

# Carvão vegetal de madeiras nativas do Cerrado em aplicações siderúrgicas e energéticas

## *Charcoal from native woods of the Cerrado in steel and energy applications*

Robson Leal da Silva<sup>1</sup>, Omar Seye<sup>2</sup>, José Ricardo Patelli Jr<sup>3</sup>

**RESUMO:** A qualidade internacional do aço brasileiro é a razão do uso de carvão vegetal no processo siderúrgico, com Mato Grosso do Sul - o maior produtor nacional em 2011 (~356 mil toneladas). O objetivo deste artigo é avaliar a qualidade energética deste biocombustível sólido oriundo de madeiras de espécies nativas (supressão vegetal, sem desmatamento) e disponibilidade geográfica, para atender a demanda regional das indústrias siderúrgicas, cerâmicas, energéticas e afins. A metodologia considerou base de dados do IBGE (2007-2016), determinação de qualidade (PCS, análises imediata e elementar) e comparação com parâmetros do carvão vegetal de outras espécies nativas, plantadas e de biomassas residuais. Resultados indicam: a) MS é um dos quatro maiores produtores anuais, e o segundo maior produtor nacional (2007-2016); b) microrregiões mais produtivas são “Aquidauana” (~21%) e “Três Lagoas” (~23%); c) distribuição geográfica da produção atual é equilibrada nas mesorregiões Centro-Norte (~34%), Leste (~30%) e Pantaneais (~25%); d) produção regional é de qualidade média, com  $T_{CZ} \sim 0,9\%$ ,  $T_{UM,BU} \sim 5\%$ ,  $T_{MV} \sim 33\%$ ,  $T_{CF} \sim 66\%$ ; PCS ~20,7 MJ.kg<sup>-1</sup> ( $\downarrow T_{CF}$ ),  $T_H \sim 5,0\%$ ,  $T_O \sim 3,9\%$  e  $T_C \sim 86,3\%$ , com C/H ~17,3; e) potencial para melhorar qualidade ( $\uparrow T_{CF}$ ,  $\downarrow T_{MV}$  e  $\uparrow$ PCS) e produtividade ( $\eta_{\text{Gravimétrico}}$ , %).

**Palavras-chave:** Agronegócio. Biomassa florestal. Energia renovável. Lenha. Pirólise.

**ABSTRACT:** The international quality of Brazilian steel is the reason for the use of charcoal in the steelmaking process, with Mato Grosso do Sul the largest national producer in 2011 (~356 thousand tons). The objective of this article is to evaluate the energy quality of this solid biofuel from native species wood (vegetable suppression, without deforestation) and geographic availability, to meet regional demand from the steel, ceramic, energy and related industries. The methodology considered the IBGE database (2007-2016), quality determination (SCV, immediate and elemental analysis) and comparison with charcoal parameters of other native species, planted and residual biomass. Results indicate: a) Mato Grosso do Sul is one of the 4<sup>th</sup> largest annual producers, and 2<sup>nd</sup> largest national producer (2007-2016); b) The most productive microregions are “Aquidauana” (~21%) and “Três Lagoas” (~23%); c) Geographical distribution of current production is balanced in the Central North (~34%), East (~30%) and Pantanal (~25%) mesoregions; d) Regional production is of medium quality, with  $T_{CZ} \sim 0.9\%$ ,  $T_{UM,BU} \sim 5\%$ ,  $T_{MV} \sim 33\%$ ,  $T_{CF} \sim 66\%$ ; PCS ~20.7 MJ.kg<sup>-1</sup> ( $\downarrow T_{CF}$ ),  $T_H \sim 5.0\%$ ,  $T_O \sim 3.9\%$  and  $T_C \sim 86.3\%$ , with C/H ~17.3; e) Potential to improve quality ( $\uparrow T_{CF}$ ,  $\downarrow T_{MV}$  and  $\uparrow$ PCS) and productivity ( $\eta_{\text{Gravimetric}}$ , %).

**Keywords:** Agribusiness. Forest biomass. Firewood. Pyrolysis. Renewable energy.

### Autor correspondente:

Robson Leal da Silva: [rlealsilva@botmail.com](mailto:rlealsilva@botmail.com)

Recebido em: 31/03/2020

Aceito em: 31/08/2020

## INTRODUÇÃO

O carvão vegetal produzido no Brasil é destinado prioritariamente ao uso industrial (~85%), destacando-se o setor siderúrgico para aço, ferro-gusa, ferro-liga e silício metálico, tendo sido o maior produtor/consumidor mundial de carvão vegetal em 2009. Do total de 516.10<sup>6</sup> hectares de florestas brasileiras, ~99% são florestas naturais e apenas cerca de 1% é floresta plantada; eucalipto e pinus representando 93% das espécies vegetais plantadas (HEIMANN; DRECH; ALMEIDA, 2015). Uma parte da produção nacional, 6,4 milhões de toneladas, é exportada para diversos

<sup>1</sup> Professor Associado da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados (MS), Brasil; Docente permanente do Mestrado Acadêmico em Eng. Mecânica (PEM) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá (PR), Brasil.

<sup>2</sup> Professor Associado da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados (MS), Brasil.

<sup>3</sup> Professor Assistente da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados (MS), Brasil.

países, como os EUA, o maior importador (~25%). O Estado de Mato Grosso do Sul foi o primeiro produtor nacional de carvão vegetal em 2011 com ~356 mil toneladas (IBGE, 2018), e movimenta 5% do PIB-Produto Interno Bruto estadual com cerca de R\$ 750 milhões (SINDICARV, 2014).

Há no MS unidades industriais (VETORIAL, 2016; VOTORANTIN, 2016) nos municípios de Ribas do Rio Pardo (capacidade instalada de até 300 mil ton.ano<sup>-1</sup> de ferro gusa), Corumbá (até 370 mil ton.ano<sup>-1</sup> de ferro gusa) e Três Lagoas (até 400 mil ton.ano<sup>-1</sup> de vergalhões de aço laminado, a partir de tarugos). Diferente dos demais países industrializados, o Brasil é o único que utiliza o carvão vegetal (do inglês, “charcoal”) em siderúrgicas, em parte devido à inexistência de jazidas de carvão mineral (do inglês, “coal”) na maioria dos Estados (exceto RS e SC) e também por ser um país rico em florestas (MORELLO, 2009). As três principais áreas de extração de minério de ferro no Brasil, e respectivas reservas totais, são Quadrilátero Ferrífero (MG, ~62%), Serra de Carajás (PA, ~28%) e Urucum (MS, ~10%); com terceira (Ferro, Fe) e segunda (Manganês, Mn) maiores reservas do país em Corumbá e Ladário-MS.

A matéria-prima arbórea para produção do carvão vegetal no Estado de Mato Grosso do Sul é de florestas plantadas, onde predomina o eucalipto, mas também madeiras nativas típicas do cerrado, tais como angico do cerrado (*Anadenanthera falcata* (Benth.) Speg.), amendoim-do-campo (*Pterogyne nitens*), canafístula (*Peltophorum dubium*), capitão-do-cerrado (*Terminalia argentea*), carvão-branco (*Callisthene fasciculata*), cedro-rosa (*Cedrela fissilis*), cumbu ou baru (*Dipteryx alata*), ipê (*Tabebuia aurea* (Mart.) Bur.), louro-cravo ou louro-preto (*Pimenta pseudocaryophyllus*), morcegueiro ou sucupira-da-várzea (*Andira inermis*), vinhático da mata (*P. foliolosa*), ximbuva ou timbaúva (*Timbouva Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), dentre outros (ÁRVORES DO BRASIL, 2018; LORENZI, 2012). O uso de madeira nativa ocorre em razão do aproveitamento lenhoso, proveniente de supressão vegetal de pastagens e lavouras existentes (sem desmatamento), cujos resíduos de árvores e madeira de propriedades rurais devem ter destinação econômica, conforme legislação em vigor. Assim, atividades rurais tais como agricultura e pecuária, que são atividades principais no bioma cerrado, conseguem ampliar áreas de uso de maneira sustentável e controlada, obtendo retorno econômico com a venda de matéria-prima para produção do carvão vegetal.

As características energéticas do carvão vegetal, obtido de madeiras nativas ou plantadas, têm registro para diversas espécies: eucaliptos diversos (SOARES *et al.*, 2014; BOTREL *et al.*, 2007; BRITTO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983); pinus diversos (MUÑIZ *et al.*, 2014; BRITTO; NUCC, 1984); nativas do bioma cerrado (COSTA *et al.*, 2014; VALE *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2001; PELLICO NETTO *et al.*, 1982) e de transição cerrado e caatinga (PROTÁSIO *et al.*, 2011); nativas do bioma caatinga e semiárido (MEDEIROS NETO; OLIVEIRA; PAES, 2014; PAES *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2006); nativas de regiões serranas no sul do Brasil (BRAND *et al.*, 2015; BRAND *et al.*, 2013; CARVALHO *et al.*, 2014); nativas da região Amazônica (VIDAURRE *et al.*, 2012); nativas diversas (DAMÁSIO *et al.*, 2013; TRUGILHO; SILVA, 2001); bambus diversos (BALDUÍNO Jr. *et al.*, 2016; COSTA, 2004; BRITO; TOMAZELLO FILHO; SALGADO, 1987). Além de biomassa residual dos frutos de espécies do extrativismo regional tal como babaçu, macaúba ou bocaiúva e coco-da-bahia (PROTÁSIO *et al.*, 2014; VILAS BOAS *et al.*, 2010; ANDRADE *et al.*, 2004).

Há dados escassos na literatura a respeito dos aspectos qualitativos do carvão vegetal obtido de madeiras de espécies nativas (ex: constituição química) e quantitativos (ex: rendimento gravimétrico), VALE *et al.* (2001). Assim, o objetivo deste artigo é quantificar a disponibilidade geográfica de carvão vegetal - identificando histórico e maiores produtores estaduais, determinar as características energéticas (PCS, análise imediata e elementar) do carvão vegetal originado de madeiras nativas no Estado de Mato Grosso do Sul e, por fim, comparar com aqueles produtos originados de outras madeiras nativas brasileiras. Estas informações são relevantes para o uso na indústria siderúrgica ou energética, com pesquisa em escala laboratorial (bancada) e semi-industrial (plantas piloto).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O termo biomassa energética é aplicável à matéria orgânica, vegetal ou animal, que possui carbono em sua constituição. Pode ser classificada de acordo com a sua origem (BRAND, 2010), em floresta (nativa ou plantada), agrícola e agroindustrial, e de resíduos urbanos; ou de acordo com o uso (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008), como biomassa tradicional (ex: lenha, carvão vegetal, palha e casca de arroz, e outros resíduos vegetais/animais), ou moderna (resíduos da indústria da madeira, bagaço de cana-de-açúcar, culturas energéticas e resíduos urbanos).

### 1.1 ORIGEM DO CARVÃO VEGETAL E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O carvão vegetal foi obtido via SINDICARV-MS (2014), originado de diferentes madeiras nativas do cerrado. Amostras em tamanho grande foram cortadas e serradas, com posterior trituração para obtenção de pó. Foi utilizado moinho de facas (marca/modelo: Willye Solab SL 31) e peneira Mesh 20 (abertura de 0,84 mm), com armazenamento posterior em saco plástico impermeável. A Figura 1 ilustra a preparação das amostras e unidade típica de carvoejamento em fornos “rabo quente” ou “meia laranja”.



**Figura 1.** Amostras de carvão vegetal (inteiro e moído) e local de produção típico (OLIVEIRA, 2011; Fornos de alvenaria no Estado do Pará, Brasil).

1089

Avaliou-se o comportamento da massa total da amostra ao longo do tempo para definir os tempos mínimos requeridos para secagem e obtenção de cinzas (vaporização completa dos compostos orgânicos presentes). Assim, o teor de umidade e de cinzas, com massas estabilizadas na temperatura e condições padronizadas, foram respectivamente, 60 e 240 minutos para secagem e cinzas. Um total de seis amostras foi analisado; duas são requeridas por norma técnica.

Os equipamentos utilizados para obter resultados experimentais de análise imediata e PCS foram: balança analítica Acculab ALC-210.4 (teor de cinzas), balança centesimal Bel Engineering M2202 (teor de matéria volátil), forno mufla (Fornitec 2.2 kW), cadinhos e tampas em cerâmica, bomba calorimétrica a volume constante.

### 2.1 ANÁLISES: IMEDIATA E ELEMENTAR

Durante a análise imediata, são determinados os teores de umidade na base úmida ( $T_{UM, bu}$ ), matéria volátil ( $T_{MV}$ ), cinzas ( $T_{CZ}$ ) e carbono fixo ( $T_{CF}$ ). O procedimento foi realizado em duplicada, conforme NBR 8.112 (ABNT, 1986). Inicialmente, a amostra de carvão vegetal (biomassa ou combustível sólido) deve ficar o tempo suficiente secando na estufa até que não haja variação da massa registrada por balança analítica. Ou seja, é necessário determinar o tempo de secagem para cada tipo e natureza das amostras sob análise; registrando a cada 30 min (pesagem), o que resultou em 4h o tempo total requerido para secagem. As recomendações para preparação de amostras para análise imediata foram adaptadas das normas NBR 6922 e NBR 7402 (ABNT, 1981; 1982).

Para análise (ou composição) elementar, e determinada a fração (ou composição percentual mássica) para hidrogênio ( $T_H$ ), oxigênio ( $T_O$ ), carbono ( $T_C$ ), nitrogênio ( $T_N$ ), enxofre ( $T_S$ ) e cinzas ( $T_{CZ}$ ). A capacidade poluidora é determinada pelos teores de enxofre e nitrogênio, tipicamente reduzidos em biomassas de origem vegetal, porém elevados naquelas de origem animal (ex: dejetos suínos, cama de frango etc.). A proporção entre as quantidades de C, H e O implica diretamente na quantidade de energia que pode ser obtida da combustão da biomassa (McKENDRY, 2002). Visto que a determinação experimental da análise elementar é de alto custo (equipamentos sofisticados) e por vezes demorada (NBR 8631; ABNT, 1984), uma estimativa de boa qualidade - utilizável para modelagem e simulação, é obtida via equações empíricas (correlação matemática) com base em resultados experimentais de análise imediata. As Eqs. (1), (2) e (3), a seguir, foram validadas para os componentes mais importantes, H, O e C (YI *et al.*, 2017); considerou-se aqui o modelo para carvão mineral betuminoso ( $T_{UM, bu} \leq 12\%$ ;  $T_{CZ} < 7\%$ ;  $T_{CF} \geq 70\%$ ; PCS 24-35 MJ.kg<sup>-1</sup> e  $T_{S=Enxofre} < 1\%$ ), cujas características de qualidade são mais próximas do carvão vegetal analisado.

$$T_H (\%) = -1,43398.10^{-5} + 1,43461.10^{+3}.(T_{CZ}) - 1,38486.10^{-2}.(T_{CZ})^2 + 1,43578.10^{+3}.(T_{MV}) - 1,25349.10^{-2}.(T_{MV})^2 + 1,43388.10^{+3}.(T_{CF}) + 1,06647.10^{-2}.(T_{CF})^2 \quad (1)$$

$$T_O (\%) = +2,56156.10^{+4} - 2,56084.10^{+2}.(T_{CZ}) - 5,648.10^{-3}.(T_{CZ})^2 - 2,56031.10^{+2}.(T_{MV}) - 1,01905.10^{-3}.(T_{MV})^2 - 2,56126.10^{+2}.(T_{CF}) - 1,69152.10^{-5}.(T_{CF})^2 \quad (2)$$

$$T_C (\%) = +1,6456.10^{+4} - 1,64567.10^{+2}.(T_{CZ}) - 2,46841.10^{-3}.(T_{CZ})^2 - 1,646.87.10^{+2}.(T_{MV}) + 2,57626.10^{-3}.(T_{MV})^2 - 1,64321.10^{+2}.(T_{CF}) - 2,40549.10^{-3}.(T_{CF})^2 \quad (3)$$

Ressalta-se que estas correlações foram obtidas e validadas para resultados de análise imediata (YI *et al.*, 2017), nas faixas:  $1,5\% \leq T_{CZ} \leq 14,1\%$ ;  $5,0\% \leq T_{MV} \leq 47,0\%$ ;  $41,1\% \leq T_{CF} \leq 87,7\%$ .

## 2.2 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR

O PCS foi determinado experimentalmente, conforme procedimentos de referência (SÁNCHEZ, 2010); este corresponde à máxima quantidade de energia térmica que pode ser liberada por meio da combustão completa de um combustível. PCI é função do PCS,  $T_H$  e  $T_{UM, bu}$ , conforme Eq. (4) (GARCIA, 2013); corresponde ao PCS menos a quantidade de energia térmica necessária para mudança de estado da água na forma de vapor superaquecido para líquido saturado obtida, representada pelo  $T_{UM, bu}$  na amostra (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008). Adicionalmente, determinou-se PCS via correlação baseada em análise imediata (PARIKH *et al.*, 2005), Eq. (5); ou com base em análise elementar (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008), Eq. (6); dentre outras (UZUN *et al.*, 2017). Eqs. (1) e (3) utilizadas para obter  $T_H$  e  $T_C$  requeridos nas Eqs. (4) e (6).

$$PCI (MJ.kg^{-1}) = PCS - 2240.[(9.T_H + T_{UM, bu})] \quad (4)$$

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = 0,3536.(T_{CF, bs}) + 0,1559.(T_{MV, bs}) - 0,0078.(T_{CZ, bs}) \quad (5)$$

$$PCS (MJ.kg^{-1}) = 0,4371.(T_C) - 1,6694 \quad (6)$$

A Eq. (5) para PCS estimado - visando comparação com PCS do carvão vegetal de origens diversas disponíveis na literatura - foi obtida e validada para resultados de análise imediata, com amostras de carvão vegetal, mineral e coque siderúrgico, nas faixas:  $0,92\% \leq T_{MV} \leq 90,6\%$ ;  $30,00\% \leq T_{CF} \leq 52,05\%$ ;  $1,02\% \leq T_{CZ} \leq 40,00$  (PARIKH *et al.*, 2005).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 indica o histórico de produção de carvão vegetal no Brasil, classificado como extrativismo (IBGE, 2018). O Estado de MS é o quarto maior produtor nacional - em 2016, porém na média anual é o segundo e alcançou o primeiro em maior produção em 2011 com 359.314 mil toneladas. Existe demanda nacional e internacional por este insumo para redução/oxidação de ferro gusa ("pig iron"; 95% Fe, 4,5% C, 0,5% outros, principalmente Mn) e aço ("steel") cuja produção brasileira é de excelente qualidade; em outros países utiliza-se tipicamente carvão mineral (contém enxofre) que resulta, de maneira geral, em produto de menor qualidade. Brasil e África do Sul são os maiores produtores mundiais de carvão vegetal e os EUA os maiores importadores do Brasil (HEIMANN; DRECH; ALMEIDA, 2015).

**Tabela 1.** Produção anual (toneladas): 10 maiores estados produtores do Brasil em 10 anos de produção

Estado	Média anual	2007-2008	2009-2010	2011	2012-2013	2014-2015	2016
MA	375.327 (27,2%)	1,96/1,41	1,26/0,90	0,91 (2°)	0,92/0,84	0,75/0,61	0,43 (1°)
MS	258.325 (18,8%)	1,66/1,61	1,13/1,11	1,39 (1°)	1,00/0,80	0,67/0,39	0,24 (4°)
MG	183.972 (13,4%)	2,28/2,17	1,53/1,13	0,85 (3°)	0,63/0,55	0,37/0,26	0,23 (5°)
PI	129.666 (9,4%)	1,15/1,31	0,43/1,40	1,06 (4°)	0,90/0,87	1,12/1,19	0,56 (3°)
BA	111.843 (8,1%)	0,49/1,43	1,28/1,17	1,03 (5°)	0,95/0,91	0,91/0,92	0,90 (2°)
PA	80.914 (5,9%)	2,69/1,23	1,22/1,24	0,91	0,72/0,68	0,67/0,33	0,30
GO	75.544 (5,5%)	3,01/2,10	1,76/1,47	0,69	0,34/0,20	0,33/0,07	0,04
PR	52.360 (3,8%)	3,56/3,25	0,49/0,52	0,43	0,42/0,42	0,36/0,35	0,20
MT	42.997 (3,1%)	0,95/1,27	1,79/1,81	1,19	1,29/0,73	0,42/0,33	0,23
TO	32.772 (2,4%)						
Outros	~2,5% (<1% qqr)						
<b>Brasil</b>	<b>1.377.489 (100%)</b>						

Em relação à Tabela 1, vale ressaltar que, no entanto, a produção brasileira está em declínio e, abaixo da média histórica em dez anos (2007-2016); entre os cinco maiores produtores, apenas BA mantém-se aproximadamente constante nos últimos cinco anos analisados, conforme Tab. 1. Dentre as possíveis razões para tal, pode-se elencar questões ambientais (legislação federal e estadual mais rigorosas, visando sustentabilidade a exemplo de outros sistemas produtivos); trabalhistas (condições de insalubridade fortemente presentes) e mesmo de transporte

(legislação classifica o transporte de carvão vegetal na mesma categoria de combustíveis líquidos e gasosos). Entre 1990-2000, a matéria-prima originada de florestas nativas reduziu (24,35 para 7,20 milhões de m<sup>3</sup>) e de florestas plantadas aumentou (12,54 para 18,20 milhões de m<sup>3</sup>), Rosillo-Calle (2004). Especificamente no MS a área total de florestas plantadas ampliou-se de 147,8 para 810,7 mil ha entre 2006 e 2014, com áreas maiores apenas em MG (1545,7 mil ha), SP (1100 mil ha) e PR (897,7 mil ha) (AMS, 2015).

Na Figura 2, têm-se as quantidades produzidas de carvão vegetal nas microrregiões do Estado de Mato Grosso do Sul. Conforme Fig. 2, a média histórica da produção (à esquerda, 1990-2016) indica que ~50% da produção ocorre em quatro microrregiões próximas (mesma mesorregião, “Leste”), com cerca de 30% em “Três Lagoas” (e quase metade desta produção no município de Ribas do Rio Pardo - MS). O cartograma referente a 2016 (à direita) destaca as duas maiores produções em “Aquidauana” (~21%) “Três Lagoas” (~23%), ambas com proximidades geográficas às unidades siderúrgicas em operação no Estado: Simasul Siderurgia Ltda. (Aquidauana - MS), Sitrel Siderurgia (Três Lagoas - MS) e Vetorial Siderurgia (Campo Grande - MS). Em seguida, ~20% da produção ocorre em “Alto Taquari” (~15%) e “Campo Grande” (~19%), locais com indústrias de cerâmica vermelha e branca (acabamento/louça).

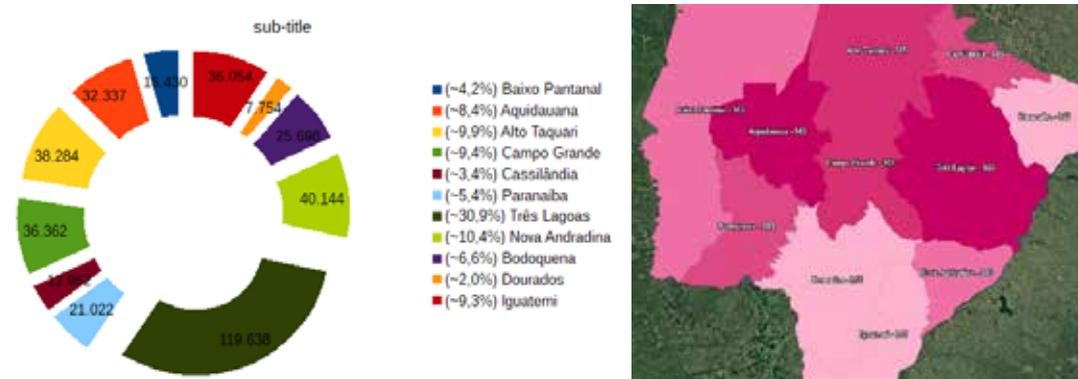


Figura 2. Produção nas microrregiões (MS), Média histórica (esquerda) e Cartograma 2016 (direita).

Na Figura 3, têm-se as quatro macrorregiões do MS com as respectivas quantidades de carvão vegetal. Atualmente a produção é razoavelmente bem equilibrada (Fig. 3A, à esquerda), possivelmente devido às demandas estabelecidas nos setores industriais de cerâmica vermelha (“Centro Norte”), Siderúrgico (“Pantanaís”, “Leste” e “Centro Norte”) e, mais recentemente do Papel e Celulose (“Leste”); exceção para pequena demanda ao “Sudoeste” (~11% em 2016). A série histórica (Fig. 3B, à direita) indica média anual da produção (1990-2016) em cerca de 194, 73, 69 e 49 mil toneladas, respectivamente; com picos de produção no período 2002-2011 (10 anos). Mais recentemente, uma significativa redução na produção é observada em todo o Estado.

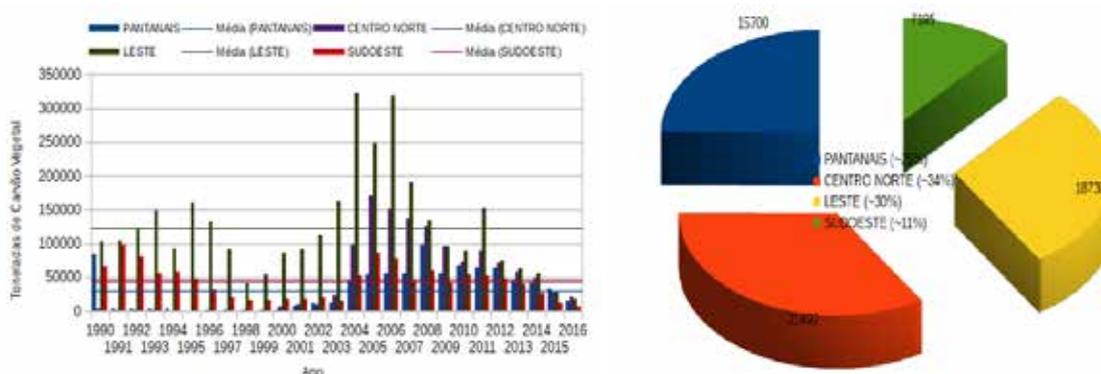


Figura 3. Produção nas macrorregiões (MS), Evolução histórica (esquerda) e Participação (2016, direita).

A Tabela 2 indica os resultados obtidos para características energéticas do carvão vegetal regional no MS, juntamente à comparação com o de outras origens vegetais. A comparação via Eq. (5) é pertinente, pois, nem sempre o PCS é apresentado nos resultados da literatura para carvão vegetal obtido de espécies de madeiras nativas, plantadas e biomassas residuais, mas usualmente estão disponíveis resultados para análise imediata ( $T_{MV}$ ,  $T_{UCZ}$  e  $T_{UCF}$ ). PCS  $\sim 20,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$  (experimental) é reduzido em comparação àquele obtido para o carvão vegetal de outras espécies vegetais nativas (do cerrado principalmente), sendo característica associada ao reduzido  $T_{CF}$ .

**Tabela 2.** Características energéticas do carvão vegetal no MS e comparações

Amostras e origem	$T_{UM,BS}$ (%)	$T_{UM,BU}$ (%)	$T_{MV}$ (%)	$T_{CZ}$ (%)	$T_{CF}$ (%)	$T_H^{(1)}$ (%)	$T_O^{(1)}$ (%)	$T_C^{(1)}$ (%)	PCS <sup>(2)</sup> (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCI <sup>(3)</sup> (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCS <sup>(4)</sup> (MJ.kg <sup>-1</sup> )
Carvão vegetal (MS)	5,3±1,9	5,0±1,7	33,0±1,3	0,9±0,4	66,1±1,4	~5,0	~3,9	~86,3	20,69	19,47	~28,51
<b>Comparação de resultados da literatura</b>											
Referências	Nome										
5 espécies do cerrado (Costa <i>et al.</i> , 2014)	-	-	18,0	2,6	79,4	Capororoca ( <i>Rapanea ferruginea</i> )	-	-	-	-	~30,86
	-	-	17,6	4,7	77,6	Guaçatonga ( <i>Casearia sylvestris</i> )	-	-	-	-	~30,15
	-	-	20,0	2,4	77,7	Pau-pólvora ( <i>Trema micrantha</i> )	-	-	-	-	~30,57
	-	-	18,1	5,2	77,2	Açoita cavalo ( <i>Luebea divaricata</i> )	-	-	-	-	~30,08
	-	-	14,4	3,3	81,0	Mutamba preta ( <i>Guazuma ulmifolia</i> )	-	-	-	-	~30,86
12 espécies do cerrado e eucalipto (Vale <i>et al.</i> , 2001; Vale, Nogueira e Silva, 1996)	-	-	27,6	2,93	69,5	Murta ( <i>Myrtus</i> )	29,49 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~28,86
	-	-	22,8	1,16	76,1	Pequi ( <i>Caryocar brasiliensis</i> Cambess.)	31,68 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,45
	-	-	24,2	0,33	75,5	Jacarandá-do-cerrado ( <i>Dalbergia miscolobium</i> Benth.)	-	-	-	-	~30,47
	-	-	23,9	1,12	74,9	Jatobá-do-cerrado ( <i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart.)	31,15 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,20
	-	-	21,8	1,92	76,2	Grão-de-galo ( <i>Pouteria ramiflora</i> (Mart.) Radlk)	31,93 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,33
	-	-	24,2	0,35	75,5	Sucupira-branca ( <i>Pterodon pubescens</i> )	31,69 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,47
	-	-	25,5	0,70	73,8	Pau-terra-folha-grande ( <i>Qualea grandiflora</i> Mart.)	30,91 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,07
	-	-	21,5	1,05	77,4	Mandiocão-do-cerrado ( <i>Schefflera morototoni</i> )	32,39 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,71
	-	-	24,4	1,16 a 1,17	74,4	Carvoeiro ( <i>Scelorobium paniculatum</i> Vog.)	-	-	-	-	~30,10
	-	-	23,3	1,80	74,9	Quina-do-cerrado ( <i>Strychnos pseudoquina</i> )	31,50 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,10
	-	-	25,2	0,64	74,1	Barbatimão ( <i>Stryphnodendron adstringens</i> )	31,79 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,13
	Cerrado/caatinga (Protásio <i>et al.</i> , 2011)	-	-	24,3	1,28	74,4	Pau-de-goma ou Gomeira ( <i>Vochysia thyrsoidea</i> )	31,39 <sup>(5)</sup>	-	-	-
-		-	21,0 (*)	0,18	77,77	Eucalipto ( <i>Eucaliptus</i> )	-	-	-	-	~30,77
Caatinga (Medeiros Neto <i>et al.</i> , 2014)	-	-	19,5 a 23,7	2,7 a 3,2	73,3 a 77,8	pau-terra ou cinzeiro ( <i>Qualea Parviflora</i> ); Pirólise a 450-850°C	29,60 a 30,92 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,49 a 31,18
	-	-	34,2	5,3	60,6	Catingueira ( <i>oincianella pyramidalis</i> )	26,14 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~26,72
Caatinga/semiárido (Paes <i>et al.</i> , 2012; Oliveira, 2006)	-	-	30,4	2,0	67,7	Pau-d'arco ( <i>Handroanthus impetiginosus</i> )	28,96 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~28,66
	-	1,03	~26,7	~1,3	~72	Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir)	28,73 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~29,61
	-	-	26,3	1,4	72,4	Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> )	28,22 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~29,69
	-	-	31,8	2,2	66,3	Jurema-vermelha ( <i>Mimosa arenosa</i> )	28,51 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~28,38
Madeira nativa (Damásio <i>et al.</i> , 2013)	-	-	29,9	3,9	66,0	Angico-vermelho ( <i>Anadenanthera colubrina</i> )	27,80 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~27,97
	-	-	23,3	2,4	74,4	Pau-jacaré ( <i>Piptadenia gonoacantha</i> )	32,30 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~29,92
Madeira nativa SC (Brand <i>et al.</i> , 2013)	-	5,5	30,5	~1,4	68,2	Jacatirão-açu ( <i>Miconia cinnamomifolia</i> )	26,22 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~28,86
Santa Catarina (Brand <i>et al.</i> , 2015)	-	7,4	32,9	2,0	65,2	Carvão vegetal para consumo doméstico (produto comercializado)	26,98 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~28,17
Nativa do Pará (Vidaurre <i>et al.</i> , 2012)	-	-	24,5	1,3	76,8 (**)	Paricá ( <i>Schizolobium amazonicum</i> ), Obs: Nativa em plantio comercial	-	-	-	-	~30,97
Floresta plantada (Botrel <i>et al.</i> , 2007)	-	-	22,9 a 28,0	0,16 a 0,34	71,7 a 76,9	Eucalipto ( <i>Eucaliptus grandis</i> ), Pirólise entre 400-500°C	-	-	-	-	~28,92 a 31,56
Floresta plantada (Muñiz <i>et al.</i> , 2014)	-	-	-	6,4 a 8,9	66,4 a 85,3	Pinus ( <i>Pinus</i> spp), Pirólise entre 500-700°C	27,68 a 29,64	-	-	-	~24,48 a 31,55
Floresta plantada (Costa, 2004)	0,7 a 2,0	-	5,5 a 34,4	0,8 a 13,6	61,2 a 92,8	Bambu ( <i>Bambusa vulgaris</i> ), Pirólise entre 400-800°C	26,74 a 34,30 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~22,39 a 38,17
Biomassa residual (Andrade <i>et al.</i> , 2004)	-	-	12,2 a 22,7	7,3 a 8,5	68,7 a 81,0	Coco-da-bahia ( <i>Cocos nucifera</i> L.), Pirólise entre 350-550°C	-	-	-	-	~27,77 a 30,48
Biomassa residual (Vilas Boas <i>et al.</i> , 2010)	-	2,9 a 3,7	7,7 a 10,5	5,0 a 6,9	82,9 a 85,9	Macaúba ou Bocaiúva ( <i>Acrocomia aculeata</i> ), Pirólise entre 450-850°C; Obs: espécie do Cerrado;	31,81 a 33,66 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~30,45 a 31,97
Biomassa residual (Vale <i>et al.</i> , 2011)	-	-	18,3 a 29,0	10,4 a 25,5	45,5 a 71,3	Pinhão manso ( <i>Jatropha curcas</i> ), Epicarpo e Torta	16,54 a 26,08 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~18,74 a 29,65
Biomassa residual (Vale e Olsen, 2013)	-	-	29,3 a 34,2	4,1 a 4,7	61,1 a 66,6	Baru ( <i>Dipteryx alata</i> ); 7,5 a 9,5 h de carbonização; Obs: espécie do Cerrado;	25,29 a 26,04 <sup>(5)</sup>	-	-	-	~26,14 a 28,85
Biomassa residual (Protásio <i>et al.</i> , 2014)	-	-	-	-	25,5 a 26,1	Babaçu ( <i>Attalea speciosa</i> ), Pirólise entre 450-850°C	28,84 a 30,19	28,07 a 29,83	-	-	N/A

<sup>1</sup>Parikh *et al.* (2007); <sup>2</sup>Experimental; <sup>3</sup>Eq. (4); <sup>4</sup>Parikh *et al.* (2005); <sup>5</sup>Conversão S.I. dos valores originais (4,184 kJ. kcal<sup>-1</sup>); (\*) Original é 2,1%; (\*\*) Original é 176,8%

Ainda na Tabela 2, o PCS  $\sim 28,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$  (estimado) demonstra que a correlação superestima o valor real para o carvão vegetal do MS; no entanto, a estimativa é bem adequada para os demais resultados da literatura em que o valor experimental para comparação é disponibilizado. Valores estimados para análise elementar são indicativos da ordem de grandeza, por exemplo da proporção C/H  $\sim 17,3$  ( $T_H \sim 5,0\%$ ,  $T_O \sim 3,9\%$  e  $T_C \sim 86,3\%$ ), possivelmente devido à H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> como material volátil (SÁNCHEZ, 2010), estes correspondem a valores elevados para H, e reduzidos para O; e alguma influência do  $T_{CZ} \sim 0,9\%$ , que é ligeiramente fora da faixa de validação das correlações para análise elementar ( $1,5\% \leq T_{CZ} \leq 14,1\%$ , Yi *et al.*, 2017). Em comparação ao carvão vegetal comercializado para uso doméstico (ROSA *et al.*, 2012; PAULA; TRUGILHO; REZENDE, 2009), tipicamente originado de floresta plantada (Eucalipto), tem-se:  $2,3\% < T_H < 3,4\%$ ;  $11,6\% < T_O < 17,0\%$ ;  $75,0\% < T_C < 85,6\%$ ;  $23,9 < C/H < 37,2$ .

Quanto ao  $T_{CZ}$  ( $\sim 0,9\%$ ) são valores adequados para carvão vegetal, cujos valores médios da literatura são entre 1-3% (CETEC, 1982). Isto indica que a partir das matérias-primas utilizadas - madeiras nativas obtidas no MS – é possível obter carvão vegetal com pouco material inorgânico (composição típica das cinzas). Também significa que restam poucos resíduos não aproveitáveis pela combustão, o que, em suas aplicações, pode implicar em manutenção reduzida de caldeiras e equipamentos térmicos, consequentemente aumentando a eficiência do processo (LAGEMANN, 2016; GARCIA, 2013).

$T_{MV} \sim 33\%$  e  $T_{CF} \sim 66\%$  estão na faixa de valores da literatura (ROSA *et al.*, 2012), respectivamente entre 18-37% e 65-83%.  $T_{MV}$  é especialmente importante em processos de gaseificação, pois permite determinar o máximo rendimento teórico; para produzir um combustível gasoso, expõe-se o combustível sólido a altas temperaturas e oxigênio limitado. Material volátil é uma mistura de gases (ex: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>), e após a queima destes, obtêm-se subprodutos menos agressivos ao meio ambiente.

1094

O  $T_{CF}$  indica que a madeira utilizada (matéria-prima nativa no Estado de Mato Grosso do Sul) teve processo de carbonização entre 200-400°C; características típicas de produção destinada ao uso doméstico (e não industrial), em que o carvão vegetal deve ser facilmente inflamável, emitir pouca fumaça e não ser muito duro (COELHO *et al.*, 2008). A faixa de temperaturas 200-400°C corresponde à maior razão entre a quantidade de energia fornecida (do processo ao produto) e obtida do produto (após combustão completa) (WENZL, 1970). Quanto maior a temperatura do processo típico de pirólise “lenta” (carbonização ou carvoejamento), maior será o  $T_{CF}$  no carvão vegetal e menores valores para  $T_{MV}$  e  $T_{CZ}$ , este último sob menor influência da temperatura do processo. A pirólise é a decomposição térmica que ocorre tipicamente entre 280-450°C, resultando nos produtos: carvão vegetal (sólido), líquido condensado (alcatrão e ácidos) e gases não condensáveis (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>), (SÁNCHEZ, 2010).

Vale, Dias e Santana (2010) destacam cinco espécies nativas do cerrado para fins de produção de carvão vegetal, em função do rendimento gravimétrico (24,9 a 28,7%): jacarandá do cerrado (*Dalbergia miscolobium*), sucupira branca (*Pterodon pubescens*), carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum*), barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) e gomeira ou pau-de-goma (*Vochysia thyrsoidea*). Outras 47 espécies do cerrado tiveram suas características energéticas avaliadas (madeira e casca), porém não quanto ao carvão vegetal correspondente, Vale, Brasil e Leão (2002). Na caatinga, oito espécies nativas são as principais (JOHNSON, 1985): jurema-preta (*Mimosa hostilis*), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*), angico (*Anadenanthera colubrina*), jucá (*Caesalpinia ferrea*), mororó (*Bauhinia forficata*), pereiro (*Aspidospema pyriformium*), craibeira (*Tabebuia aurea*), jacatirão-açu (*Miconia cinnamomifolia*) e licurana (*Hyeronyma alchorneoides*).

Para a produção de carvão vegetal de florestas plantadas (tipicamente eucalipto ou pinus), a faixa de temperaturas entre 300-450°C é a considerada ótima para o processo, de maneira a garantir a qualidade ( $T_{CF}$  principalmente, e demais propriedades energéticas) e quantidade (rendimento gravimétrico) do produto final. Quanto menor a taxa de aquecimento e menor a temperatura, maior é o rendimento gravimétrico do eucalipto ( $\sim 30\%$  em 400°C) em

condições controladas de laboratório e/ou fornos de alvenaria (PINHEIRO; FIGUEIREDO; SEYE, 2005); cabe ressaltar que em fornos industriais, a taxa de aquecimento depende da temperatura interna destes fornos, algo de controle complexo uma vez iniciado o processo.

#### 4 CONCLUSÕES

- O Estado de Mato Grosso do Sul, historicamente, tem a segunda maior quantidade produzida do país (~19% ou ~258 mil toneladas, 2007-2016), e está entre os quatro maiores Estados produtores do Brasil, representativo na economia regional/nacional;
- As duas microrregiões são referência na produção estadual, “Aquidauana” (~21% em 2016) e “Três Lagoas” (~23% em 2016), com os municípios de Aquidauana e Ribas do Rio Pardo responsáveis por ~59% e ~47% das quantidades nestas microrregiões, respectivamente;
- Os picos na produção de carvão vegetal ocorreram entre 2003-2007 com quantidades bem acima da média histórica, e distribuição geográfica da produção atual é equilibrada (2016) em três das quatro mesorregiões, Centro-Norte (~34%), Leste (~30%) e Pantanais (~25%);
- O carvão vegetal produzido no MS atende parâmetros mínimos de qualidade (São Paulo, 2015) para  $T_{CZ}$  ~0,9% (<1,5%) e  $T_{UM,BU}$  ~5% (<5%); não atende  $T_{MV}$  ~33% (<23,5%, ou  $100-T_{CF}-T_{CZ}$ ) e  $T_{CF}$  ~66% (>73%, ou >75% Rosillo-Calle e Bezzon, 2005);
- PCS ~20,7 MJ.kg<sup>-1</sup> corresponde a valores abaixo daqueles referentes a diversas espécies florestais nativas brasileiras, inclusive algumas madeiras do cerrado (Tabela 2), característica associada ao reduzido  $T_{CF}$ ; análise elementar estima  $T_H$  ~5,0%,  $T_O$  ~3,9% e  $T_C$  ~86,3%), correspondem a valores elevados para H e C, e reduzidos para O, com C/H ~17,3;
- Há potencial significativo para melhorar a qualidade ( $\uparrow T_{CF}$  e  $\downarrow T_{MV}$ ) e aumentar a quantidade (rendimento gravimétrico, %) do carvão vegetal produzido no MS, por meio de monitoramento e controle da temperatura de pirólise e/ou adequação de projeto e operação dos fornos de alvenaria atualmente utilizados.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À FINEP, projeto de pesquisa “*BIOCOMB – Aplicação do Biocombustível no Ensino de Engenharia e Ensino Médio*”, denominada MCT/FINEP/CT-PETRO PROMOPETRO 02/2009 e bolsa ITI-A via CAPES/CNPq. Ao SINDICARV-MS, pelas amostras de carvão vegetal e à UNICAMP/ FEM - Faculdade de Engenharia Mecânica (Bomba Calorimétrica a volume constante, Profa. Ará A. B. Pécora), Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental). Aos alunos de graduação em Engenharia de Energia que participaram das etapas iniciais do trabalho.

#### REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6922**: Carvão vegetal: determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro: ABNT, 1981, 2p. (ABNT/CB-028 Siderurgia).

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 6923**: Carvão vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro: ABNT, 1981, 15p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 7402**: Carvão vegetal: determinação granulométrica. 1982, 3p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 8112**. Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986, 5p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 8631**. Carvão mineral: análise elementar: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a, 12p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 8633**. Carvão vegetal: determinação do PCS. Rio de Janeiro: ABNT, 1984B, 13p.

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **Florestas Plantadas 2015**: um caminho para o desenvolvimento sustentável. Disponível em: <http://silviminas.com.br/presentation-2015-portugues/>. Acesso em: 19 jan. 2018.

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRES, G. B.; ROCHA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Coccos nucifera Linn*) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 707-714, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-6762200400050001>

ÁRVORES do brasil. Disponível em: <http://www.arvoresbrasil.com.br>. Acesso em: 10 jan. 2018.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D1102-84** – Standard test method for ash in wood. 1984 (reapproved 2007); **E1755-01** – Standard test method for ash in biomass. 2001 (reapproved 2007); **E872-82** – Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. 1982 (reapproved 2006).

1096 BALDUINO JR., A. L.; BALDUÍNO, T. Y.; FRIERERICHS, G.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 11, p. 1963-1968, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160233>

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro, Brasil: Interciência. 2010, 131p.

BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; BREHMER, D. R.; KÜSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99 p. 401-410, 2013. Doi: 10.4336/2013.pbf.33.75.505.

BRAND, M. A.; RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000600020>.

BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de Bambu. **IPEF**, n. 36, p. 13-17, 1987.

BOTREL, M. C. G.; TRIGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

CARVALHO, A. F.; BRAND, M. A.; NONES, D. L.; DE MARCO, F. T.; FRIEDERICHS, G.; WEISE, S. M. K. Propriedades físicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal da espécie *Hyeronyma alchorneoides*. **Pesq. Flor. Bras.**, v. 34, n. 79, p. 257-261, 2014.

COELHO, S. T. *et al.* **Carvão Vegetal**: aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos. São Paulo: IEE-USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia); CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa), 2008. (Nota técnica X)

- ORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. 733p.
- COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard. como carvão vegetal**. 2004. 74f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, SP, 2004.
- COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.
- DAMÁSIO, R. A. P.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOSO, M. T.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L. M. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesq. flor. bras.**, v. 33, n. 75 p. 261-267, 2013. Doi: 10.4336/2013.pbf.33.75.505
- GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 358p.
- HEIMANN, J. P.; DRESCH, A. R.; ALMEIDA, A. N. Demanda dos Estados Unidos por carvão vegetal brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 437-445, 2015.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/mato-grosso-do-sul>. Acesso em: 05 jan. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm](https://home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm). Acesso em: 15 dez. 2020.
- JOHNSON, D. V. Relatório sobre o manejo da caatinga, semi-árido do Nordeste brasileiro. In: **Projeto PNUD/FAO/BRA/85/007**. Natal (RN), 1985. (Circular técnica, 3).
- LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleo & gás combustível**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2013. 282p.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 4. ed. Nova Odesa, SP: Plantarum, 2016. 368p. v.2
- MEDEIROS NETO, P. N.; PAEN, J. B. Relação entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da Caatinga. **Floresta e ambiente**, v. 21, n. 4, p. 484-493, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.
- MICHELS, I. E.; YNAGUITA, E. (org.). **Minero-Siderurgia**. Campo Grande, MS: Ed. UFMS, 2004. 167p. (Cadeias produtivas de Mato Grosso do Sul, 7).
- MORELLO, T. F. **Carvão vegetal e siderurgia: de elo perdido a solução para um mundo pós-Kyoto**. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (Part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.
- MUÑIZ, G. I. B.; LENGOWSKI, E. C.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E. OLIVEIRA, V. T.; HANSEL, F. Characterization of *Pinus* spp needles and evaluation of their potential use for energy. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 245-250, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760.201420021358>
- OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. B. GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. *In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Carvão vegetal: destilação, propriedades e controle de qualidade.* Belo Horizonte, MG: CETEC, 1982. p. 39-61. (Série de publicações técnicas, 6).

OLIVEIRA, M. Carvão vegetal sustentável. *Rev. Pesquisa FAPESP*, n. 189, p. 72-75, 2011. Disponível em: [revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/11/072-075-189.pdf](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/11/072-075-189.pdf). Acesso em: 15 dez. 2019.

PAES, J.B.; LIMA, C. R.; OLIVEIRA, E.; SANTOS, H. C. M. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. *Ciência da madeira*, v. 3, n. 1, p.1-10, 2012.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N. Avaliação de uma amostra de carvão vegetal de *Eucalyptus* para uso doméstico comercializado em Lavras/MG. *Remade*, v. 67, p. 15-18, 2009.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, v. 84, p. 487-494, 2005.

PINHEIRO, P. C. C.; FIQUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

PELLICO NETTO, S.; OLIVEIRA FILHO, L. C. Avaliação da biomassa de savana (Cerrado) para produção de carvão vegetal. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 686-689, 1983.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JR., J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. *Pesq. flor. bras.*, v. 31, n. 68 p. 295-307, 2011. Doi: 10.4336/2011.pbf.31.68.295

1098

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; SILVA, M. G.; COUTO, A. M. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. *Pesq. agropec. bras.*, v. 49, n. 3, p. 189-196, 2014. Doi: 10.1590/S0100-204X2014000300005

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M. (org.). **Combustão e gaseificação de biomassa sólida** (soluções energéticas para a Amazônia). Brasília: MME, 2008. 192p.

ROSA, R. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; ANDRADE, W. S. P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

ROSILLO-CALLE, F. A brief account of Brazil's biomass energy potential. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 3, p. 225-236, 2004.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. *In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.* Campinas, SP: Ed. da UNICAMP, 2008.

SÁNCHEZ, C. G. (org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa.** Campinas, SP: Átomo, 2010. 430p.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. Resolução SAA – 40, de 14 de dezembro de 2015.

SINDICARV – Sindicato das indústrias e dos produtores de carvão vegetal no estado de Mato Grosso do Sul. Disponível em: <http://www.sindicarv.com.br/carvao-vegetal/sustentabilidade>. Acesso em: 20 set. 2014.

- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril L.*). **Scientia Agraria**, v.2, n.1 p.1-8, 2001. Doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>
- UZUN, H.; YILDIZ, Z.; GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Improved prediction of higher heating value of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis. **Bioresource Technology**, v. 234, p. 122-130. 2017.
- VALE, A. T.; OLSEN, L. B. Produção de carvão vegetal de casca de Baru (*Dipteryx alata*) utilizando células de carbonização. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 117-124, 2013.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. D. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.
- VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, v. 25, n. 1, p. 89-95, 2001. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RXWaAAAAIAAJ>
- VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. V. P.; SILVA, M. A. Rendimento da carbonização e qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 20, n. 1, p. 93-99, 1996. <https://books.google.com.br/books?id=RXWaAAAAIAAJ>
- VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C.; VALLE, M. L. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.
- 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**, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010. Doi: 10.4336/2013.pbf.33.75.505
- VETORIAL SIDERURGIA. Disponível em: <http://www.vetorial.ind.br/pt/negocios/siderurgi>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- VOTORANTIM SIDERURGIA. Disponível em: <http://www.vsiderurgia.com.br/pt-br/institucional/unidades/sitrel/Paginas/Sitrel.aspx>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- WENZL, H. F. J. The chemical technology of wood. New York: Academic Press, 1970. 692p.
- YI, L.; FENG, J.; QIN, Y. H.; LI, W. Y. Prediction of elemental composition of coal using proximate analysis. **Fuel**, v. 193, p. 315-321, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.044>