

Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos

Adding value to agro-industrial waste for energy purposes

Aline Faleiro Dionizio¹, Ailton Teixeira do Vale^{1,*}, Alessandro César de Oliveira Moreira², Luiz Gustavo Oliveira Galvão², Bruno Sant'Anna Chaves² e Mírian de Almeida Costa¹

¹Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, Brasil

²Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, SCEN trecho 2, bl. H - Brasília - DF CEP : 70.818-900, Brasília-DF, Brasil

(*E-mail: ailton.vale@gmail.com)

<https://doi.org/10.19084/rca.15129>

Recebido/received: 2018.10.01

Aceite/accepted: 2019.01.08

RESUMO

Este estudo teve por objetivo avaliar o potencial energético da matéria-prima residual produzida na colheita ou processamento de culturas agrícolas e florestais, *in natura* e carbonizada. O experimento resultou em um delineamento inteiramente casualizado, sendo cinco tratamentos: casca de café (*Coffea arabica* L.); palha de feijão (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Carioca); descartes de madeira de construção civil e de madeireira, na forma de serragem; e sabugo de milho (*Zea mays* L.) e três repetições. As propriedades avaliadas foram: granulometria, densidade do granel, análise elementar, análise imediata, poder calorífico e densidade energética. Ao final do estudo pôde-se concluir que a casca de café apresenta melhores propriedades para uso em combustão direta dentre os resíduos *in natura* estudados, enquanto que o carvão de resíduos de madeira apresentou as melhores propriedades energéticas dentre os resíduos carbonizados.

Palavras-chave: biomassa, combustão, carbonização.

ABSTRACT

This work aimed to characterize and evaluate the potential energy production of both raw and carbonized residues from harvest and product processing of agriculture and forest crops. The experiment resulted in a completely randomized design with five treatments and three replicates. The evaluated properties were: granulometry, bulk density, elemental analysis, immediate analysis, calorific value and energy density. The data were submitted to analysis of variance and means were compared using the Tukey test at 5% significance. In conclusion, the *in natura* coffee bark presented the best properties for use in direct combustion, while wood residues charcoal presented better properties for energetic purposes among carbonized residues in study.

Keywords: biomass, combustion, carbonization.

INTRODUÇÃO

A biomassa é formada a partir de espécies vivas e, por isto, é capaz de se reproduzir, sendo considerada renovável, o que a torna altamente atrativa como fonte de energia (Basu, 2010), incluindo os resíduos de seu processamento. Estes resíduos de biomassa no processo de combustão geram calor, que pode ser utilizado diretamente na secagem

ou indiretamente na produção de vapor, usados nos processos produtivos, como calor de processo, na produção de energia elétrica ou ainda como energia mecânica.

Dentre outras possibilidades de uso dos resíduos de biomassa no Brasil destaca-se a carbonização, um processo de concentração de carbono onde o

país é o maior produtor, com 5,2 milhões de toneladas produzidas em 2017 (EPE, 2018). A biomassa mais utilizada atualmente para produção de carvão vegetal é a lenha, entretanto outras fontes de matéria-prima podem ser utilizadas, como os resíduos agrícolas e florestais. As projeções de safra de grãos no Brasil para 2018 indicam para o feijão e o milho, produção de 3.398 e 89.208 mil toneladas, respectivamente e para o café 58.000.000 de sacas (Brasil, 2018). Desta forma tem-se a possibilidade de agregar valor aos resíduos destas culturas, que normalmente são descartados, a partir da concentração de carbono e consequentemente aumento do poder calorífico.

Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial energético de matérias-primas residuais produzidas na colheita ou processamento de culturas agrícolas e florestais, na forma *in natura* e carbonizada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos de biomassa utilizados foram: casca de café (*Coffea arabica* L.); palha de feijão (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Carioca); descartes de madeira de construção civil e de madeira, na forma de serragem; e sabugo de milho (*Zea mays* L.), obtido em indústrias de processamento na cidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.

O trabalho foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia Florestal da UnB (EFL/UnB) em parceria com o Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB).

A análise granulométrica foi baseada na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) com adaptações, utilizando-se cerca de 100 g de cada amostra com umidade nas condições de coleta. Foram utilizadas peneiras da série TYLER com os seguintes diâmetros de abertura: 16, 8, 4, 2, 1 e 0,5 mm.

A densidade a granel nas condições de coleta foi determinada conforme a NBR 6922 (ABNT, 1983), o teor de umidade foi determinado com base na norma NBR 7190 (ABNT, 1997) e a análise imediata foi feita de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana.

A determinação do teor de extrativos seguiu a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), e para a determinação dos teores de cinzas das amostras, foi utilizada a norma TAPPI T211 om-93 (TAPPI, 1993). Para realizar as operações de isolamento de lignina ácida (Lignina Klason), as amostras foram submetidas à limpeza com etanol e posteriormente com água quente, além de limpeza inicial com etanol:tolueno, conforme norma TAPPI 204 om-88. Para determinar os teores de lignina insolúvel e lignina solúvel, foram adotados os procedimentos laboratoriais LAP #003 (Templeton & Ehrman, 1995a) e LAP #004 (Templeton & Ehrman, 1995b) respectivamente, do National Renewable Energy Laboratory – NREL. O teor de holocelulose (TH) foi calculado por diferença, onde se subtraiu de 100% os teores percentuais de lignina total (Li_{tot}), de cinzas (Cz_n) e de extrativos (Ext).

A análise elementar foi realizada no Laboratório da Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília. Por esta análise determinou-se o teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e, por diferença, o teor de oxigênio. O computador acoplado ao equipamento da marca Perkin Elmer® modelo EA 2400 Series II fez o cálculo desta integração e forneceu os valores dos elementos em porcentagem.

O poder calorífico superior das amostras foi determinado em bomba calorimétrica marca PARR 6400 Calorimeter, por meio da metodologia estabelecida na norma NBR 8633 (ABNT, 1984). O poder calorífico útil (PCU), na umidade atual, foi determinado pela equação 1:

$$PCU = PCI (1 - U) - 600U \text{ (Equação 1)}$$

onde: U = umidade (%); PCI = poder calorífico inferior a 0% de umidade (kcal/kg)

Sendo:

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9 * H}{100} \right)$$

Onde: PCS = poder calorífico superior (kcal/kg); H = teor de hidrogênio (%)

O valor de densidade energética foi calculado para a biomassa *in natura* pela equação 2 e para a biomassa carbonizada pela equação 3:

$$De = PCU * Dg \text{ (Equação 2)}$$

$$De = PCS * Dg \text{ (Equação 3)}$$

Onde: De = densidade energética (kcal/m³), PCU = poder calorífico útil (kcal/kg), PCS = poder calorífico superior (kcal/kg), Dg = densidade do granel (kg/m³)

Cada carbonização foi realizada em um reator tipo retorta elétrica, conforme Protásio *et al.* (2011) e rotina do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, com temperatura final de 450°C, tempo de patamar de 150 minutos e taxa de aquecimento de 1,5°C/min; com três repetições e amostras com aproximadamente 1,5 kg de material nas condições de coleta. O rendimento em carvão vegetal foi determinado conforme equação 4:

$$RGC = \frac{m_c}{m_s} * 100 \text{ (Equação 4)}$$

Onde: RGC = rendimento em carvão (%); m_c = massa de carvão seco a 0% de umidade; m_s = massa da biomassa seca a 0% de umidade.

Todas as análises realizadas para os resíduos na forma *in natura* foram realizados também para os carvões produzidos, exceto a análise química para determinação de extrativos, lignina e holocelulose

A comparação entre tratamentos para as variáveis analisadas foi feita com auxílio da análise de variância (ANOVA) e teste de Tuckey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da biomassa “*in natura*”

Na Figura 1 estão os resultados da distribuição granulométrica dos resíduos, onde observa-se a relação entre a abertura da malha das peneiras (mm) e a porcentagem de retenção (%).

A casca de café apresentou maior retenção na malha de 2,00 mm, com 59,52%, devido ao fato do resíduo ser constituído de partículas com maior uniformidade. Por outro lado, por ser constituída de partículas heterogêneas provenientes de folhas, haste e vagem, a palha de feijão apresentou retenção dispersa em todas as malhas.

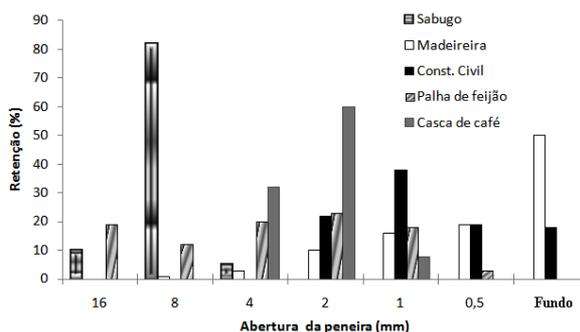


Figura 1 - Classificação granulométrica de resíduos agroindustriais na condição *in natura*.

Os resíduos madeiros de construção civil e serraria foram os que apresentaram menor granulometria, com destaque para os resíduos de serraria, que apresentou retenção de 51,49% na malha abaixo de 0,50 mm. O resíduo proveniente da construção civil é uma serragem mais grossa originária do corte em serra circular. Os resíduos de madeira apresentam em sua composição, além de uma serragem grossa, pó do processo de trabalhabilidade da madeira com lixa, justificando a baixa granulometria.

O sabugo de milho apresentou partículas de maiores dimensões em comparação aos demais resíduos, com retenção de 82,29% na malha de 8,00 mm.

Estes resíduos foram submetidos a ensaios físicos, químicos e à análise imediata, sendo os valores médios da densidade do granel (Dg), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF), extrativos (EXT), lignina total (LTot) e holocelulose (TH) apresentados no Quadro 1.

A umidade do material é um índice primordial quando se avalia biomassas como fonte de bioenergia, pois, quanto maior a quantidade de água presente no combustível, menor será o seu valor calórico. Observou-se que, em média, os resíduos *in natura* apresentaram 10,20% de umidade na base seca, sendo 8,53% para sabugo de milho, 8,63% para palha de feijão, 8,85% para descarte de construção civil, 12,04% para descarte de madeira e 12,93% para casca de café. O teor de umidade ideal para a combustão da lenha é de até 25% (Farinhaque, 1981; Taylor, 2017). Logo, os resíduos agroindustriais

Quadro 1 - Densidade do granel, análise imediata e composição química de resíduos agroflorestais na condição *in natura*

Resíduos	Dg (kg/m ³)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	EXT (%)	LTot (%)	TH (%)
CA	389,26a	71,67d	7,69a	20,63a	24,36a	18,78b	53,64e
	(1,73)	(0,57)	(1,48)	(1,44)	(12,62)	(3,42)	(3,97)
FE	77,28e	82,31a	8,70a	8,99c	5,58cd	21,74b	70,17 b
	(2,27)	(0,16)	(2,43)	(3,55)	(15,75)	(2,06)	(0,55)
CC	174,14c	80,06b	2,45c	17,51b	3,12d	31,00a	64,31c
	(1,15)	(0,76)	(19,32)	(1,66)	(6,21)	(1,70)	(0,87)
MM	197,28b	81,52a	0,69d	17,79b	7,60bc	33,89a	57,79d
	(3,21)	(0,38)	(3,85)	(1,67)	(2,49)	(6,91)	(3,93)
SB	146,91d	78,82c	3,81b	17,37b	9,75b	14,65c	74,37a
	(2,90)	(0,56)	(21,05)	(2,10)	(5,37)	(3,01)	(0,53)

Obs: Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC: descarte de construção civil. MM: descarte de madeira. SB: sabugo de milho.

analisados apresentaram valores considerados viáveis para processos envolvendo a queima do material, sem a necessidade de secagem.

A densidade do granel diferiu significativamente entre os tratamentos, tendo a casca de café apresentado o maior valor, chegando a ser de 2 a 5 vezes superior ao valor da densidade do granel encontrado nos outros resíduos, independente do teor de umidade. Este elevado valor pode ser explicado pelas características específicas do material como massa, tamanho, forma e homogeneidade das partículas, o que favorece uma melhor acomodação implicando em maior quantidade de material por unidade volumétrica. As características da palha de feijão, de maneira oposta, promovem um aumento nos espaços vazios e menor quantidade de material por unidade volumétrica.

Protásio *et al.* (2011) e Vale *et al.* (2007) trabalharam com o resíduo seco de *Coffea arabica* L., e encontraram 237 e 144 kg/m³, respectivamente. Protásio *et al.* (2011) afirmaram que para resíduos lignocelulósicos é desejável maiores valores de densidade a granel, pois fatores como os custos com o transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica das energias renováveis.

A densidade a granel dos resíduos na forma de serragem de madeira, tanto de construção civil quanto madeira, estão de acordo com os resultados encontrados por Pinheiro *et al.* (2005), com valores

na faixa de 150 kg/m³ (madeiras leves) a 250 kg/m³ (madeiras pesadas).

Quanto à análise imediata, os maiores valores médios relacionados à presença de materiais voláteis foram observados nos resíduos de palha de feijão e madeira, sendo 82,31 e 81,52% respectivamente, os quais não apresentaram diferença estatística entre si. Materiais voláteis são gases que se desprendem do material combustível durante a queima da biomassa. Sua produção em grande quantidade é um indicativo de maior velocidade de perda de massa.

Os teores de cinzas não diferiram entre si para os resíduos de casca de café e palha de feijão, que apresentaram os maiores valores. Os altos teores de cinzas observados principalmente nos resíduos de origem agrícola podem estar relacionados com a adubação das culturas. Os resíduos de madeira apresentaram os menores teores de cinzas, no entanto houve diferença significativa entre os resíduos madeira e de construção civil, possivelmente por contaminação destes com areia e cimento.

Segundo Vale *et al.* (2007), os elevados teores de cinzas estão relacionados com a presença de quantidades e de qualidades diferentes de minerais presentes na biomassa, tais como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio, entre outros. Segundo Vamvuka *et al.* (2014), estes elementos

podem formar nas superfícies de troca térmica dos geradores de vapor severas deposições que geram escórias, podendo levar ao mau funcionamento e reduzindo a eficiência da transferência de calor.

A casca de café apresentou o teor de carbono fixo estatisticamente superior aos demais, ao contrário dos resíduos de construção civil, madeira e o sabugo de milho, que apresentaram teores de carbono fixo que não diferiram estatisticamente entre si. Segundo Brito & Barrichelo (1980) e Jenkis *et al.* (1998), combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, o que é vantajoso, devido ao maior tempo dentro das câmaras de combustão em comparação com outros combustíveis que têm menor teor de carbono fixo.

Valores semelhantes de materiais voláteis e carbono fixo nos resíduos de construção civil e madeiros foram encontrados por Cieslinski *et al.* (2015), que, estudando a emissão e controle dos gases e particulados provenientes da queima da biomassa, encontraram 73,6 e 19,9% respectivamente.

Paula *et al.* (2011), analisando a produção e qualidade de briquetes de resíduos lignocelulósicos, encontraram valores de teor de voláteis e carbono fixo em vagens de feijão de 76,65 e 18,10% respectivamente, e 77,53 e 18,75% em caules de feijão. O elevado teor de cinzas e de material volátil contribuiu para este baixo valor de carbono fixo, ainda mais associado ao fato de que a coleta foi feita no campo em terreno de chão batido, que pode ter contaminado a amostra.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo obtidos dos resíduos madeiros estão dentro de intervalo aceitável e os valores encontrados na análise imediata do sabugo neste trabalho são similares aos encontrados por Paula *et al.* (2011).

Ao analisar a composição química dos resíduos (Quadro 1), observa-se alto teor de lignina nos resíduos madeiros e alto teor de extrativos presentes na casca de café, características importantes para o uso energético, uma vez que ambos exercem grande influência no poder calorífico superior.

O teor de holocelulose observado nos diferentes resíduos variou de 53,64% a 74,37%, e como era esperado, os maiores valores foram observados nos

resíduos de sabugo de milho e de palha de feijão, exatamente aqueles que apresentaram menores valores de teor de lignina, visto que se trata de uma relação inversa.

No Quadro 2 encontram-se os resultados obtidos na análise elementar dos resíduos *in natura*, carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O).

Quadro 2 - Análise elementar de resíduos agroflorestais na condição *in natura*

Resíduos	C (%)	H (%)	N (%)	O* (%)
CA	42,33	5,34	1,66	50,67
FE	40,65	5,34	1,90	52,03
CC	45,98	5,49	0,22	48,31
MM	48,54	5,68	0,26	45,52
SB	40,49	6,03	1,42	52,06

(*) Obtido por diferença. CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC: madeira de construção civil. MM: madeira de madeireira. SB: sabugo de milho.

Segundo Vale *et al.* (2010) espera-se, para os materiais que têm maiores teores de carbono e hidrogênio, maior capacidade térmica em função da maior energia liberada por esses elementos na reação de combustão. Esta tendência pôde ser observada nos resíduos madeiros, os quais mostraram os maiores valores médios de carbono e hidrogênio e, conseqüentemente, apresentaram maior poder calorífico superior (Quadro 3).

Devido a pouca variação da composição elementar da madeira pode-se admitir valores em torno de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio em base seca, sem considerar traços de outros elementos. Independente de diferenças genéticas ou da idade, essa composição mantém-se aproximadamente constante, como pôde ser observado neste estudo dos resíduos madeiros.

Os maiores teores de oxigênio foram obtidos nos resíduos de feijão e de sabugo de milho e o menor valor da porcentagem desse elemento foi observado na madeira de construção civil. A presença de oxigênio na biomassa oferece a desvantagem de diminuir o seu valor como combustível.

Quanto aos teores de nitrogênio, Munalula & Meincken (2009), mencionam que altos teores podem estar relacionados aos impactos ambientais e poluição do ar, em função da formação de óxidos de nitrogênio tóxicos e ácido nítrico.

No Quadro 3 encontram-se os valores médios de poder calorífico superior (PCS), de poder calorífico útil (PCU) e de densidade energética (DE).

Quadro 3 - Poder calorífico e densidade energética de resíduos agroflorestais na condição *in natura*

Resíduos	PCS (kcal/kg)	PCU (kcal/kg)	DE (Mcal/m ³)
CA	4.369c (0,60)	3.471c (1,68)	1.351a (0,04)
FE	4.134d (0,92)	3.462c (0,73)	259e (2,82)
CC	4.612b (0,99)	3.881a (0,24)	675c (3,30)
MM	4.801a (0,93)	3.881a (0,98)	765b (3,30)
SB	4.317c (0,93)	3.600b (1,76)	528d (1,43)

Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC:

Os resíduos de madeira apresentaram os maiores valores de poder calorífico útil, contudo, a casca de café apresentou densidade energética quase duas vezes maior, ainda que apresente um baixo poder calorífico útil. Isto foi devido à maior densidade do granel da casca de café indicando que, para uma mesma umidade, a influência da densidade do granel é maior que a influência do poder calorífico, conforme resultados encontrados por Vale *et al.* (2017).

Com exceção da casca de café, as biomassas apresentaram baixa densidade energética, tal como observado por Protásio *et al.* (2011), que trabalharam com a compactação de biomassa vegetal visando a produção de biocombustíveis sólidos.

Vale *et al.* (2007) estudaram a carbonização de resíduos do processamento do café, e encontraram o

valor de poder calorífico superior de 3.933 kcal/kg e poder calorífico útil de 3.040 kcal/kg na casca, com 13,5% de umidade; Protásio *et al.* (2011) encontraram, para o mesmo resíduo, poder calorífico superior de 4.403,33 kcal/kg.

A palha de feijão apresentou o menor valor de poder calorífico, que associado à baixa densidade do granel, resultou na menor densidade energética obtida. Valores semelhantes de poder calorífico superior foram encontrados por Paula *et al.* (2011) em caules e vagens de feijão: 4488,74 e 4218,53 kcal/kg, respectivamente. O poder calorífico superior dos resíduos madeireiros se encaixa nos intervalos sugeridos por Brito & Barrichello (1980), entre 4000 a 4800 kcal/kg.

Densidade sólida e do granel, poder calorífico, análise imediata, análise elementar são características importantes que devem ser consideradas na escolha ou na indicação da biomassa como combustível. No entanto deve-se tomar cuidado quanto ao uso destas variáveis, uma vez que pode-se incorrer em erros quando se considera apenas uma delas como parâmetro de decisão e, neste caso, talvez a sugestão seja o uso da densidade energética, uma propriedade que engloba tanto o aspecto químico da biomassa a partir do poder calorífico, quanto o aspecto físico a partir da densidade. Dentro deste contexto e analisando o Quadro 3 observa-se com destaque a casca de café, que apesar de apresentar um dos menores poder calorífico tem a maior densidade energética, seguida pelo resíduo de madeiras, sabugo e palha de feijão.

Caracterização das propriedades do carvão

A Figura 2 representa o comportamento da carbonização dos resíduos ao longo do tempo. Arruda *et al.* (2011) ressaltaram que a determinação da temperatura interna do forno permite a obtenção do perfil térmico da carbonização e do resfriamento condizentes com os fenômenos que realmente ocorrem. Essas informações são utilizadas para o melhor controle dos processos, resultando em maior rendimento gravimétrico da carbonização e melhoria da qualidade do carvão vegetal.

Observam-se na Figura 2 três fases distintas durante a carbonização: a primeira fase é

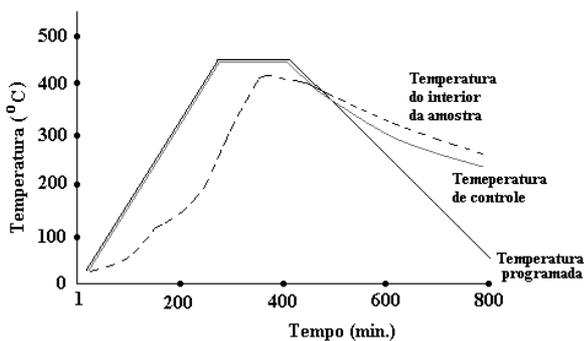


Figura 2 - Perfil térmico da carbonização de resíduos agroflorestais.

caracterizada pelo aquecimento e secagem da carga, onde a temperatura máxima pode variar de 110 a 150°C; na segunda fase, a variação de temperatura compreende a faixa de 150 a 450°C e ocorre o processo de carbonização, e na terceira fase, a redução da temperatura interna do forno indica o fim da carbonização e o início do processo de resfriamento do forno.

Quanto maior o teor de umidade, mais lenta é a carbonização devido ao excesso de vapor de água liberado e isto foi observado no presente trabalho uma vez que o teor de umidade dos resíduos

submetidos à carbonização variou de 8,63% para palha de feijão até 12,93% para a casca de café.

No Quadro 4 encontram-se os valores médios para o rendimento gravimétrico do carvão (RGC), densidade do granel (DG), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DE) do carvão vegetal de resíduos agroindustriais.

As espécies apresentaram diferenças significativas do rendimento gravimétrico do carvão vegetal, onde os resíduos de casca de café e de madeira apresentaram o maior e o menor valor, 41,04 e 38,53%, respectivamente.

Sater *et al.* (2011) realizaram um estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais, visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. Os autores concluíram que os carvões vegetais derivados dos resíduos produzidos no beneficiamento de grãos de café e no processo de fresamento da madeira apresentaram potencial considerável para serem utilizados como insumo energético.

Vale *et al.* (2007) investigaram a caracterização energética e o rendimento da carbonização de resíduos

Quadro 4 - Rendimento gravimétrico da carbonização; análise imediata, poder calorífico e densidade energética do carvão vegetal de resíduos agroflorestais

Resíduos	RGC (%)	DG (kg.m ⁻³)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	PCS (kcal.kg ⁻¹)	DE (Mcal.m ⁻³)
CA	41,04 a (2,05)	162,49 a (2,47)	30,11 ab (0,88)	8,27 b (20,95)	61,62 c (2,57)	6366,97 b (1,27)	945,92 b (2,47)
FE	39,95 abc (0,62)	125,35 b (2,26)	31,07 a (5,57)	21,57 a (3,56)	47,36 d (2,10)	5548,08 c (1,21)	632,93 c (1,98)
CC	40,57 ab (1,49)	171,74 a (2,87)	24,06 c (4,61)	3,55 c (1,54)	72,39 ab (1,60)	7092,12 a (0,62)	1136,74 a (3,85)
MM	38,58 c (1,22)	170,04 a (1,64)	25,04 bc (13,12)	1,42 c (7,78)	73,53 a (4,35)	7006,20 a (3,34)	1137,61 a (1,11)
SB	39,20 bc (1,95)	114,33 c (1,33)	24,70 bc (12,49)	8,24 b (20,59)	66,97 bc (3,93)	6540,62 b (1,91)	695,01 c (0,68)

Observação: Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC: madeira de construção civil. MM: madeira de madeira. SB: sabugo de milho.

de grãos de café e madeira, e também encontraram um alto rendimento em carvão de casca de café, 40,64%, utilizando temperatura máxima de 450°C e taxa de aquecimento de 2,14°C/min. Paes *et al.* (2012) estudaram o rendimento e a caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro e também encontraram altos rendimentos gravimétricos, variando de 39,42 a 40,98%, utilizando-se temperatura máxima de 450°C e de taxa de aquecimento de 1,36°C/min. Trugilho *et al.* (2005), trabalhando com seis clones de híbridos de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade, obtiveram uma variação de 35,95% a 40,24% no rendimento gravimétrico do carvão vegetal, utilizando-se temperatura máxima de 450°C e taxa de aquecimento de 1,67°C/min. Portanto trabalhos onde foram utilizadas temperaturas máximas de 450°C e taxas de aquecimento variando de 1,36 a 2,14°C/min. apresentaram valores de rendimento gravimétrico semelhantes aos encontrados neste trabalho nos resíduos madeireiros.

Encontrou-se um baixo valor de materiais voláteis no carvão vegetal quando comparado com a mesma propriedade da biomassa *in natura*. Isto se deve ao fato de ser uma fonte secundária de energia, e ter sofrido uma degradação térmica no processo de carbonização, com eliminação de grande parte dos materiais voláteis.

O carvão derivado da palha de feijão, da casca de café e do sabugo de milho apresentou teores de cinzas elevados, podendo estar relacionado com os constituintes inorgânicos provenientes da adubação mineral. Alto teor de cinzas resulta na diminuição do poder calorífico do combustível e, quando o carvão vegetal é utilizado diretamente em caldeiras ou gaseificadores, o alto teor de cinzas diminui a transferência de calor no combustível e aumenta a corrosão dos equipamentos utilizados no processo (Tan & Lagerkvist, 2011). Todavia, o alto teor de cinzas não é um empecilho para o uso do carvão vegetal da palha de feijão como combustível, desde que alguns cuidados com a retirada das cinzas sejam tomados, com o uso de grelhas mais eficientes.

O teor de carbono fixo dos carvões dos resíduos madeireiros e do sabugo de milho foi estatisticamente maior que aqueles obtidos a partir do carvão da casca de café e da palha de feijão. No entanto, nenhum dos carvões vegetais analisados atingiu a

faixa desejada de carbono fixo para uso siderúrgico que está entre 75 e 80% (Vale *et al.*, 2010). Observa-se que os resíduos que apresentaram os maiores teores de carbono fixo foram também aqueles que apresentaram os maiores poderes caloríficos, justificando a relação positiva entre estas duas variáveis, conforme Lima *et al.* (2011) e Protásio *et al.* (2011).

Os maiores valores de poder calorífico associados aos maiores valores de densidade do granel resultaram na maior densidade energética dos resíduos madeireiros. Dessa forma, os resultados evidenciaram o carvão dos resíduos madeireiros e os de madeira de construção civil como os de melhor qualidade, quando comparados com as demais matérias-primas estudadas. Destacou-se o carvão vegetal de madeira de construção civil, que apresentou maior rendimento gravimétrico e menor teor de materiais voláteis.

A quantificação dos componentes químicos elementares (Quadro 5) é importante na caracterização de um biocombustível sólido, pois a energia liberada durante o processo de combustão está correlacionada de forma positiva com os teores de carbono e hidrogênio e, de forma contrária, como teor de oxigênio (Huang *et al.*, 2009).

Oliveira *et al.* (2010), ao analisarem as propriedades químicas elementares do carvão vegetal produzido a partir de clones de *Eucalyptus pellita* aos 5 anos de idade, encontraram 76,92% de carbono, 2,63% de hidrogênio, 0,41% de nitrogênio e 20,04% de oxigênio, utilizando marcha de carbonização similar.

Nos resultados da análise elementar foi possível perceber que a carbonização proporcionou uma maior concentração de carbono e diminuiu a quantidade de oxigênio e hidrogênio, em consequência

Quadro 5 - Análise elementar do carvão vegetal de resíduos agroflorestais na condição *in natura*

Resíduos	C (%)	H (%)	N (%)	O* (%)
CA	61,94	3,70	3,05	31,31
FE	54,82	3,03	2,32	39,83
CC	75,64	3,46	0,36	20,54
MM	73,32	3,61	0,43	22,64
SB	71,64	3,40	1,23	23,73

Obs.: CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC: madeira de construção civil. MM: madeira de madeireira. SB: sabugo de milho.

da perda de massa ocasionada pelo tratamento térmico, quando comparado com os resíduos *in natura*. Entretanto, a perda de massa é compensada pelo ganho energético em carbono, que acompanha o aumento no poder calorífico.

Sob o ponto de vista técnico, todos os resíduos analisados neste trabalho podem, em princípio, serem utilizados na forma carbonizada, necessitando estabelecer a finalidade, como por exemplo pulverizado na fabricação de cimento, briquetado para uso doméstico. Mas a decisão final do uso do resíduo carbonizado depende de uma análise econômica, que não foi objeto deste trabalho.

Comparação entre biomassa *in natura* e carvão vegetal

No Quadro 6 estão os valores percentuais da variação entre as biomassas *in natura* e as transformadas em carvão vegetal, quanto a análise imediata: teores de material volátil (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF); análise elementar: carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) e poder calorífico superior (PCS).

Observa-se pelo Quadro 6 que a transformação dos combustíveis na condição *in natura* para carvão vegetal provocou mudanças nas variáveis da análise imediata e análise elementar, e consequentemente no poder calorífico superior. A carbonização é um processo de concentração de carbono, o que pôde ser observado pelo aumento dos teores de carbono fixo e de carbono elementar, em média 307,56% e 54,73%, respectivamente. Em contrapartida, há uma diminuição nos teores de material volátil, hidrogênio e oxigênio de 65,63%, 38,20% e 44,76%, respectivamente. Portanto, mesmo com a diminuição do material volátil e do hidrogênio,

o poder calorífico superior aumenta em média 46,23%, em função, principalmente, da concentração de carbono e também da diminuição do teor de oxigênio no carvão vegetal.

Ao considerar o ganho na produção de energia na forma de calor com a carbonização, a partir da análise do poder calorífico superior, observa-se que o sabugo de milho com aumento de 51,52% no seu poder calorífico, se destaca dentre os resíduos e se compara aos resíduos de madeira (construção civil e madeireira), que pode ser considerada como parâmetro no processo de carbonização, uma vez que é o material mais utilizado para este fim no Brasil, ao contrário da palha de feijão, que teve o menor ganho (34,2%).

A explicação pode ser dada pela análise de três das variáveis: carbono fixo, carbono elementar e oxigênio. A palha de feijão apresenta a maior concentração de carbono fixo, mas contém a menor concentração de carbono elementar e a menor retirada de oxigênio do carvão vegetal. Ao contrário, o sabugo de milho apresentou o menor ganho em carbono fixo, mas o maior ganho em carbono elementar e a maior retirada de oxigênio do carvão vegetal. Neste sentido, a maior concentração de carbono elementar associado à maior retirada de oxigênio da massa de carvão vegetal propiciou um dos maiores ganhos nos valores de poder calorífico do sabugo de milho.

No entanto, quando se leva em consideração a densidade do granel (Quadro 4), verifica-se que o carvão vegetal do sabugo de milho está em quinto lugar com uma densidade do granel de 114,33kg/m³, o que lhe confere a quarta densidade energética na ordem de 695 Mcal/m³. Portanto, para se aumentar a quantidade de energia na forma de calor gerado por unidade de volume em um aparelho de queima,

Quadro 6 - Variação percentual da qualidade na transformação do combustível *in natura* em carvão

Resíduos	MV	CZ	CF	C	H	O	PCS
CA	-57,99	7,54	198,69	46,33	-30,71	-38,21	45,73
FE	-62,25	147,93	426,81	34,86	-43,26	-23,45	34,20
CC	-69,95	44,90	313,42	64,51	-36,98	-57,48	53,77
MM	-69,28	105,80	313,32	51,05	-36,44	-50,26	45,93
SB	-68,66	116,27	285,55	76,93	-43,62	-54,42	51,52
Média	-65,63	84,49	307,56	54,73	-38,20	-44,76	46,23

Obs.: CA: casca de café. FE: palha de feijão. CC: madeira de construção civil. MM: madeira de madeireira. SB: sabugo de milho.

há a necessidade de adensamento, conversão que pode ser estendida à maioria dos resíduos agrícolas, devido à baixa densidade.

CONCLUSÕES

Pela facilidade de operação e pela quantidade de energia gerada, a casca de café *in natura* apresentou as melhores propriedades para o uso em combustão direta.

O carvão de resíduos de madeira de construção civil e de madeira, em função das características químicas, parâmetros de carbono fixo, poder calorífico, densidade energética, associados ao menor teor de cinzas no carvão, apresentaram melhores propriedades para fins energéticos na

geração de calor de processo e/ou calor para uso doméstico.

A maior concentração de carbono elementar associado à maior eficiência na retirada do oxigênio da massa de carvão vegetal propiciou maior ganho em poder calorífico superior.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Produtos Florestais que, dentro do convênio celebrado entre a Universidade de Brasília e o Serviço Florestal Brasileiro, tem sido ao longo dos anos um parceiro indispensável. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro com bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1983) – *Densidade do granel*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT NBR 6922. Rio de Janeiro.
- ABNT (1984) – *Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8633. Rio de Janeiro.
- ABNT (1986) – *NBR 8112: Carvão vegetal – Análise imediata*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR8112. Rio de Janeiro.
- ABNT (1997) – *Projeto de estruturas de madeira – Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estrutura (Anexo B)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7190. Rio de Janeiro.
- ABNT (2003) – *Agregados: determinação da composição granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR NM 248. Rio de Janeiro;
- Arruda, T.P.M.; Pimenta A.S.; Vital B.R.; Lucia R.M.D. & Acosta F.C. (2011) – Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. *Árvore*, vol. 35, n. 4, p. 949-955.
- Basu P. (2010) – Pyrolysis and Torrefaction. In: *Biomass gasification and pyrolysis – Practical design and theory*. Burlington: Elsevier, 376 p.
- Brasil (2018) – *Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28*. Secretaria de Política Agrícola, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: MAP/ACE, 2018. 112 p.
- Brito, J.O. & Barrichelo, L.E.G. (1980) – *Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: densidade da madeira x densidade do carvão*. IPEF, vol. 20, p. 101-113.
- Cieslinski, J.E.F.; Costa, M.A.M.; Carvalho, J.A. & Amaral, S.S. (2015) – Study of combustion of different biomass and its atmospheric emissions. *Advanced Materials Research*, vol. 1088, p. 549-556. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.549>
- EPE (2018) – *Balanco Energético Nacional – Ano Base 2017*. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 291 p.
- Farinhaque, R. (1981) – Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracinga (*Mimosa scabrella*, Benth), e aspectos gerais de combustão. *FUPEF, Série Técnica*, n. 06, 14 p.
- Huang, C.; Han, L.; Yang, Z. & Liu, X. (2009) – Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management*, vol. 29, n. 6, p. 1793–1797. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027>
- Jenkins, B.M.; Baxter, L.L.; Miles Jr., T.R. & Miles, T.R. (1998) – Combustion properties of biomass. In: *Western States Section of the Combustion Institute*. Berkeley.

- Lima, E.A.; Silva, H.D. & Lavoranti, O.J. (2011) – Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, vol. 31, n. 65, p. 9-17. <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.31.65.09>
- Munalula, F. & Meincken, M. (2009) – An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, n. 3, p. 415-420. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.011>
- Oliveira, A.C.; Carneiro, A.C.O.; Vital, B.R.; Almeida, W.; Pereira, B.L.C. & Cardoso, M.T. (2010) – Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Scientia Forestalis*, vol. 38, n. 87, p. 431-439.
- Paes, J.B.; Lima, C.R.; Oliveira, E. & Santos, H.C.M. (2012) – Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. *Ciência da Madeira*, vol. 3, n. 1, p. 1-10. <http://dx.doi.org/10.15210/cmadv3i1.4037>
- Paula, L.E.R.; Trugilho, P.F.; Napoli, A. & Bianchi, M.L. (2011) – Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, vol. 17, n. 2, p. 237-246. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602011000200012>
- Pinheiro, F.G.; Rendero, G. & Pinho, J.T. (2005) – Densidade energética de resíduos vegetais. *Biomassa e Energia*, vol. 2, n. 2, p. 113-123.
- Protássio, T.P.; Alves, I.C.N.; Trugilho, P.F.; Silva, V.O. & Baliza, A.E.R. (2011) – Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, vol. 31, n. 68, p. 273-283. <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.31.68.273>
- Sater, O.; Souza, N.D.; Oliveira, E.A.G.; Elias, T.F. & Tavares, R. (2011) – Estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. *Revista Ceres*, vol. 58, n. 6, p. 717-722. <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.31.65.09>
- Tan, Z. & Lagerkvist, A. (2011) – Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 8, p. 3588-3602. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.016>
- TAPPI (1993) – *T 211 om-93: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C*. TAPPI Standards. Atlanta: TAPPI Press.
- TAPPI (1996) – *T 204 om-88: Solvent extractives of wood and pulp*. TAPPI Standards. Atlanta: TAPPI Press.
- Taylor, A. (2017) – *Moisture Content of 'Seasoned' Firewood*. W179 Wood Products Information – The University of Tennessee Agricultural Extension Service, W179 08-0079. [cit. 2018.12.16]. http://trace.tennessee.edu/utk_agexfores/101
- Templeton D. & Ehrman, T. (1995a) – *Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass – LAP-003*. National Renewable Energy Laboratory – NREL.
- Templeton, D. & Ehrman, T. (1995b) – *Determination of acid-Soluble Lignin in Biomass – LAP-004*. National Renewable Energy Laboratory – NREL.
- Trugilho, P.F.; Bianchi, M.L.; Silva, J.R.M.; Mori, F.A. & Frederico, L. (2005) – Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones *Eucalyptus*. *Cerne*, vol. 11, n. 2, p. 178-186.
- Vale, A.T.; Dias, I.S. & Santana, M.A.E. (2010) – Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, vol. 20, n. 1, p. 137-146.
- Vale, A.T.; Gentil, L.V.; Gonzalez, J.C. & Costa, A.F. (2007) – Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grão de café (*Coffea arabica* L.) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke. *Cerne*, vol. 13, n. 4, p. 416-420.
- Vale, A.T.; Miguel, E.P.; Moreira, A.C.O.; Lima, C.M.; Orellana, B.B.M.A. & Fortes, M.M. (2017) – Artificial neural networks in predicting energy density of *Bambusa vulgaris* in Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, vol. 12, n. 10, p. 856-862. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2016.12083>
- Vamvuka, D.; Trikouvertis, M.; Pentari, D. & Alevizos, G. (2014) – Evaluation of ashes produced from fluidized bed combustion of residues from oranges plantations and processing. *Renewable Energy*, vol. 72, p. 336-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.029>