II Congresso Internacional das Ciências Agrárias COINTER - PDVAgro 2017

AValiação TECNOLÓGICA DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS DE SERRARIA PRODUZIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARBONIZAÇÃO

Apresentação: Comunicação Oral

Luan Felipe Feitosa da Silva¹; Antonio Renan Sales de Castro²; Rudson Silva de Oliveira³ Camila Cristina Soares Lobato⁴; Denes de Souza Barros⁵

Resumo

O carvão é superior à madeira quanto à produção de energia, devido a maior concentração de carbono fixo e, consequentemente, maior poder calorífico. Porém, ainda nem todos esses processos são totalmente entendidos, principalmente, pela dificuldade em acompanhar a variação de temperatura, transferência de calor e perda de massa no interior da madeira, durante o processo de pirólise. O objetivo do trabalho foi analisar as características químicas do carvão vegetal produzidos a partir dos resíduos do desdobramento da tora de madeira de quatro espécies tropicais amazônicas, sob diferentes tempos e temperaturas de carbonização. A coleta do material foi realizada em uma serraria, localizada na BR-010, Km 12, no município de Paragominas, distante cerca de 350 km da capital do estado do Pará, entre as coordenadas geográficas 3° 30' e 3° 45' de latitude sul e 48° 30' e 48° 45' de longitude a oeste de Greenwich. Foram selecionados resíduos de quatro espécies que comercializadas na região, a saber, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O. (Ipê), *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim) e *Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth (Orelha-de-macaco). Para o processo de carbonização foram preparados 20 corpos de provas com dimensão de 2x2x2 cm, para cada espécie com 5 repetições para cada tratamento, totalizando 60 amostras de madeiras. A carbonização do material foi realizada em um forno elétrico do tipo Mufla, com taxa de aquecimento de 1,6 °C/min, sob diferentes temperaturas e tempo de estabilização na temperatura final. O carvão foi submetido a análise química imediata para a quantificação dos teores de materiais voláteis, cinzas e Carbono fixo, seguindo as recomendações da Norma D1762 da American Society for Testing and Material. As características estudadas seguiram um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x2. Realizou-se a análise de variância e quando os resultados foram significativos, efetuou-se o teste de Tukey a 5% de significância para a comparação das médias. Os dados foram analisados através do software estatístico *Assistat 7.7*. A análise química imediata do carvão vegetal apresentou valores satisfatórios, o teor de materiais voláteis manteve-se abaixo de 28%, teor de cinzas abaixo de 1% e a porcentagem de carbono fixo valores acima de 79%, mostrando que o carvão produzido é recomendado para geração de energia em grande e pequena escala.

Palavras-Chave: Amazônia, Pirólise, Biomassa.

¹ Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia, luan-feitosa@hotmail.com.com

² Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia, renansales6@hotmail.com

³ Mestrando em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, rudsonoliveirapbs@gmail.com

⁴ Graduanda em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia, milacristina2@gmail.com

⁵ Professor Mestre em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia, denesbarros@yahoo.com.br

Introdução

Devido à grande biodiversidade existente e potencial em oferta de madeira, os polos madeireiros da região amazônica, em especial do Estado do Pará, são os grandes fornecedores de madeira tropical para o restante do Brasil. Segundo Paiva (2009), o Pará destaca-se pela extração e beneficiamento de madeira em tora, além da exportação de diversos produtos e coprodutos florestais.

Entretanto, o rendimento da tora comercial pode variar de 30% a 40% em função do tipo de madeira e tecnologia empregada, portanto, praticamente metade do fuste é transformada em resíduos (BRAND, 2010). Segundo o IMAZON (2010), de 8,4 milhões de metros cúbicos de madeira em tora não aproveitadas para serrarias no ano de 2009, cerca de 1,6 milhões foram utilizados para a produção de carvão vegetal, outros 2,7 milhões na geração direta de energia e o restante foram considerados como resíduo não aproveitáveis e abandonados como entulho.

Devido ao seu grande potencial de aproveitamento e pelos inúmeros produtos combustíveis que podem ser obtidos, a biomassa de origem florestal tem despertado interesse para fins energéticos, isso inclui os resíduos do manejo florestal e o processamento industrial da madeira (NEVES et al., 2011; BUFALINO et al., 2012).

O carvão vegetal é uma fonte secundária de energia produzida a partir de um processo termoquímico de conversão energética da madeira, na presença controlada ou ausência de oxigênio (pirólise), a temperaturas acima de 350°C, sendo, portanto, um combustível sólido com maior concentração de carbono (PROTÁSIO et al., 2014).

Segundo Castro et al. (2013), o carvão é superior à madeira quanto à produção de energia, devido a maior concentração de carbono fixo e, consequentemente, maior poder calorífico. No entanto, as propriedades do carvão vegetal são muito variáveis, pois sofrem influência direta da matéria-prima que lhe deu origem, da temperatura e do tempo no processo de carbonização, aspectos estes de difícil controle.

Atualmente as pesquisas conduzidas no Brasil estão concentradas na investigação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para uso siderúrgico, principalmente, da espécie *Eucalyptus spp.* Em contrapartida, poucos são os estudos focados na análise do potencial energético das espécies tropicais e consequentemente, do carvão vegetal produzido a partir do aproveitamento dos resíduos gerados no processamento industrial das mesmas.

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi analisar as características químicas do carvão vegetal produzidos a partir dos resíduos do desdobramento da tora de madeira de quatro espécies tropicais amazônicas, sob diferentes tempos e temperaturas de carbonização.

Fundamentação Teórica

A otimização do uso da biomassa, busca a utilização de sistemas integrados como matérias-primas, processos, tecnologias e produtos. Isso pode acontecer de acordo com parâmetros técnicos, que considerem o balanço de massa e energia, o ciclo de vida, a geração e o consumo dos produtos e serviços, de forma distribuída, além da mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Para adequar essa realidade, busca-se na cadeia produtiva do carvão vegetal, a modernização e a melhoria da tecnologia empregada na conversão da madeira em carvão (OLIVEIRA, 2012). Em 2013, o Brasil apresentou área plantada de 7,6 milhões de hectares de florestas e, desse total, aproximadamente 15% são destinados à produção de carvão vegetal para siderurgia, onde é utilizado como termorredutor para o minério de ferro (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014). Sabe-se que na decomposição térmica da madeira ocorrem fenômenos como reações químicas, condução de calor, evaporação e transporte de gases (DI BLASI, 2008). Porém, ainda nem todos esses processos são totalmente entendidos, principalmente, pela dificuldade em acompanhar a variação de temperatura, transferência de calor e perda de massa no interior da madeira, durante o processo de pirólise. Portanto, é importante ressaltar que o processo de carbonização é influenciado por diversos parâmetros tanto operacionais como também a matéria-prima, sendo necessário entender os principais fenômenos que ocorrem, durante as etapas de conversão térmica da madeira em carvão.

Metodologia

A coleta do material foi realizada em uma indústria madeireira (serraria), localizada na BR-010, Km 12, no município de Paragominas, distante cerca de 350 km da capital do estado do Pará, entre as coordenadas geográficas 3° 30' e 3° 45' de latitude sul e 48° 30' e 48° 45' de longitude a oeste de Greenwich.

Foram selecionados resíduos de quatro espécies que são fortemente comercializadas na região, a saber, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.O. (Ipê), *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim) e *Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth (Orelha-de-macaco).

Para a realização das análises foram preparados dez corpos de prova medindo 2x3x5 cm, de cada espécie, totalizando 40 amostras de madeiras. Os mesmos foram encaminhados para o Laboratório de Botânica-Xiloteca da Embrapa Amazônia Oriental, situado no município de Belém, para a determinação do táxon de cada espécie, registrado através do NIDX 13/2015. Em seguida, as madeiras foram enviadas ao Laboratório de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural da Amazônia, para a caracterização química do carvão vegetal.

Para o processo de carbonização foram preparados 20 corpos de provas com dimensão de 2x2x2 cm, para cada espécie com 5 repetições para cada tratamento, totalizando 60 amostras de madeiras.

A carbonização do material foi realizada em um forno elétrico do tipo Mufla, com taxa de aquecimento de 1,6 °C/min, sob diferentes temperaturas e tempo de estabilização na temperatura final, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Esquema de carbonizações avaliadas no experimento. Fonte: Própria

Carbonização	Temperatura final (°C)	Tempo final (min)
I	500	30
II	500	60
III	600	30
IV	600	60

O carvão foi submetido a análise química imediata para a quantificação dos teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCz) e carbono fixo (CF). Para a realização destas análises, o carvão produzido foi triturado e classificado em peneiras de 60 mesh para atingir a granulometria adequada para os testes.

A análise de materiais voláteis (TMV) foi realizada seguindo as recomendações da Norma D1762 da American Society for Testing and Material (ASTM, 2013) e calculado a partir da seguinte equação (1).

$$TMV = \left(\frac{P(c.s.) - P(cal.)}{P(c.s.)} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que:

TMV = Teor de materiais voláteis (%)

P (c.s.) = Peso do carvão seco em estufa a $103^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ (g)

P (cal.) = Peso do carvão após calcinação à 950°C (g)

Para a determinação do teor de cinzas (TCz), seguiu-se as recomendações da norma técnica supramencionada, onde os cadinhos sem tampas contendo as amostras do carvão vegetal, foram acomodados dentro do forno elétrico (Mufla), e submetidos a aquecimento a uma temperatura de 750°C por 6 horas. Utilizando-se da seguinte equação (2) para a obtenção do conteúdo de cinzas para cada espécie.

$$TCz = \frac{P_{ci}}{P(c.s.)} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

TCz - Teor de cinzas (%);

P (ci.) - Peso do material incinerado (cinzas) a 750 °C durante 6 horas (g);

P (c.s.) - Peso das partículas de carvão seco em estufa à 103° ± 2°C (g).

Após a determinação dos valores de teor de cinzas e materiais voláteis, é possível obter o teor de carbono fixo (CF%) por diferença, de acordo com a equação (3).

$$TCF = 100 - (TMV + TCz) \quad (3)$$

Em que:

CF% = Teor de carbono fixo (%)

TMV = Teor de materiais voláteis (%)

TCz = Teor de cinzas (%)

As características estudadas seguiram um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 2x2 (Temperatura Final x Tempo de Estabilização).

Primeiramente, verificou-se a homogeneidade de variância pelo teste de Levene e de normalidade na distribuição dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk. Após a verificação desses parâmetros, então, realizou-se a análise de variância e quando os resultados foram significativos, efetuou-se o teste de Tukey a 5% de significância para a comparação das médias.

Os dados foram analisados através do software estatístico *Assistat 7.7*

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para o teor de materiais voláteis diferiram estatisticamente entre os tipos de carbonizações empregadas (Tabela 2), onde verificou-se que com o aumento da temperatura ocorreu uma diminuição no conteúdo de voláteis do material.

Tabela 2: Médias do teor de materiais voláteis (%) das espécies estudadas em cada tipo carbonização. Fonte: Própria

ESPÉCIE	CARBONIZAÇÃO				Média
	I	II	III	IV	
<i>Handroanthus Serratifolius</i>	19.53 a	18.08 a	13.45 b	13.12 b	16.04
<i>Enterolobium shomburgkii</i>	18.66 a	19.63 a	13.68 b	14.54 b	16.63
<i>Hymenolobium petraeum</i>	20.77 a	20.61 a	15.99 a	15.89 a	18.32

Medias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p > 0,05).

Os teores de materiais voláteis encontrados para a temperatura de 600°C foram cerca de 5% menores quando comparados a carbonização de 500°C, portanto, contudo que se eleva a

temperatura maior será o consumo da massa de carvão que, conseqüentemente, acarretará na liberação de mais gases durante a queima, e quando encontrado em valores elevados, influência diretamente na eficiência do carvão vegetal durante sua utilização.

Segundo Santos (2008), o carvão vegetal deve apresentar de 20 a 25% de TMV para uso siderúrgico, haja vista que influencia na porcentagem em carbono fixo, afetando seu desempenho no alto-forno. Comparando com o presente estudo, verifica-se que todos os indivíduos analisados se enquadram para uso industrial, bem como para uso doméstico, uma vez que segundo a Resolução nº 40/2015 do Estado de São Paulo que versa sobre a qualidade do carvão vegetal para uso doméstico, o TMV deve apresentar-se abaixo de 28% (SÃO PAULO, 2015).

A análise do conteúdo de cinzas presentes no carvão vegetal é necessária para a avaliação da sua eficiência energética, uma vez que indica a quantidade de materiais inorgânicos e estes, por sua vez, por não participarem do processo de combustão acabam influenciando de maneira negativa, principalmente, no poder calorífico. Os resultados obtidos para o teor de cinzas para as amostras analisadas estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3: Médias do teor de materiais voláteis (%) das espécies estudadas em cada tipo carbonização. Fonte: Própria

ESPÉCIE	CARBONIZAÇÃO				Média
	I	II	III	IV	
<i>Handroanthus Serratifolius</i>	0.84 a	0.84 a	0.82 a	0.89 a	0.84
<i>Enterolobium shomburgkii</i>	0.94 a	1.07 a	1.04 a	0.88 a	0.82
<i>Hymenolobium petraeum</i>	0.81 a	0.88 a	0.86 a	0.78 b	0.83

Medias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Os tratamentos aplicados não diferiram estatisticamente para todos os indivíduos analisados. A variação encontrada de 0,81% a 1,07% evidencia a heterogeneidade encontrada para as espécies tropicais amazônicas, estando de acordo com os resultados obtidos por Silva et al. (2014) ao avaliarem as propriedades energéticas do resíduo de quatro essências florestais nativas da Amazônia.

De acordo com Boas et al. (2010), a maior proporção de materiais minerais na biomassa ocasiona um ganho na percentagem de cinzas do carvão produzido e conseqüentemente, menor o poder calorífico. Além da perda de energia no sistema por redução do poder calorífico, o elevado teor de cinzas acarreta em um maior desgaste do aparelho de conversão energética (Alto forno, churrasqueiras, etc.), conseqüentemente, maiores intervenções deverão ser realizadas para manutenção.

Com base nos resultados obtidos nesse parâmetro, os carvões produzidos a partir desses materiais podem ser utilizados para uso doméstico, uma vez que o teor de cinzas foi inferior a 1,5% conforme indicado pela Resolução nº 40/2015 do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2015; ROSA et al., 2012).

O carbono fixo é o componente predominante do carvão vegetal e segundo Protásio et al. (2015), quanto maior o seu valor maior será a energia de combustão e o seu valor calórico. Com base nos resultados verificou-se que houve diferença estatística entre os tratamentos aplicados, ou seja, teve um aumento no teor de carbono fixo em função do aumento da temperatura de carbonização, entretanto, não foi observado diferença quanto ao tempo final de estabilização (Tabela 4).

Tabela 4: Médias do teor de materiais voláteis (%) das espécies estudadas em cada tipo carbonização. Fonte: Própria

ESPÉCIE	CARBONIZAÇÃO				Média
	I	II	III	IV	
<i>Handroanthus Serratifolius</i>	79.64 b	81.08 b	85.73 a	85.99 a	83.11
<i>Enterolobium shomburgkii</i>	80.40 b	79.30 b	85.28 a	84.58 a	82.39
<i>Hymenolobium petraeum</i>	78.42 b	78.52 b	83.15 a	83.33 a	80.85

Medias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O carvão produzido a 600°C apresentou o maior percentual de carbono fixo (84,36%), sendo este resultado satisfatório, uma vez que os teores mais elevados dessa propriedade são recomendados, porque o combustível queimará mais lentamente, residindo por um maior período de tempo no aparelho destinado a queima (BRAND, 2010).

O teor em carbono fixo apresenta um comportamento inversamente proporcional aos teores de materiais voláteis e cinzas, portanto, na maior temperatura de carbonização (600°C) verificou-se que baixas percentagem de voláteis (14,76%) e cinzas (0,86%) contribuíram para elevação do carbono fixo.

Ao estudar o carvão vegetal produzido a partir de Cedrinho (*Scleronema sp.*) e Louro (*Ocotea sp.*) ambas espécies tropicais amazônicas, Silva et al. (2014), encontraram resultado para o CF de 69,54% e 71,73%, respectivamente, abaixo do observado nesse trabalho, entretanto, Dias Júnior; Brito; Andrade (2015), observaram que o carvão vegetal produzido através da madeira de *Eucalyptus spp.*, no Estado de São Paulo, apresentavam valores satisfatórios para o consumo doméstico (82%).

Conclusões

A análise química imediata do carvão vegetal apresentou valores satisfatórios, o teor de

materiais volteais manteve-se abaixo de 28%, teor de cinzas abaixo de 1% e a porcentagem de carbono fixo valores acima de 79%, mostrando que o carvão produzido é recomendado para geração de energia em grande e pequena escala.

Referência

ASTM. **D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. United States, 2013.

BOAS, M. A. V. et al. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 481–490, 2010.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Floresta**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, p. 129-137, 2012.

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

DI BLASI, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, Italy, v. 34, n. 1, p. 47–90, Dec. 2008.

DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1127–1133, dez. 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Associação que representa os segmentos de painéis e pisos de madeira, celulose, papel e florestas energéticas. Brasília: **IBÁ**, 2014. 100 p.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA. A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados. Belém: **IMAZON**, 2010. 20p. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 28 set. 2017.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal.

OLIVEIRA, A. C. Sistema forno-fornalha para a produção de carvão vegetal. Viçosa, 2012. 73 p. **Dissertação**. Departamento de Engenharia florestal, UFV, 2012. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

PAIVA, C.V-B. **Análise da produção madeireira do estado do Pará**. 2009.

PROTÁSIO, T. D. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O.; Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801–816, 1 dez. 2015.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CÉSAR, A. A. S.; NAPOLI, A.; MELO, I. C. N. A.; SILVA, M. G.; Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **SpringerPlus**, v. 3, n. 1, p. 124, 2014.

SANTOS, I. D. Holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal. Brasília, 2008. 92p. **Dissertação**. Departamento de Engenharia Florestal, UNB, 2008.

SÃO PAULO, E. DE. **Resolução SAA - 40, de 14 de Dezembro da Secretaria de Agricultura e Abastecimento**. Brasil, 2015. Disponível em: <http://www.jusbrasil.com.br/diarios/106330704/dosp-executivo-caderno-1-15-12-2015-pg-30/pdfView>.

SILVA, D. A.; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; da et al. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

VILAS BOAS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010.