



EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus spp.* NOS REDIMENTOS DOS PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO

Wagner Davel CANAL¹, Ana Márcia M. L. CARVALHO¹, Lucas de Freitas FIALHO¹,
Clarissa Gusmão FIGUEIRÓ¹, Humberto Fauler DE SIQUEIRA¹, Fabiana Paiva DE
FREITAS¹, Thaís Pereira FREITAS², Carla Caroline Borges DE SOUZA³

1 – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil

2 – Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Brasil

3 – Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Campus Aquidauana, Aquidauana, Brasil

RESUMO: A produção de carvão vegetal possui considerável potencial poluidor, havendo a emissão de gases não condensáveis e compostos orgânicos nocivos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da umidade da madeira nos rendimentos dos produtos da carbonização. Avaliou-se um clone de *Eucalyptus spp.* com aproximadamente 7 anos de idade, proveniente de um teste clonal de uma empresa florestal, localizado em Divinésia, MG. Foram realizadas carbonizações em mufla de laboratório com madeira a teores de umidade de 0%, 20% (± 5), 40% (± 5) e 60% (± 5) em base seca. Determinaram-se sua composição química, densidade e poder calorífico superior. Após as carbonizações foram obtidos os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis. Instalou-se um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (umidades) e três repetições (carbonizações). Os rendimentos foram significativamente influenciados pela umidade, de modo que incrementos em umidade determinaram a diminuição no rendimento de carvão vegetal, o aumento na produção de gases condensáveis e a diminuição no rendimento em gases não condensáveis. Essa maior ou menor produção das frações do processo de carbonização são explicados, respectivamente, pela maior e menor massa de água contida na madeira. Pode-se concluir que teores de umidade acima de 30% em base seca, não são recomendáveis para o processo de carbonização sob o aspecto técnico, pois se tem um aumento expressivo na produção de gases condensáveis nocivos ao meio ambiente.

Palavras chave: Emissão, carvão vegetal, massa de água.

ABSTRACT: The charcoal production has considerable pollution potential, with the issue of gases emission and harmful organic compounds. This study was conducted to evaluate the effect of wood moisture content in the carbonization products income. The *Eucalyptus spp.* clone of approximately 7-years-old was evaluated, from a clonal test of the forestry company located in Divinésia MG. Were performed carbonization in a laboratory muffle with wood moisture of 0%, 20% (± 5), 40% (± 5) and 60% (± 5) on a dry basis. Were determined their chemical composition, density and gross calorific value. After the carbonization was obtained the gravimetric yields in charcoal, condensable gases and non-condensable gases. It settled a completely randomized design with four treatments (moisture) and three repetitions (carbonization). Yields were significantly influenced by moisture, so that increases in moisture determined decreases in the yield of charcoal, increases of condensable gases production and decrease in the non-condensable gases yield. These phenomena are due in large part to the same volume, the contained of water mass in the wood is inversely



proportional to its dry weight, influencing the production of higher or lesser fractions of the carbonization process. So, as the main conclusion of this work, it can be said that moisture content above 30% on a dry basis, are not recommended for the carbonization process under technical aspect, because there is a significant increase in the production of harmful condensable gases on the environment.

Keywords: Emission, charcoal, water mass.

1. INTRODUÇÃO

A degradação térmica da madeira gera subprodutos em concentrações semelhantes à sua composição química, sendo que a maioria deles, apesar de serem altamente energéticos, são perdidos para a atmosfera.

A ação do calor sobre ela promove a sua total ou parcial degradação, gerando subprodutos em concentrações semelhantes à sua composição química, sendo que a maioria deles, apesar de serem altamente energéticos, são perdidos para a atmosfera. Assim, em condições controladas de oxigênio, o calor aplicado promove a sua destilação e desdobramento, sendo expulsos seus produtos voláteis e fazendo com que esta biomassa praticamente dobre o seu conteúdo de energia em termos de massa de madeira seca. Com um poder calorífico inicial de 3.600 kcal/kg, a energia térmica imposta a este material promove a produção de um combustível com aproximadamente 75% de carbono fixo e um poder calorífico superior de 7.000 kcal/kg, possuindo rendimentos aproximados de 30 a 35%. Desse modo, a função da carbonização é exercer unicamente a concentração de energia no volume disponível à madeira (CGEE, 2008; REZENDE, 2006; KLOSE et al., 2000; DUBOC et al., 2007).

Esse processo, apesar de ser extremamente vantajoso do ponto de vista energético, envolve a produção de subprodutos gasosos condensáveis, considerados danosos à saúde humana, como ácidos orgânicos, alcoóis, derivados fenólicos; e gases não condensáveis, como o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e compostos carbônicos de cadeia curta (C_nH_m), em concentrações semelhantes à composição química da madeira, sendo que a ação do calor elimina a maior parte dos componentes voláteis da madeira. Esses subprodutos altamente energéticos são perdidos durante o processo, ou seja, a produção de carvão faz com que o seu balanço energético seja inferior ao da madeira em sua forma natural, devido à emissão de elementos altamente energéticos. Além disso, essa produção possui um potencial poluidor alto, havendo, portanto, a emissão de gases não condensáveis e compostos orgânicos nocivos ao meio ambiente que causam poluição ambiental e prejuízos à saúde humana.

Cabe ainda mencionar que no processo de carbonização, de acordo com o aumento da temperatura, há uma considerável diminuição da produção de compostos orgânicos condensáveis na forma de licor pirolenhoso e um aumento na emissão de compostos gasosos não condensáveis. Essa competição na produção desses subprodutos é devida, em grande parte, à constituição dos compostos químicos da madeira, conferindo diferentes resistências à degradação térmica, o que faz com que a liberação de produtos gasosos, como um todo, ocorra de acordo com os incrementos em temperatura e em faixas específicas, determinando complexidade ao processo. Assim, uma pequena fração da madeira é transformada em carvão vegetal, enquanto que os seus subprodutos gasosos não condensáveis, alcatrões e água fecham essa conta (SHEN et al., 2010; KLOSE et al., 2000).



Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo expor o efeito dos incrementos em umidade da madeira nos rendimentos dos produtos da carbonização e principalmente no comportamento emissivo dos gases condensáveis gerados no processo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Minas Gerais.

2.1. Material biológico

Utilizou-se madeira de *Eucalyptus spp.*, com aproximadamente 7 anos de idade, provenientes de um teste clonal localizado na Fazenda Guaxupé, situada no município de Divinésia, MG (20,974° Sul e 43,088° Leste). De acordo com a classificação de Köppen, o tipo climático da região é Cwa, caracterizado como sendo de clima temperado úmido e com inverno seco (PEEL et al., 2000).

2.2. Propriedades físicas e químicas

Sua densidade básica foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003), obtendo-se um valor médio para a amostra. O poder calorífico superior da madeira foi determinado de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando bomba calorimétrica adiabática IKA 300, com fração serragem retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh (ASTM, 1982). Na determinação da composição química estrutural da madeira utilizou-se a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh (ASTM, 1982), sendo determinados seus teores de extrativos de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 2001), utilizando o método de determinação de extrativos totais. O teor de lignina insolúvel foi determinado em duplicata pelo método Klason, realizado sob o procedimento de Gomide & Demuner (1986), o de lignina solúvel foi determinado por espectrometria, conforme Goldschimid (1971) e a lignina total foi obtida por meio da soma desses dois valores. Para determinação dos teores de holoceluloses calculou-se as porcentagens de carboidratos, conforme Wallis et al. (1996). A análise química elementar da madeira foi realizada conforme descrito por Paula et al. (2011), utilizando-se massa equivalente a 2,0 mg ($\pm 0,5$) de serragem seca, selecionada em peneiras sobrepostas com malhas de 200 e 270 mesh; em seguida, depositou-se amostras no equipamento *Vario Micro Cube CHNS-O (Elementar)*, sendo realizada análise de uma amostra por vez; com a combustão a 1.150°C no interior do aparelho, transportaram-se seus gases até serem detectados, identificando os elementos químicos por meio de um detector de termocondutividade, onde cada elemento demonstra picos específicos, exceto o oxigênio, sendo mensurado por diferença.

2.3. Carbonização da madeira

Para as carbonizações, a madeira foi seccionada em dimensões de 2 x 2 x 5 cm e controladas suas condições de umidade, chegando a teores de 20% (± 5), 40% (± 5) e 60% (± 5) Umidade Base Seca, atingindo com a exposição dos corpos ao ar ambiente. Após, eles foram ensacados para que não perdessem umidade, cabendo somente o uso de uma estufa de circulação forçada (103 \pm 2°C) para se obter madeira de 0% UBS. Utilizou-se cerca de 281g, 289g, 288g e 308g de madeira, de acordo com a sua respectiva umidade, sendo submetidos à



mufla sob uma taxa média de aquecimento de $1,67^{\circ}\text{C min}^{-1}$, com incrementos de 50°C a cada 30 minutos. A temperatura inicial foi 100°C e a final 450°C , estabilizando-se nesta última por um período de 90 minutos, totalizando 5,0 horas de carbonização. Após essas carbonizações, foram determinadas a massa de carvão, gases condensáveis e gases não condensáveis, sendo este último obtido por diferença com base na massa seca da madeira. Os cálculos dos respectivos rendimentos seguem descritos nas Equações 1, 2 e 3.

Equação 1: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	Equação 2: Rendimento gravimétrico em gases condensáveis (%)	Equação 3: Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%)
$RGCV = 100 * \frac{MCV}{Mmads.i}$	$RGC = 100 * \frac{MGC}{Mmads}$	$RGNC = 100 * \frac{MGi}{Mma}$

em que:

MCV = massa de carvão vegetal, em gramas;

MGC = massa de gás condensável, em gramas;

MGNC = massa de gás não condensável, em gramas; e

Mmads. i = massa de madeira seca correspondente a cada tratamento i, em gramas.

2.4. Análise estatística

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado (DIC) com quatro tratamentos (umidades) e três repetições (carbonizações). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de significância. Quando estabelecidas diferenças significativas, aplicou-se o teste Tukey em nível de 95% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos softwares STATISTICA 8.0 e Microsoft Office Excel 2007.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades da madeira

A madeira obteve valores médios de densidade básica de $0,480\text{g/cm}^3$. Tal valor foi inferior ao citado por Trugilho et al. (2001), que encontraram valores próximos de $0,567\text{g/cm}^3$ como sendo potencial para a produção de carvão. Encontrou-se também um poder calorífico superior médio de $4.485,5\text{kcal/kg}$, sendo próximo ao encontrado por Costa (2012) e compreendido entre as faixas encontradas na literatura para clones de eucalipto.

A composição química da madeira de eucalipto estudada foi de 70,47% de holoceluloses; 26,47% de lignina e 3,06% de extrativos, e sua composição elementar foi de 48,17% de C; 44,06% de O; 6,28% de H; 1,49% de N e 0,002% de S, observados nesta pesquisa.

Desse modo, pode-se dizer que a umidade da madeira não tem a capacidade de influenciar nos seus valores de densidade básica, poder calorífico e na sua composição química estrutural e elementar.

3.2. Rendimentos dos produtos da pirólise

Os valores médios dos rendimentos gravimétricos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores médios dos rendimentos gravimétricos

Umidade Base Seca - UBS (%)	RGCV (%)	RGGC (%)	RGGNC (%)
0	32,43 a	49,10 a	18,47 a
20	26,05 b	57,20 b	16,74 ab
40	21,00 c	63,58c	15,42 ab
60	18,99 d	68,03 d	12,97 b

RGCV, RGGC, RGGNC = Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis. Médias, na coluna, com mesma letra não diferem entre si a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Para um mesmo volume, a massa de água contida na madeira é inversamente proporcional a sua massa seca. Assim, observou-se que para as umidades de 0 %, 20 %, 40 % e 60 % a massa de madeira seca diminuiu para valores respectivos a 281 g, 230 g, 178 g e 116 g. Desse modo, a umidade na madeira influenciou os valores dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, variando de 32,43% a 0% UBS até 18,99% a 60% UBS.

O rendimento em gases condensáveis aumentou proporcionalmente ao aumento da umidade da madeira, observando-se valores de 49,10% a 0% UBS e 68,03% a 60% UBS – cerca de 20% maior. Esse comportamento já era esperado, visto que a água presente na madeira durante a carbonização transforma-se em vapor, sendo posteriormente incorporada à fase condensável dos produtos da carbonização. A obtenção máxima desse licor pirolenhoso foi observada na faixa de temperatura de 200°C a 350°C, com pico de produção a 300°C. Entre esses extremos de temperatura ocorre a intensificação da quebra das moléculas dos constituintes químicos da madeira, levando à formação de uma mistura de hidrocarbonetos e compostos oxigenados, lineares ou cíclicos, tais como alcanos, alquenos, cetonas, ácidos carboxílicos e aldeídos, além de monóxido, dióxido de carbono e água. Também é possível descrever que o grau e a complexidade do composto orgânico constituinte nos gases condensáveis dependem do esqueleto de carbono reagente e de reações consecutivas dos produtos formados (OLIVEIRA et al., 1982).

Assim como verificado para o rendimento em carvão vegetal, o rendimento em gases não condensáveis também se comportou de maneira inversamente proporcional à umidade da madeira, ou seja, quanto maior o teor de água na madeira menor foi o rendimento em gases não condensáveis. Os valores variaram de 18,47% a 0% UBS até 12,97% a 60% UBS, conforme observado na Tabela 1. Porém, cabe ressaltar que a intensa produção de fuligem e subprodutos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana podem ser detectados, uma vez que a saturação do ambiente por água na primeira fase de carbonização – secagem – promove a formação de subprodutos gasosos, dado que a molécula de H₂O exerce papel de reagente secundário, fazendo com que haja um aumento na quantidade dos gases CH₄, CO, H₂ e CO₂, além de se reduzir o rendimento em carvão vegetal (SUAREZ et al., 2007).



4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi possível concluir que:

- O teor de umidade da madeira não influencia na variação de suas propriedades físicas (como sua densidade básica), energéticas (como o seu poder calorífico superior) e químicas (composição química elementar e estrutural);
- Incrementos em umidade influenciam nos rendimentos dos produtos da carbonização, de modo que se percebe aumento no rendimento gravimétrico em gases condensáveis e diminuições nos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e em gases não condensáveis;
- A saturação do ambiente pela umidade promove a intensificação da produção de fuligem e gases de efeito estufa no processo de carbonização;
- Teores de umidade acima de 30% em base seca, não são recomendáveis para o processo de carbonização sob o aspecto técnico, pois se tem um aumento expressivo na produção de gases condensáveis nocivos ao meio ambiente, além de reduzir o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, à Embrapa Florestas e à Universidade Federal de Viçosa – UFV.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia: 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Conversão da biomassa em carvão vegetal**. Brasília, 2008. 17p. Disponível em: <www.cgee.org.br/atividades/redirect/4842>. Acesso em: 15 set. 2013.

COSTA, J. M. F. N. **TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO E QUEIMA DOS GASES NA REDUÇÃO DE METANO, COMO BASE À GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO**. 2012. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG - 2012.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. dos S.; PALUDO, A. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 37p., ISSN 1517 – 5111. (Documentos, 197).



GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

KLOSE, W.; DAMM, S.; WIEST, W. Pyrolysis and activation of different woods Thermal analysis (TG/EGA) and formal kinetics. **IV International Symposium of Catalytic and Thermochemical Conversions of Natural Organic Polymers**, Krasnoyarsk, 2000.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A.; ALMEIDA, M.R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. p.62-102.

PAULA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Revista Cerne**, v. 17, n. 2, p.237-246, 2011.

Peel, M. C. and Finlayson, B. L. and McMahon, T. A. (2007). " Updated world map of the **Köppen-Geiger climate classification** (<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/hess-11-1633-2007.html>)". 'Hydrol. Earth Syst. Sci.' 11: 1633-1644. ISSN 1027-5606 (<http://worldcat.org/issn/1027-5606>). (direct: Documento final. (<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/hess-11-1633-2007.pdf>)).

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v.82, p. 39-45, 2010.

SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; WOLF, C. R. Transformação de triglicerídeos em combustíveis materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova**, Canoas, v. 30, n. 3, 667-676, 2007.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. CD-Rom, 2001.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, V.7, N.2, P.104-114, 2001.

WALLIS, A.; WEARNE, R.; WRIGHT, P. J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita Journal**, v. 49, n. 5, p. 427-432, 1996.