, alimentícia e farmacêutica (ANDRADE E HIGUCHI, 2009; MARQUES *et al.* 2010).

O gênero *Protium*, é amplamente encontrado na região amazônica, onde seus óleos e resinas são popularmente conhecidos como “breus”. Conhecidos na medicina popular como importante agente terapêutico, utilizados como anti-inflamatório, analgésico, expectorante e cicatrizante. A resina é utilizada também na indústria de verniz, calafetagem de embarcações e outros objetos de madeira, e também quando queimada tem ação repelente de insetos (SILVA, 2006).

A madeira se apresenta com cerne/alburno pouco distintos, cor variável entre o marrom acinzentado e marrom avermelhado claro, anéis de crescimento indistintos, grã direita, textura média a fina, brilho forte e massa específica básica de 0,55 a 0,60 g/cm<sup>3</sup>. Tecnicamente os processos de serragem e aplainamento são de fácil execução e proporcionam superfície de acabamento lisa. Usada na construção civil em geral, caixotaria e marcenaria (LOUREIRO e SILVA, 1968).

### 3.7.2 *Eschweilera odora* (poepp.)

Também conhecida no Brasil como Matá-matá branco e Morrão vermelho. É relativamente frequente em mata alta de terra firme nos estados do Amazonas, Pará e Amapá e nas Guianas e América Central (LOUREIRO *et al.*, 1979).

Espécie de árvore da família Lecythidaceae. Apresenta indivíduos de altura mediana (16 m), com fuste retilíneo de aproximadamente 55 cm de diâmetro, casca acinzentada com 1,0 cm de espessura (INPA/CPPF, 1991).

A madeira da espécie *Eschweilera odora* possui massa específica básica e aparente de 0,69 e 0,82 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, cerne/alburno pouco distintos, espessura do alburno de 7,0 cm a 8,0 cm; cor do cerne marrom-claro, cor do alburno cinza-rosado, camadas de crescimento pouco distintas, grã direita, textura média, brilho ausente, cheiro imperceptível e resistência ao corte manual dura (LOUREIRO *et al.* 1979; CASTRO, 2015).

Devido à alta massa específica torna-se uma madeira difícil de serrar, para o qual se recomenda o uso de serra estelitadas. No entanto, apresenta-se moderadamente fácil para aplainar e recebe bom acabamento (INPA/CPPF, 1991).

A madeira possui alto teor de sílica (0,3 a 2,0%) e também é altamente resistente ao ataque de insetos, comumente usada em estrutura de cobertura (viga, caibro e ripa) e torneada (LOUREIRO *et al.*, 1979).

### 3.7.3 *Eschweilera coriaceae* (DC.) Mart

Essa espécie é conhecida popularmente como Piãozinho e também como Matamatá, Matamatá branco, Matamatá-preto ou ainda Matamatá-amarelo (CASTRO, 2015).

É uma espécie arbórea da família Lecythidaceae encontrada nos trópicos da América Central e do Sul, Sudeste da Ásia e África, incluindo Madagascar (MORI, 2008). A família tem aproximadamente 200 espécies neotropicais distribuídas em 11 gêneros (PRANCE: MORI, 1979). No Brasil, foram registrados 13 gêneros e 150 espécies, amplamente distribuídas, principalmente na Região Norte (BARROSO *et al.* 1978).

É uma espécie de dossel que pode atingir uma altura de até 37 m, distribuída por toda a região Amazônia, abundante em florestas de terra firme, mas também podem ser encontradas em áreas sazonalmente inundadas de várzeas e igapós (CASTRO, 2015).

Anatomicamente, caracterizam-se por possuir cerne/alburno indistintos, cor marrom-claro, camadas de crescimento pouco distintas, grã direita, textura média, brilho ausente, cheiro imperceptível e dura resistência ao corte manual (LOUREIRO *et al.* 1979).

A sua massa específica básica e aparente é de 0,73 e 0,98 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (LOUREIRO *et al.* 1979). Para Nogueira (2005), é de aproximadamente 0,7 g/cm<sup>3</sup> para indivíduos procedentes de terra firme da Amazônia Central, enquanto que Moutinho (2008) apresentou indivíduos com massa específica de até 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Para Castro (2015), a massa específica básica é de 0,73 g/cm<sup>3</sup>.

Microscopicamente pode apresentar grãos de sílica nas células procumbentes do raio e no parênquima axial. Ocasionalmente também podem ser encontradas cadeias de cristais de oxalato (MOUTINHO, 2008).

A madeira desta espécie tem a tendência a maiores teores de extrativos (entre 10 e 12% de extrativos totais) e possuir baixo teores de cinzas (em torno de 2%) quando comparadas com as demais espécies do gênero (MOUTINHO, 2008).



O potencial produtivo dessa madeira, estudado por Bentes-Gama *et al.* (2002) em uma região secundária de várzea baixa, no estuário amazônico, apontaram essa espécie como a de maior índice de valor de importância econômica dentre as espécies que ainda não são comercialmente exploradas. Esses autores apontaram um rendimento potencial de US\$ 56,5/ha.

A madeira pode ser usada em construção, móveis e artigos domésticos decorativos, torneados, brinquedos e artigos domésticos utilitários.

#### 3.7.4 *Byrsonima crispera* A. Juss. (Murici)

Espécie da família Malpighiaceae conhecida popularmente pelo nome Murici da mata ou, simplesmente, Murici. Podem apresentar hábitos herbáceos, arbustivos, arbóreos ou escandentes. Evidências arqueológicas encontradas no baixo Amazonas, datadas entre 9 e 8.000 a.C. indicam que a madeira desta espécie já era usada por indígenas (CASTRO, 2015).

O gênero *Byrsonima*, que nos Neotrópicos soma aproximadamente 150 espécies, pode ser representado por seis espécies principais, entre elas a *Byrsonima crispera*, que apresenta indivíduos de porte pequeno a médio e frequentemente encontradas em platôs, vertentes, baixos e capoeiras (VICENTINI *et al.*, 1999).

De acordo com Loureiro *et al.* (1979), a madeira dessa espécie possui uma massa específica básica de 0,72 g/m<sup>3</sup>. Bila (2014) encontrou um valor médio de massa específica aparente de 0,89 g/cm<sup>3</sup> e Castro (2015) 0,72 g/cm<sup>3</sup>.

A madeira deste gênero é considerada leve e utilizada na construção civil para caibros e vigas (VICENTINI *et al.*, 1999).

A madeira de algumas espécies desse gênero também é utilizada na fabricação de caibros e vigas por sua leveza, outras são empregadas em curtumes e para tingir tecidos, devido à grande quantidade de taninos e matéria tintorial existente nas cascas (PEREIRA *et al.* 2002), e ainda podem ser utilizadas para a recuperação de áreas degradadas, por apresentarem rápido crescimento (RIBEIRO *et al.* 1999).

### 3.7.5 *Inga paraensis* Ducke

Conhecida popularmente como Ingarana, Ingá-branco ou, simplesmente, Ingá, é uma espécie da família Fabaceae. É freqüente em regiões de terra firme da Amazônia. Em um inventário de floresta primária no município de Novo Ariuanã, na Amazônia Central, foram levantadas 1.938 árvores de 210 espécies em parcelas de 1,9 ha, sendo que essa espécie foi a sexta mais freqüente, com 44 indivíduos (CASTRO, 2015).

Árvore da família Fabaceae (Mimosoideae), tronco retilíneo com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 44,0 cm e altura comercial de 5,80 m. Anatomicamente, possui cerne/alburno indistintos, com uma cor marrom-avermelhado-claro, listras amarelo-oliva na face radial, anéis de crescimento distintos, grã cruzada irregular e textura média a grossa (LOUREIRO *et al.* 1979).

Loureiro (1979) encontrou massa específica seca, verde e básica de 0,98; 1,26 e 0,80 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Enquanto Fearnside (1997) obteve massa específica de 0,82 g/cm<sup>3</sup> e Castro (2015) 0,63 g/cm<sup>3</sup> para essa espécie.

A madeira seca muito rapidamente (2 dias), com tendência moderada ao encanoamento, torcimentos médios e rachaduras fortes, utilizada em construção pesada e construção leve (LOUREIRO *et al.* 1979).

### 3.7.6 *Inga Alba* (Sw.) Willd

Essa espécie tem ocorrência na região Amazônica e em toda a orla litorânea, desde o Rio Grande do Norte até o norte de Santa Catarina. Também conhecida como Ingá-xixica ou, simplesmente, Ingá (CASTRO, 2015).

Segundo Melo e Gomes (1979) são árvores de porte alto, atingindo até 35m de altura com tronco bastante grosso. A madeira apresenta uma coloração rósea-esbranquiçada com poucos poros (até 3 poros/mm<sup>2</sup>) bem distintos a olho nu. As camadas de crescimento são demarcadas por zonas fibrosas escuras (MELO; GOMES, 1979).

A massa específica da madeira encontrada por Melo e Gomes (1979) é de 0,81 g/cm<sup>3</sup> enquanto para Castro (2015) foi de 0,57 g/cm<sup>3</sup>.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAL BIOLÓGICO E PIRÓLISES

As amostras foram coletadas na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, localizada no km 23 da estrada ZF-2, dentro do Distrito Agropecuário da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), que possui uma área de 21.000 hectares. Esta área é coberta por floresta primária densa de terra firme, típica da região central da Amazônia. Está localizada a latitude de 02°35'55,5" Sul e longitude 60°02'14,8" Oeste de Greenwich. Segundo a classificação climatológica de Köppen o clima da área é do tipo Af, pertencente ao grupo de clima tropical chuvoso.

A amostragem das árvores foi feita em uma parcela de um hectare onde, primeiramente, para cada espécie foi realizada um inventário e selecionados todos os indivíduos arbóreos com diâmetro de  $25 \text{ cm} \leq \text{DAP} \leq 60 \text{ cm}$ , com exceção dos indivíduos que apresentaram sapopema acima do diâmetro a altura do peito (DAP). Após o corte das árvores e seccionamento para obtenção das toras, as mesmas foram encaminhadas a uma serraria onde foram desdobradas em serra fita, obtendo-se tábuas e pranchões para posteriormente serem transportadas para Curitiba.

Foram utilizadas amostras das seguintes espécies: *Protium spp.* (Breu Vermelho), *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart (Piaozinho), *Eschweilera odora* (Mata-Matá), *Byrsonima crispera* A. Juss. (Murici), *Inga spp.* (Inga Vermelho).

O estudo foi conduzido no Laboratório de Energia de Biomassa da Universidade Federal do Paraná. Para cada espécie foram utilizadas amostras de 3 árvores distintas onde para o procedimento de pirólise foram confeccionados 10 corpos de prova com dimensões 2x2x3cm de cada, e para os demais procedimentos as amostras de madeira e carvão vegetal foram moídas em um moinho analítico IKA Werke® A11.

Após o processo de moagem, as amostras de madeira foram peneiradas utilizando um conjunto composto por peneiras de 35, 60 e 200 mesh. O material retido na peneira de 60 mesh foi utilizado para determinação do teor de extrativos e

lignina. Para determinação do poder calorífico e análise química imediata também foram usadas amostras de madeira e carvão moídos.

As pirólises dos corpos de prova foram realizadas em forno mufla com controle digital da taxa de aquecimento, temperatura e tempo de permanência. O sistema utilizado na pirólise apresentava coleta do licor pirolenhoso e os gases não condensáveis foram expelidos para o ambiente. A taxa de aquecimento foi de  $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  e a temperatura final de carbonização foi de  $450^{\circ}\text{C}$ , partindo da temperatura ambiente, e com tempo de permanência de 30 minutos. Em cada pirólise foram utilizados corpos de prova previamente secos em estufa a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Após o processo foram mensurados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, licor pirolenhoso e gases não condensáveis.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL

A determinação do poder calorífico superior (PCS) seguiu a norma NBR 8633 (ABNT, 1983) com o uso de um calorímetro digital da marca IKA, modelo C5000. O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado por meio da equação:

$$PCI = PCS - (600 \times 9H/100) \quad \text{Equação 1}$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior ( $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); PCS é o poder calorífico superior ( $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) e H é o teor de hidrogênio (%)

A análise química imediata foi realizada para quantificação do teor de carbono fixo (TCF), teor de materiais voláteis (TMV) e teor de cinzas (TCz) com base na norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

A densidade básica da madeira foi determinada conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003) pelo método da balança hidrostática, conforme a equação::

$$DB = MS / Volume \quad \text{Equação 2}$$

Em que: MS é massa seca da madeira (g)

Para o cálculo da densidade energética foi utilizada a equação 3:

$$DE = DB \times PCS \quad \text{Equação 3}$$

Em que: DE é a densidade energética; DB é a densidade básica da madeira e PCS é o poder calorífico superior da madeira.

Foram determinados os rendimentos volumétricos do carvão e rendimento gravimétrico do carvão, dos gases não condensáveis e líquido pirolenhoso, em relação à madeira seca, pelas fórmulas:

$$RV = (VC/VM) \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$RGC = (MC/MM) \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$RGL = (ML/MM) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

$$RG = 100 - (RGC/RGL) \quad \text{Equação 6}$$

$$RCF = (CF/RGC) \quad \text{Equação 7}$$

Em que: RV é o rendimento volumétrico em carvão (%); RGL é o rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (%); RGC é o rendimento gravimétrico em carvão(%); RG é o rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis (%); VC é o volume do carvão; VM volume seco da madeira; PC é a massa do carvão (g); PM é a massa da madeira (g); CF é o teor de carbono fixo.

Para o cálculo do balanço energético foi utilizada a equação 8:

$$BE = DEC /DEM \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Em que: DEC é a densidade energética do carvão (Mcal/m<sup>3</sup>); DEM é a densidade energética da madeira (Mcal/m<sup>3</sup>).

A quantificação de extrativos totais foi realizada conforme NBR 14853 (ABNT, 2010), com a sequência etanol-tolueno (1:2, 6 horas), etanol (4 horas) e água quente (1 hora). O teor de lignina foi determinado conforme a norma NBR 7989 (ABNT, 2010b).

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas em uma balança termogravimétrica Setaram SETSYS Evolution TGA. Foi utilizado um gradiente de temperatura iniciando na temperatura ambiente até 600°C, com taxa de

aquecimento de 10 °C/min. O gás de arraste utilizado foi argônio com fluxo de 20 mL/min.

A primeira derivada da curva TG (DTG) foi utilizada para estabelecer a taxa da perda de massa em função do tempo e os picos característicos de degradação do material.

Para a realização da análise elementar (Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Nitrogênio) foram realizadas em analisador universal Elementar (modelo Vaio Micro Cube) em duplicata. O analisador utiliza como gases de arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respetivamente. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200° C. O teor de oxigênio foi obtido por diferença em relação aos demais componentes elementares (ELOY, 2015).

Como o objetivo da pesquisa é a avaliação energética das espécies nativas citadas, utilizou-se como parâmetro comparativo os dados já consolidados do eucalipto, por ser a biomassa florestal mais utilizada para energia.

#### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a avaliação do experimento foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado com três repetições e considerando a espécie como fator de variação. Foi realizada análise de variância (ANOVA) e havendo diferenças estatisticamente significativas foi utilizado o teste de Tukey para comparação de médias, todos os testes consideraram o nível de 5% de probabilidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 QUALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA

A análise de variância revelou que há diferenças entre as cinco espécies para as variáveis estudadas. O teste de média revelou os resultados conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2: Valores médios das propriedades energéticas da madeira.

Propriedades	Espécie				
	<i>Eschweilera coriaceae</i> (DC) Mart.	<i>Protium spp.</i>	<i>Ingá spp.</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Byrsonima críspa</i> A. Juss
PCS (kcal/kg)	4894 ± 80 a	4666 ± 52 b	4663 ± 121b	4648 ± 80 b	4592 ± 42 b
PCI (kcal/kg)	4576 ± 119 a	4388 ± 118 ab	4355 ± 138 b	4347 ± 53 b	4285 ± 104 b
TMV (%)	78,94 ± 1,27 c	80,75 ± 1,08 ab	78,14 ± 1,79 c	82,08 ± 5,20 ab	82,79 ± 3,06 a
TCz (%)	1,51 ± 0,27 a	1,18 ± 0,53 ab	0,55 ± 0,25 c	0,95 ± 0,38 bc	0,47 ± 0,29 d
TCF (%)	20,73 ± 1,25 ab	18,56 ± 1,35 abc	21,48 ± 1,63 a	16,98 ± 4,92 bc	16,54 ± 2,81 c
DB(g/cm <sup>3</sup> )	0,93 ± 0,13 a	0,71 ± 0,05 bc	0,61 ± 0,22 d	0,80 ± 0,11 b	0,67 ± 0,06 cd
DE (Mcal/m <sup>3</sup> )	4551,42 a	3312,86 b	2844,43 b	3718,40 b	3076,64 b

PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; TMV = teor de materiais voláteis; TCz= teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; DB = densidade básica; DE = densidade energética. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies à probabilidade de 5% de erro conforme o teste de médias de Tukey.

O poder calorífico superior (PCS) variou entre 4592 a 4894 kcal/kg, e o inferior variou entre 4285 a 4576 kcal/kg. Observou-se que o maior poder calorífico (superior e inferior) foi da espécie *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart.

O PCS e PCI da *Eschweilera coriaceae* é maior que os valores médios encontrados em literatura para a espécie *Eucalyptus*, a madeira mais utilizada para fins energéticos. Em estudos realizados por ELOY (2015), os valores médios encontrados para *Eucalyptus grandis* variam de 4070 a 4586 kcal/kg. Enquanto para Pereira *et al.* (2000) e Vale *et al.* (2000) os valores médios encontrados são de 4340 e 4641 kcal/kg, respectivamente.

Para a espécie *Byrsonima críspa* A. Juss o valor médio do poder calorífico de 4592 kcal/kg está próximo do encontrado por Quirino (2005) para outras espécies de mesmo gênero como: *B. coccolobifolia* (4844 kcal/kg), *B. crassa* (4781 kcal/kg), *B. verbascifolia* (4771 kcal/kg).

A espécie *Eschweilera odora* apresentou o poder calorífico de 4648 kcal/kg, abaixo da média encontrada por Quirino (2005) para espécies relacionadas, com PCS de 4747 kcal/kg.

A densidade básica da madeira variou entre 0,61 a 0,93 g/cm<sup>3</sup>, valores próximos aos encontrados em literatura para espécies semelhantes. A *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart. apresentou o maior valor médio em relação à densidade básica. Estudos realizados por Quirino (2005) relataram densidade básica variando entre 0,20 a 1,08 g/cm<sup>3</sup> para 108 espécies florestais. Comparativamente, a densidade básica para o *Eucalytus grandis* varia entre 0,37 a 0,42 g/cm<sup>3</sup> (ELOY,2015).

O teor de materiais voláteis variou entre 78,14 % a 82,79 % e de cinzas entre 0,47% a 1,51%. Observou-se que a *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart. apresentou os maiores valores: 81,83% e 1,51%, respectivamente para TMV e TCz. Segundo Eloy (2015), os valores médios encontrados para *Eucalytus grandis* variam de 80,00 a 84,56 % para TMV e 0,58% a 0,84 % para TCz. De acordo com os estudos realizados em 47 espécies por Brito e Barrichello (1982), os TMV variam entre 75% a 82% e de TCz entre 0,27% a 2,7%

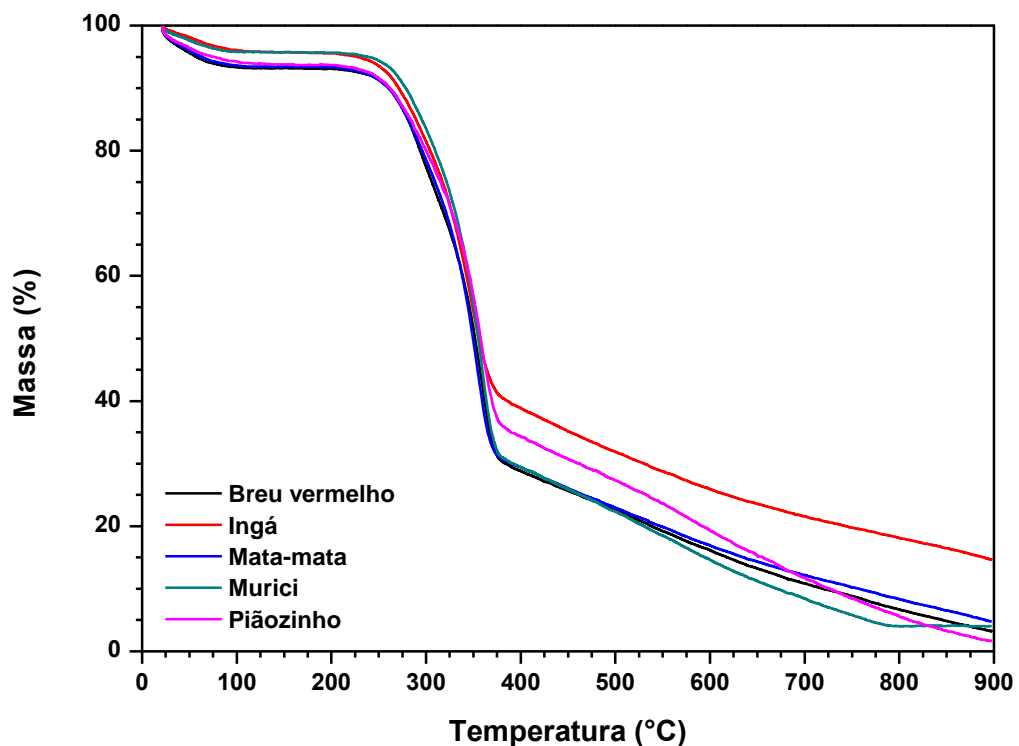
Os resultados encontrados para o teor de carbono fixo variaram entre 16,54% a 21,48% e o maior resultado observado foi da espécie *Ingá spp.*, acima da variação dos valores médios apresentados por Eloy (2015) para *Eucalytus grandis* (14,36 % a 20,02 %) e Brito e Barrichello (1982) para 47 espécies (17% a 24 %).

A densidade energética obtida para as cinco espécies variaram entre 2844,43 Mcal/m<sup>3</sup> a 4551,42 Mcal/m<sup>3</sup>. A espécie *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart. foi a que apresentou melhor densidade energética com 4551,42 Mcal/m<sup>3</sup> e está acima da variação dos valores médios apresentados por Eloy (2015) para *Eucalytus grandis* variando de 1582 a 1885 Mcal/m<sup>3</sup>.



## 5.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA MADEIRA

O perfil de degradação térmica dos materiais estudados foi semelhante até a temperatura de 350°C. Acima dessa temperatura a espécie *Inga spp.* (Ingá) e *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart. (Piaozinho) tiveram comportamento diferenciado das demais espécies. O *Inga spp.* foi o material que apresentou maior massa residual no final, enquanto *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart. apresentou a menor (Figura 1).



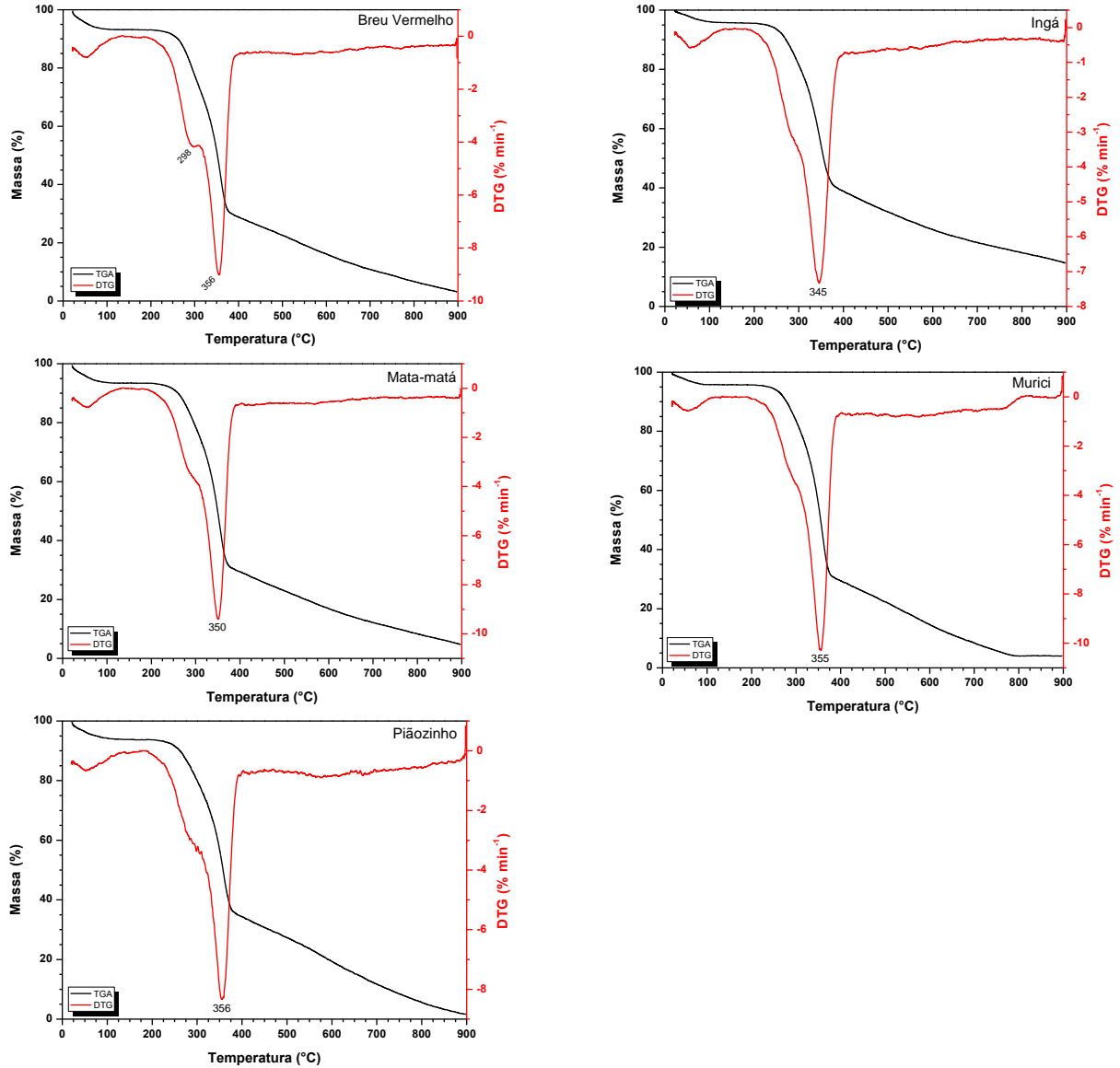
**Figura 1:** Perfil de degradação térmica da madeira das cinco espécies estudadas  
Fonte: Autor, (2016).

A Figura 2, apresenta o perfil da perda de massa e a da derivada primeira das curvas termogravimétricas (DTG) e a variação da massa em relação ao tempo, em função da temperatura. Essas curvas indicam os picos em que a velocidade de decomposição da madeira é máxima e pode-se identificar as temperaturas em que ocorrem as principais perdas de massa.

A espécie *Inga spp.* apresentou o menor pico de temperatura que foi 345 °C e o maior pico de 356°C foi apresentado pelas espécies *Protium spp.* (Breu Vermelho) e *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart. (Piaozinho).

Os resultados apresentados na análise da degradação térmica nas espécies amazônicas foram semelhantes aos encontrados por Simetti (2016) em madeira de

cinco diferentes espécies de *Eucalyptus* e por Loureiro (2016) em madeira dos híbridos de *Corymbia citriodora* com *C. torelliana*,



**Figura 2:** Perfil de perda de massa (TGA) e primeira derivada em função da temperatura para as cinco espécies estudadas  
Fonte: Autor, (2016).

A pirólise da madeira pode ser dividida em quatro faixas de degradação: secagem, degradação da celulose, hemiceluloses e lignina. Verificam-se três faixas de perda de massa nas curvas TG/DTG: a primeira está relacionada à secagem da madeira e as outras duas à degradação de seus principais componentes (hemiceluloses, celulose e lignina), porém cada componente se degrada de forma distinta em faixas de temperatura diferentes (LOUREIRO, 2016).

Na segunda etapa de decomposição térmica (aproximadamente de 210°C a 320°C) ocorre a maioria da degradação das hemiceluloses e início da decomposição da celulose. As taxas máximas de perda de massa foram alcançadas em temperaturas entre 300°C e 350°C, pois é nessa faixa que ocorre a degradação da celulose e parte da lignina. Em temperaturas superiores a 350°C, verifica-se que a degradação térmica foi diminuindo, em razão da maior parte dos componentes químicos da madeira, celulose e hemiceluloses, principalmente, já terem sido degradadas (POLETTO *et al.* 2012)

### 5.3 ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA

A média dos teores de lignina e consequentemente o de holocelulose encontrada para as espécies estudadas estão acima dos resultados encontrados em literatura para espécies semelhantes. A espécie que apresentou menor teor de extrativos foi a *Byrsonima crispera* A. Juss e o menor teor de lignina foi *Protium spp.* A espécie *Eschweilera coriacea* (DC) Mart. apresentou o maior teor de extrativos e o maior teor de lignina (Tabela 3).

TABELA 3: Valores médios para Teores de Extrativos Totais, lignina e Holocelulose para a madeira.

Propriedades	Espécie				
	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC) Mart.	<i>Protium spp.</i>	<i>Ingá spp.</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss
Extrativos totais (%)	8,16 ± 0,77	7,61 ± 3,24	4,86 ± 1,83	7,63 ± 0,76	3,26 ± 1,75
Lignina (%)	51,23 ± 4,80	35,16 ± 10,03	51,23 ± 4,80	49,70 ± 4,68	50,60 ± 4,67
Holocelulose (%)	40,61 ± 4,91	57,23 ± 9,27	43,34 ± 1,67	42,66 ± 5,42	46,14 ± 3,05

Comparativamente, os teores de extrativos encontrados por Simetti (2016) em cinco espécies diferentes de *Eucalyptus* variaram entre 1,20% a 3,69%; Santos (2008) estudou cinco espécies lenhosas do cerrado encontrando teores variando entre 6,14% a 8,54%; Loureiro (2016) avaliou híbridos de *Corymbia citriodora* com *C. torelliana* obtendo o valor médio de 8,79%; e Silva (2014), em estudo em espécies tropicais, encontrou teores de extrativos variando entre 3,55% a 7,68 %.

A variação dos resultados encontrados no teor de lignina entre as cinco espécies estudadas com valores entre 35 a 51%, são maiores que os teores de lignina encontrados por Simetti (2016) (25,99% a 29,27%), Santos (2008) (25,16% a 32,31%), Loureiro (2016) (26,32%) e Silva (2014) (25,13% a 33,64 %), para espécies diferentes das avaliadas nesta pesquisa.

Da mesma forma, os teores de holocelulose obtidos, com valores variando entre 40 a 57% nas cinco espécies avaliadas, são diferente aos resultados encontrados para diferentes espécies pesquisadas por Simetti (2016) (67,02% a 72,55%), Santos (2008) (67,69% a 74,84%), Loureiro (2016) (64,21%) e Silva (2014) (58,68% a 70,55 %).

Madeiras com baixo teor de extrativos totais e lignina e altos teores de holocelulose são indicados para a produção de polpa celulósica, enquanto madeiras com alto teor de lignina, baixo teor de holocelulose são mais indicadas para produção de bioenergia (GOMIDE *et al.*, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2012).

#### 5.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DO CARVÃO

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades energéticas do carvão produzido das cinco espécies, além do teste de comparação múltipla realizado. Observa-se que há diferença entre as espécies para todas as propriedades estudadas.

TABELA 4: Valores médios das propriedades energéticas do carvão vegetal.

Propriedades	Espécie				
	<i>Eschweilera coriaceae</i> (DC) Mart.	<i>Protium spp.</i>	<i>Ingá spp.</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss
PCS (kcal/kg)	6003 ± 81 ab	5916 ± 127 b	6116 ± 50 a	6151 ± 124 a	6040 ± 122,25 ab
PCI (kcal/kg)	5855 ± 80 ab	5727 ± 157 b	5975 ± 93 b	5990 ± 154 a	5855 ± 128,60 ab
TMV (%)	36,44 ± 1,39 ab	36,51 ± 0,97 a	34,99 ± 1,04 c	33,71 ± 0,95 d	35,27 ± 1,04 bc
TCz (%)	1,00 ± 0,27 c	2,21 ± 0,74 ab	1,13 ± 0,58 c	2,95 ± 0,63 a	1,78 ± 1,12 bc
TCF (%)	62,56 ± 1,52 ab	61,28 ± 1,62 b	63,88 ± 0,50 a	63,33 ± 0,91 a	62,95 ± 1,48 b
DA(g/cm <sup>3</sup> )	0,65 ± 0,13 a	0,46 ± 0,05 b	0,39 ± 0,13 c	0,43 ± 0,06 bc	0,44 ± 0,03 bc
DE (Mcal/m <sup>3</sup> )	3920 ± 242,05 a	2695 ± 200 b	2398 ± 811,84 b	2660 ± 49,03 b	2673 ± 77,48 b
BE	85,93 ± 6,07 a	81,28 ± 8,68 ab	85,81 ± 8,42 a	71,61 ± 7,36 b	83,83 ± 4,14 a
RCF (%)	22,16 ± 0,76 ab	21,29 ± 1,42 b	23,29 ± 0,19 a	21,64 ± 1,09 b	19,97 ± 0,70 c
RV (%)	51,25 ± 9,77 bc	55,10 ± 9,10 bc	56,60 ± 8,49 b	63,88 ± 11,00 a	48,63 ± 6,02 c

PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; TMV = teor de materiais voláteis; TCz= teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; DA = densidade aparente; DE = densidade energética; BE = balanço energético; RCF = rendimento carbono fixo; RV = rendimento volumétrico; RG = rendimento gravimétrico. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies à probabilidade de 5% de erro conforme o teste de médias de Tukey.

O maior valor médio encontrado para o poder calorífico foi da espécie *Eschweilera odora* que apresentou o PCS médio de 6151 kcal/kg, seguida por *Ingá spp.* com 6116 kcal/kg. Estatisticamente, apenas o *Protium spp* difere das outras espécies quanto ao poder calorífico superior. Já quanto ao PCI as espécies *Protium spp* e *Inga spp* apresentam, estatisticamente, valores inferiores às outras espécies avaliadas.

Comparativamente, os valores do poder calorífico encontrados são menores aos valores encontrados por Silva *et al* (2014) em avaliação das propriedades energéticas de 4 espécies de madeiras tropicais amazônicas. Todas as espécies estudadas apresentaram resultados abaixo do encontrado por Oliveira *et. al.*(2010), em sua pesquisa sobre os parâmetros da qualidade do carvão vegetal de *Eucaliptus pellita*.

Para o teor de materiais voláteis as espécies *Protium spp* e *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart., não diferem estatisticamente, apresentando os maiores teores com média de 36%.

As espécies *Eschweilera odora* e *Protium spp.* foram as que apresentaram maiores valores de cinzas, com teores de 2,95 e 2,21%, respectivamente. Esses valores são maiores que observado em outras madeiras para energia conforme citado por Silva *et al.* (2014) e Oliveira *et al.*(2010).

As espécies *Ingá spp.*, *Eschweilera odora* e *Eschweilera coriacea* (DC) Mart. não diferem, estatisticamente, quanto ao teor em carbono fixo do carvão. Porém, a espécie *Eschweilera coriacea* (DC) Mart. apresenta a maior densidade energética em função da maior densidade aparente do carvão formado. Todas as espécies apresentaram valores para densidade aparente do carvão superior ao encontrado por Oliveira *et. al.* em diferentes espécies (2010).

Apesar da espécie *Ingá spp.* ter apresentado o maior teor e rendimento do carbono fixo nesta pesquisa, os resultados para o TCF ficou abaixo e o RCF acima do encontrado por Silva (2014) e Oliveira *et. al.*(2010).

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios do rendimento gravimétrico em carvão (RGC), em líquido pirolenhoso (RGL) e em gases-não condensáveis (RGNC) em função das espécies. Os valores dos rendimentos não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

TABELA 5: Valores médios das propriedades energéticas do carvão vegetal.

Propriedades	Espécie				
	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC) Mart.	<i>Protium spp.</i>	<i>Ingá spp.</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss
RGL(%)	50,06	48,85	48,85	49,54	46,21
RGC (%)	36,60	34,83	34,83	34,10	32,81
RGNG(%)	13,34	16,32	16,32	16,36	20,98

RGL = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso; RGC = rendimento gravimétrico em carvão; rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis

Observa-se que o rendimento gravimétrico do carvão e dos gases não condensáveis, em todas as espécies, apresentou valores médios superiores ao encontrado por Oliveira *et. al.*(2010). Enquanto para o rendimento gravimétrico do licor pirolenhoso, os valores observados foram abaixo do encontrado pelo mesmo autor.

Os resultados da análise da composição elementar da madeira com valores para carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6: Valores médios da composição elementar da madeira por espécie.

Propriedades	Espécie				
	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC) Mart.	<i>Protium spp.</i>	<i>Ingá spp.</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss
N(%)	0,75	0,40	0,56	0,62	0,32
C(%)	48,69	46,18	46,97	45,48	44,91
H(%)	5,48	5,58	5,39	5,58	5,40
S(%)	0,012	0,016	0,024	0,045	0,00
O(%)	45,07	47,82	47,06	48,18	49,37

RGL = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso; RGC = rendimento gravimétrico em carvão; rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis

Ao comparar os valores de composição elementar encontrados nesse trabalho com os encontrados por Oliveira *et. al.*(2010) para a madeira de *E. pellita* observou-se que a espécie *Eschweilera coriacea* (DC) Mart. apresentou maior valor para os teores de carbono e nitrogênio.

## 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das propriedades energéticas da madeira indicam que as espécies avaliadas possuem potencial energético, uma vez que todas apresentam densidade energética compatível com as biomassas utilizadas para tal fim.

O maior resultado na madeira para o poder calorífico (superior e inferior) foi da espécie *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart, sendo 4894 kcal/kg para o PCS e 4576 kcal/kg para o PCI. Essa espécie também apresentou melhor densidade energética com 4551,42 Mcal/m<sup>3</sup>. Esses valores obtidos estão acima dos valores médios encontrados em literatura para a madeira da espécie de *Eucalyptus grandis*, a mais utilizada para fins energéticos.

Para o carvão vegetal, os melhores resultados energéticos foram apresentados pelas espécies *Eschweilera odora* que apresentou o PCS médio de 6151 kcal/kg, seguida por *Ingá spp.* com 6116 kcal/kg. Porém, a espécie *Eschweilera coriaceae* (DC) Mart. apresenta a maior densidade energética, 3920 Mcal/m<sup>3</sup>, em função da maior densidade aparente do carvão formado. Todas as espécies apresentaram resultados para o PCS abaixo do encontrado em literatura para as espécies mais utilizadas para fins energéticos. Portanto, recomendam-se estudos com a realização de pirólises com diferentes taxas de aquecimento para analisar prováveis melhorias na qualidade do carvão vegetal.

Na análise termogravimétrica as espécies *Protium spp.* (Breu Vermelho) e *Eschweilera coriaceae* (DC.) Mart. (Piaozinho) apresentaram o maior pico de temperatura onde a velocidade de decomposição da madeira é máxima.

Ao comparar o perfil da perda de massa (TGA) e os resultados obtidos na análise do poder calorífico verifica-se que a madeira dessas espécies possui alto teor de lignina. Portanto, recomenda-se estudos mais aprofundados da análise química dessas espécies por não haver em literatura valores a serem comparados.



## 7 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E.A.; HIGUCHI, N. 2009. **Produtividade de quatro espécies arbóreas de Terra Firme da Amazônia Central**. *Acta Amazônica*, 39:105-112
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633** - Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico superior Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112** - Carvão vegetal: análise imediata Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941** Madeira - Determinação da densidade básica, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853** - Madeira: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989** - Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010b.
- BARROSO, G. M.; GUIMARÃES, E. F.; ICHASO, C. L. F.; COSTA, C. G.; PEIXOTO, A. L. Lecythidaceae. In: G. M. BARROSO. **Sistemática de angiospermas do Brasil**: I. LTC/EDUSP, São Paulo. 1978. p. 165-169
- BILA, Narciso Fernando. **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeira tropicais da Amazônia**. 2014. 74f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 17/02/2014.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2, densidade da madeira X densidade do carvão**. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, out. 1980.
- BRITO, JOSÉ OTÁVIO; BARRICHELO, LUIZ ERNESTO GEORGE. **Características do Eucalipto como Combustível: Análise Química Imediata da Madeira e da Casca**. IPEF, n. 16, p 63-70, 1978.
- CASTRO, Vinicius Gomes de. **Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeiramento por vibro-compactação**. 2015. 221 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 23/02/2015.
- CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.
- COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. 1996. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Pittsburgh, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

ELOY, Elder. **Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação**. 2013, 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

Fengel, D.; Wegener, G.; **Wood Chemistry, Ultrastructure and Reactions**, 1st ed., Walter de Gruyter: Berlin, 1989

GONÇALVES, César Joel Campos. **Caracterização da Madeira de *Cryptomeria Japonica* D. Don produzida nos Açores**. 2013, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2013.

INPA/PPF **Catálogo de madeiras da Amazônia: Características tecnológicas; área da hidrelétrica de Balbina**. Manaus, 1991. 153p.

KLOCK, Umberto; BOLZÓN DE MUÑIZ, Graciela Inés; ANZALDO HERNÁNDEZ, José. **Química da madeira**. 3.ed. Curitiba: UFPR/Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal: FUPEF, 2005. 81f., il. (Didática). Inclui bibliografia. ISBN (Enc.).

LOUREIRO, A.A., SILVA, M.F. **Catálogo de madeiras da Amazônia**. Vol. I. Faculdade de Florestas, Belém, 1968. 433p.

LOUREIRO, A.A., SILVA, M.F. & ALENCAR, J.C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Vol. II. INPA/SUFRAMA, Manaus 1979.

LOUREIRO, Breno Assis. **Análise energética da madeira e do carvão de híbridos entre *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson e *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**. 2016. 87 p. Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras : UFLA, 2016.

MARQUES, D.D; Sartori, R.A.; Lemos, T.L.G.; Machado, L.L; Souza, J.S.N; Monte, F.J.Q. 2010. Composição química do óleo essencial de duas subespécies do *Protium heptaphyllum*. **Acta Amazônica**, 40(1): 227-2230

MELO, C. F. M., GOMES, J. I. **Estudo químico e micrográfico de madeiras da Amazônia**. Comunicado técnico n. 19. EMPRAPA, Belém, 1979. 70 p.

MORI, S. A., PRANCE, G. T. Lecythidaceae part II: the zygomorphic flowered New World genera. **Flora Neotropica Monograph**. v. 21. n.2. p1-376. 1990

MOUTINHO, V. H. P. **Caracterização das madeiras conhecidas na Amazônia brasileira como Matá-matá (*Lecythidaceae* fam. A. Rich.)**. Dissertação de mestrado em Ciência e tecnologia da madeira. Universidade Federal de Lavras. 2008. 78p.

NEVES, T. A. PROTÁSIO. T. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista Ciência Agrária**, Belém, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NOUGUEIRA, E. M., NELSON, B. W., FEARNside, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 208. p.261-286. 2005

OLIVEIRA AC, Carneiro ACO, Vital BR, Almeida W, Pereira BLC, Cardonso MT. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell.** *Scientia Forestalis* 2010; 38 (87): 431-439.

PEREIRA, J. O. P.; FREITAS, B. M. Estudo da biologia floral e requerimentos de polinização do muricizeiro (*Byrsonima crassifolia* L.). **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza – CE, v.33, n. 2, p. 5-12, 2002.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. 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.

QUIRINO, WALDIR F.; VALE, AILTON TEIXEIRA do; ANDRADE, ANA PAULA ABREU de; ABREU, VERA LÚCIA SILVA; AZEVEDO, ANA CRISTINA DOS SANTOS. **Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Ligno-Celulósicos**. Revista Madeira, n. 89, p 100-106, 2005.

RIBEIRO, J.E.L.S., HOPKINS, M.J.G., VICENTINI, A., SOTHERS, C.A., COSTA, M.A.S., BRITO, J.M., SOUZA, M.A.D., MARTINS, L.H.P., LOHMANN, L.G., ASSUNÇÃO, P.A.C.L., PEREIRA, E.C., SILVA, C.F., MESQUITA, M.R. & PROCÓPIO, L.C. **Floresta da reserva Ducke: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central**. Manaus, 1999. Inpa, p. 505-511.

SANTOS, Iris Dias. **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**. Distrito Federal, 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. Brasília. DF.

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

SILVA, Érica Aparecida Souza. **Estudos analíticos dos óleos essenciais extraídos de resinas de espécies Protium spp**. São Carlos, 2006. 156 p.

SILVA, Allison Gonçalves. **Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido**. 2013, 130 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

SILVEIRA, LÍVIA HELENA CARRERA; REZENDE, ALBA VALÉRIA; VALE, AILTON TEIXEIRA DO. **Teor de Umidade e Densidade Básica da Madeira de Nove Espécies Comerciais Amazônicas**. Revista Acta Amazônica, vol. 43 (2), p. 179-184, 2013.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal 2005**. Nov. 2005, 107p. Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>>. Acesso em: 21/06/2016.

STEEGE, H., PITMAN, C. A., PHILLIPS, O. L., CHAVE, J., SABATIER, D., DUQUE, A., MOLINO, J., PRÉVOST, M., SPICHIGER, R., CASTELLANOS, H., HILDEBRAND, P., VÁSQUEZ, R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**. v. 443. p. 444-447. 2006

TELMO, C.; LOUSADA, J.; MOREIRA, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n.11, p. 3808-3815, 2010.

VICENTINI, A.; ANDERSON, W. R. Malpighiaceae In: RIBEIRO,J.; HOPKINS, M.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.; COSTA, M.; BRITO, J.; SOUZA, M.; MARTINS, L. LOHMANN, L.; ASSUNÇÃO, P. PEREIRA, E.; SILVA, C.; MESQUITA, M.; PROCÓPIO,L. **Flora da reserva Ducke - guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme da Amazônia Central**. INPA-DFID, Manaus. p. 505-511. 1999