

## CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DA REGIÃO DO DISTRITO FEDERAL PARA FINS ENERGÉTICOS

BRUNA BARBARA MACIEL AMORAS ORELLANA<sup>1</sup>, AILTON TEIXEIRA DO VALE<sup>2</sup>,  
JORGE BRENO PALHETA ORELLANA<sup>3</sup>, BRUNO SANT'ANNA CHAVES<sup>4</sup>,  
ALESSANDRO CÉZAR DE OLIVEIRA MOREIRA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Heko Tech Consultoria, SIG, Quadra 4, Lote 25, CEP 70610-440, Brasília, Distrito Federal, Brasil, [bruna\\_amoras@hotmail.com](mailto:bruna_amoras@hotmail.com)

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, s/n, CEP 70910-900, Brasília, Distrito Federal, Brasil, [ailton.vale@gmail.com](mailto:ailton.vale@gmail.com)

<sup>3</sup>Heko Tech Consultoria, SIG, Quadra 4, Lote 25, CEP 70610-440, Brasília, Distrito Federal, Brasil, [breno\\_jb@hotmail.com](mailto:breno_jb@hotmail.com)

<sup>4</sup>Laboratório de Bioenergia, Serviço Florestal Brasileiro, SCEN, Trecho 2, CEP 70818-900, Brasília, Distrito Federal, Brasil, [bruno.chaves@florestal.gov.br](mailto:bruno.chaves@florestal.gov.br)

<sup>5</sup>Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, SCEN, Trecho 2, CEP 70818-900, Brasília, Distrito Federal, Brasil, [alessandro.moreira@florestal.gov.br](mailto:alessandro.moreira@florestal.gov.br)

**RESUMO:** O Distrito Federal, apesar do seu restrito limite geográfico, tem apresentado potencial de crescimento e desenvolvimento de uma das agriculturas mais tecnológicas do país. As atividades agrícolas geram expressiva quantidade de resíduos que podem se tornar um passivo ambiental se não forem corretamente destinados. Visando contribuir para que o agronegócio da região do DF seja mais eficiente e sustentável, este trabalho objetivou caracterizar alguns resíduos agrícolas para seu aproveitamento energético. Utilizaram-se 10 tipos de resíduos, a fim de determinar o teor de umidade, análise imediata, análise química, granulometria, poder calorífico, densidade a granel e densidade energética. Os resíduos que apresentaram características energéticas mais aceitáveis foram: madeira de madeireira, madeira de construção civil, palha de milho e sabugo de milho. O feijão foi satisfatório, com ressalvas para o teor de cinzas. A quirela de milho e de sorgo não apresentou aptidão como fonte de energia devido ao excesso de amido.

**Palavras-chave:** agricultura, bioenergia, biomassa, centro-oeste, energias renováveis.

## CHARACTERIZATION OF AGRICULTURAL RESIDUES FROM FEDERAL DISTRICT REGION FOR ENERGY PURPOSES

**ABSTRACT:** The Federal District, although restricted geographical limit, has shown potential for growth and development of one of the most technological agriculture in the country. Agricultural activities generate a significant amount of waste that can become an environmental liability if not properly disposed. Aiming to contribute to the DF region agribusiness be more efficient and sustainable, this paper aims to characterize some agricultural residues for energy use. It was used 10 types of residues, where the moisture content, immediate analysis, chemical analysis, granulometry, heating value, bulk density and energy density were verified. The residues that presented the most acceptable energy characteristics were: timber, construction timber, corn straw and corn cob. The beans were satisfactory, with caveats to the ash content. Quirela of corn and sorghum showed no aptitude as energy source due to excess starch.

**Keywords:** agriculture, bioenergy, biomass, midwest, renewable energy.

### 1 INTRODUÇÃO

Cultivos agrícolas geram expressiva quantidade de biomassa residual oriunda dos processos de colheita e processamento.

Entretanto, um grande problema enfrentado pela agroindústria é a intensidade do volume residual gerado. Em muitos casos, esse material é descartado - gerando passivos

ambientais - ou subaproveitado apenas para decomposição natural.

A cultura do milho, por exemplo, deixa como principais subprodutos no campo os caules e as folhas, enquanto que na indústria sobram os sabugos. A palha é obtida ainda durante a colheita e na maioria dos casos não possui uma utilização definida, tornando-se um resíduo. Já o sabugo, parte interna e mais densa do milho, é o resíduo gerado após o milho ser debulhado e geralmente é usado para ração animal (SANTOS, 2014). Com importância semelhante ao milho em termos de produção no Brasil, o feijão tem como principais resíduos a palhada e a vagem, totalizando um fator residual de 53% sobre o total produzido (RAMOS e PAULA et al., 2011).

O café destaca-se pelo fato do Brasil ser o maior produtor mundial. A palha ou o resíduo gerado durante seu beneficiamento é composto de epicarpo (casca), mesocarpo (polpa ou mucilagem), endocarpo (pergaminho) e película prateada (MATIELO, 1991). O bagaço do sorgo sacarino também é um resíduo com potencial. Seu poder calorífico é equivalente ao bagaço de cana, sendo bastante eficiente na cogeração de energia (EMBRAPA, 2012).

A atividade industrial madeireira no país é altamente geradora de resíduos. Em Brasília, segundo CAPACITEC (2000), a produção de resíduos no setor mobiliário está em torno de 10%, principalmente na forma de serragem e pedaços de madeiras e não tem, na maioria das vezes, uma utilização definida.

Apesar de ser vista como uma região essencialmente urbana e com limitado espaço geográfico em relação a outros estados, o Distrito Federal possui o quinto maior PIB agrícola do Brasil. Segundo os dados mais recentes do IBGE (2017), o Distrito Federal destaca-se, principalmente, pela produção de grãos (como milho, feijão, sorgo) e de hortifrutigranjeiros que abastecem o mercado consumidor local. Um estudo da CODEPLAN (2013) aponta que a capital federal pode em breve se tornar um polo de atividade agropecuária com a produção de insumos, sementes, fertilizantes e maquinário.

Diante de um cenário de grande subutilização adequada dos resíduos que o setor agrícola atualmente apresenta, Menegale et al. (2012) reiteram a necessidade de se encontrar medidas economicamente viáveis e ambientalmente corretas na destinação de resíduos, de forma contínua e perene, ao invés de ações pontuais e unitárias.

Nesse sentido, uma das formas mais eficazes de aproveitamento dos resíduos agrícolas é através da sua conversão energética. Dentre as propriedades físicas mais relevantes da biomassa para aplicação em energia, destacam-se a distribuição granulométrica e a densidade dos sólidos. Já como propriedades químicas mencionam-se análise imediata, poder calorífico e análise elementar e química para determinação das frações de holocelulose (celulose + hemicelulose), lignina e extrativos.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo levantar aspectos técnicos relacionados diretamente ao uso como biocombustíveis sólidos de dez tipos de biomassas residuais produzidas pela agroindústria na região do Distrito Federal e entorno.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Áreas de coleta

Os resíduos agrícolas foram coletados em cooperativas no Distrito Federal, sendo a principal a COOPA/DF, de onde se coletaram derivados do milho como palhada, sabugo, quirela e restos de processamento (denominado milho processo) e sorgo. Na Fazenda Água Limpa - FAL, pertencente à Universidade Federal de Brasília (UnB), foram coletados caules (haste) e vagem de feijão.

A madeira residual de atividade madeireira foi oriunda de uma tradicional empresa do segmento em Brasília. Também se optou em utilizar madeiras residuais de construção civil, que foram coletadas em uma cooperativa localizada na cidade Estrutural (DF). Já os resíduos de café, foram trazidos diretamente de uma fazenda em Varginha (MG), a qual fornece grãos do tipo arábica

para uma indústria de beneficiamento de café instalada no Núcleo Bandeirante (DF). A

Figura 1 apresenta os resíduos *in natura* utilizados.

**Figura 1.** Resíduos *in natura* coletados.



## 2.2 Preparação das amostras

As amostras de cada tipo de resíduo foram divididas em três repetições, para efeito de casualidade, resultando em 30 tratamentos. Em seguida, as amostras foram moídas em um moinho de facas, de laboratório, da marca Marconi modelo MA680 e malha de 0,85 mm (20 *Mesh*). A moagem permite o aumento da relação superfície/volume, além de diminuir a porosidade das partículas, modificar seu formato e misturar diferentes componentes resultando em um material mais homogêneo. Assim, os resíduos moídos foram então classificados utilizando um classificador da marca Bertelem e peneiras com duas granulometrias diferentes resultando em partículas de 40 *Mesh* e 60 *Mesh*.

## 2.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Inicialmente, verificou-se a massa úmida e a massa seca da biomassa *in natura* com pesagem em balança de precisão e secagem em estufa de circulação forçada, a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até a massa da amostra permanecer constante, conforme as normas NBR 8112 (ABNT, 1986 a) e EN 14774-2 (DIN, 2009). A partir desses dados, foi possível calcular a umidade de cada amostra na condição de campo, através da Equação (1) abaixo:

$$TU = \frac{M_u - M_{0\%}}{M_{0\%}} \times 100 \quad (1)$$

Em que TU é teor de umidade (%),  $M_u$  é a massa inicial da amostra úmida (g) e  $M_{0\%}$  é a massa final da amostra seca (g).

A classificação granulométrica foi feita para o material *in natura* após moagem e baseou-se na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) que consistiu em montar um rol de seis peneiras com diâmetros de abertura de 10, 20, 35, 42, 65 e 100 *Mesh*, posicionadas em ordem decrescente do topo para a base, sendo o topo a peneira de 10 *Mesh*. Uma massa de 100g de cada resíduo foi colocada na peneira superior e o conjunto colocado em um peneirador eletromagnético, onde as peneiras foram agitadas durante 20 minutos.

A análise imediata consistiu em quantificar os teores de cinzas, materiais voláteis e teor de carbono fixo conforme a norma NBR 8112 (ABNT, 1986 a), com adaptações. O teor de carbono fixo (CF) contido nas amostras baseia-se nos dados de teores de cinzas e materiais voláteis através da Equação (2).

$$CF = 100 - (Cz + Mv) \quad (2)$$

Em que CF é o teor de carbono fixo (%), Cz é o teor de cinzas (%), e Mv é o teor de materiais voláteis (%).

Determinou-se o poder calorífico superior em uma bomba calorimétrica da marca PARR 6400 Calorimeter, através de metodologia adaptada da norma NBR 8633 (ABNT, 1986 b). A adaptação foi desenvolvida pelo Laboratório de Bioenergia do LPF/SFB e consiste em compactar manualmente 1g de amostra em um equipamento de pressão hidráulica que transforma as amostras em pequenos *pellets*. Essa adaptação permite resultados mais precisos, pois possibilita um maior controle da umidade na amostra e melhora a eficiência na queima da amostra na bomba calorimétrica.

A densidade a granel foi determinada a partir de uma adaptação das normas NBR 6922 (ABNT, 1981) e EN 15103 (DIN, 2010), onde se utilizou um cilindro de alumínio de volume conhecido, o qual foi preenchido até a marca delimitada com o resíduo e a massa obtida em uma balança de precisão de 0,1g. Dessa forma, a densidade a granel foi calculada a partir da relação da massa do material e o volume do recipiente. A densidade energética foi calculada a partir do produto entre a densidade a granel e o poder calorífico superior.

Os ensaios para determinar o teor de extrativos, lignina e cinzas livres de extrativos foram realizados no Laboratório de Química do LPF/SFB. O teor de extrativos e de cinzas livres de extrativos seguiu as normas TAPPI 204 om-88 e TAPPI T211 om-93, respectivamente, com adaptações do próprio

laboratório. Quanto aos teores de lignina insolúvel e solúvel, foram adotados os procedimentos Laboratory Analytical Procedure #003e #004, respectivamente (TEMPLETON e EHRMAN, 1995).

O teor de lignina é o somatório entre a lignina insolúvel e a solúvel. O teor de holocelulose livre de extrativos foi calculado por diferença, de onde se subtraiu de 100% os teores percentuais de lignina total e cinzas livres de extrativos.

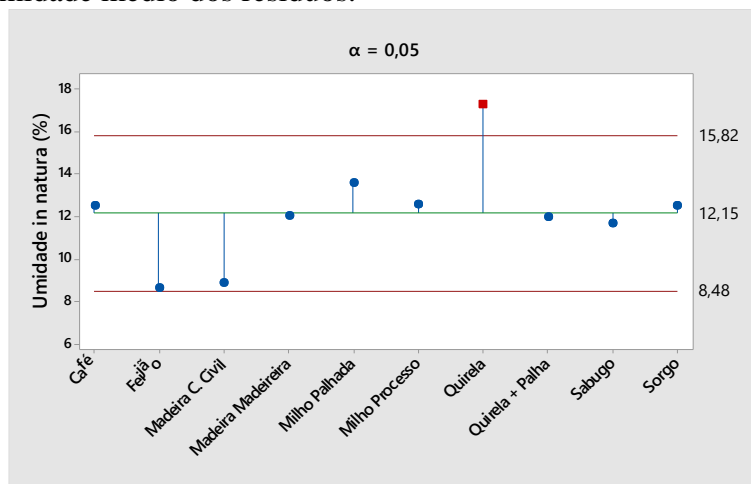
Para realização da análise estatística, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado, composto por dez tratamentos com três repetições cada. As variáveis de cada biomassa foram analisadas estatisticamente através da análise de variância (ANOVA). Comparações entre as médias de cada tratamento foram realizadas através do Teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas no programa estatístico Minitab 18.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Teor de umidade

Os teores de umidade dos resíduos *in natura*, ou seja, na forma como foram coletados, estão informados na Figura 2 e a análise de variância na Tabela 1. Segundo Nogueira e Rendeiro (2008), a biomassa originária de produção agrícola possui teor de umidade entre 15–30% à base úmida.

**Figura 2.** Teor de umidade médio dos resíduos.



**Tabela 1.** Análise de variância ANOVA do teor de umidade dos resíduos in natura

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Resíduos <i>in natura</i>	9	155,37	17,264	3,7	0,007
Erro	20	93,3	4,665		
Total	29	248,68			

Na literatura são encontrados diversos estudos que avaliaram o teor de umidade em resíduos agrícolas semelhantes aos que foram analisados neste trabalho. Vieira (2012) encontrou um valor de umidade em sabugo de milho superior ao verificado nesta pesquisa: 16,93%. Em contrapartida, Carvalho et al. (2016) identificaram teores de umidade de palha e sabugo de milho *in natura*, triturados, de 8,49% e 6,58%, respectivamente. Assim como o determinado por Vieira et al. (2014), onde o sabugo apresentou um teor de umidade de 6,76% e de 6,87% para palha.

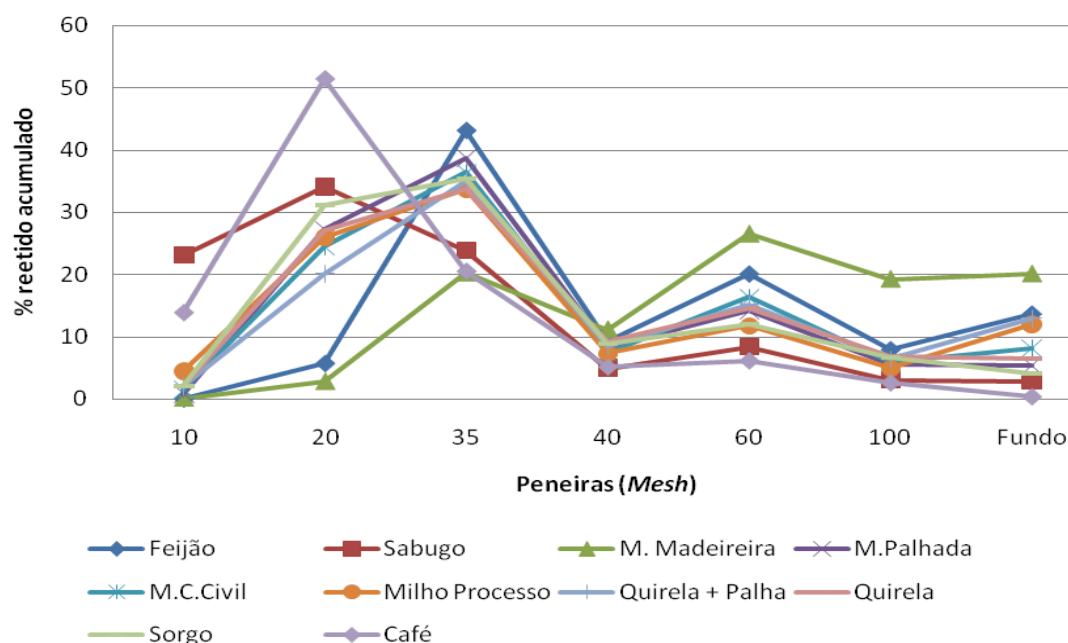
Faria et al. (2016), analisando resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, identificaram um teor de umidade médio de 10,82% à base seca. Silva, Nogueira e Roberto (2005), em um levantamento sobre o teor de umidade de grãos, encontraram valores de umidade na colheita de 62% (base úmida) para o café; 23% para o milho e 26% para o sorgo e, após secagem, o café, o milho e o sorgo

apresentaram respectivamente 12%, 11% e 9%.

Outro ponto a ser considerado em relação ao teor de umidade é quanto ao armazenamento do material. Verificou-se que, sem controle da umidade e quando acondicionados em locais pouco arejados, a tendência de proliferação de microrganismos era maior, pois, quanto mais úmido o material, mais susceptível ao ataque de fungos. Corroborando este fato, Taylor e Kung (2002) afirmam que silagens com alta umidade são mais propensas à deterioração aeróbia, bem como a produção de substâncias potencialmente tóxicas.

### 3.2 Granulometria

A distribuição granulométrica dos resíduos após serem moídos encontra-se na Figura 3, contendo a relação entre o diâmetro das peneiras (em *Mesh*) e o percentual de biomassa retida em cada uma.

**Figura 3.** Distribuição granulométrica dos resíduos analisados.

A maior retenção ocorreu com os resíduos de café, indicando maior granulometria que os demais, sendo composta por aproximadamente 51% de partículas com dimensões iguais ou superiores a 0,84 mm, retidas na peneira de 20 *Mesh*. Nessa mesma faixa granulométrica, o sabugo apresentou sua maior retenção de partículas, com 34%. A madeira de madeira foi o único resíduo que apresentou pico de retenção granulométrica com menor diâmetro, acumulando 26% na peneira com abertura de 0,25 mm, retida na peneira de 60 *Mesh*. Os demais resíduos apresentaram percentual de retenção intermediário na peneira de 35 *Mesh* (0,50 mm).

As diferenças na granulometria da biomassa após a trituração devem-se às

características iniciais (naturais/estruturais) dos materiais. Aqueles que apresentaram menor resistência à trituração produziram frações com menores granulometrias, o que poderá influenciar a densidade aparente da biomassa (PROTÁSIO et al., 2011).

### 3.3 Análise imediata

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados da análise de variância e do teste de Tukey, respectivamente, para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo das diferentes biomassas, com 5% de probabilidade. Houve diferença significativa nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo ( $p < 0,005$ ) entre os resíduos analisados.

**Tabela 2.** Análise variância ANOVA dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos resíduos agroindustriais.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Materiais voláteis	9	409,24	45,47	22,3	0,000
Erro	20	40,78	2,039		
Total	29	450,02			
Cinzas	9	509,03	56,55	86,13	0,000
Erro	20	13,13	0,65		
Total	29	522,16			
Carbono Fixo	9	821,04	91,22	42,58	0,000
Erro	20	42,85	2,14		
Total	29	863,88			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

**Tabela 3.** Teste de Tukey para as médias de teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) de cada biomassa.

RESÍDUO	MV (%)	CZ (%)	CF (%)
Quirela	83,62 A	2,07 EF	14,29 CD
Feijão	83,26 AB	9,03 B	7,70 E
Madeira	81,51 AB	0,67 F	17,80 ABCD
Madeira			
Milho	80,97 AB	4,35 DE	14,66 CD
Processo			
Sorgo	80,07 ABC	15,62 A	4,30 E
Madeira C.	80,06 ABC	2,46 EF	17,47 BCD
Civil			
Quirela +	79,15 BC	7,22 BC	13,62 D
Palha			
Milho	76,23 CD	5,73 CD	18,02 ABC
Palhada			
Sabugo	74,22 DE	3,81 DE	21,97 A
Café	71,663 E	7,69 BC	20,64 AB

\*médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Segundo Obernberger e Thek (2004), é alta a quantidade de materiais voláteis nos combustíveis de biomassa, variando em geral entre 76 e 86 % (base seca), o que resulta em maior emissão de gases na combustão. O café foi a única biomassa analisada que apresentou média abaixo do mínimo mencionado pelos autores citados, com média de 71% de voláteis. O feijão e a quirela de milho foram os resíduos que apresentaram as maiores quantidades de voláteis, em torno de 83%. Morais (2007) encontrou um teor de materiais voláteis para serragem de madeira de 89,02%, Vieira (2012) indicou um valor de aproximadamente 98% de materiais voláteis

em sabugo de milho. Nakashima et al. (2014) encontraram um valor de 80,73% de voláteis em palha de milho. Miranda (2011), estudando bagaço de sorgo, encontrou teor de 81% de materiais voláteis. Dantas (2013), caracterizando resíduos do milho para uso energético, determinou valores de materiais voláteis para caule (83,99%), folhas (83,09%), sabugo (84,68%) e palha (85,90%).

A madeira de madeireira apresentou o menor teor de cinzas, com média de 0,68%, em contrapartida, o sorgo apresentou um valor discrepante em relação aos demais, com 15,62%. O expressivo teor de cinza dos resíduos agrícolas era esperado e, em parte,

deve-se ao alto teor de substâncias inorgânicas presentes nesses substratos. Segundo Vale et al. (2007), o teor de cinzas está relacionado com a presença de quantidades e de qualidades de diferentes minerais como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro, sódio, entre outros que elevam esse parâmetro. Os autores encontraram um alto teor de cinzas para resíduos de café (13,96%), superior ao encontrado neste trabalho (7,69%), que pode ser proveniente da adubação, não só de potássio e fósforo, mas do cálcio usado como corretivo. Os mesmos autores encontraram valor de cinzas inferior para resíduos de madeira (maravalha), de 0,34%.

Dentre os componentes dos resíduos da cultura do milho analisados por Dantas (2013), o caule (2,08%), o sabugo (1,65%) e a palha (1,91%) destacam-se na produção de combustível em relação à folha que apresenta 5,49% de cinzas. Vieira (2014) e Miranda (2011) encontraram valores de cinzas em bagaço de sorgo de 6,2% e de 9,5%, respectivamente, ambos inferiores ao mensurado neste trabalho.

Klautau (2008) verificou que o alto teor de cinzas em biomassa pode influenciar negativamente o poder calorífico e, segundo Pereira e Seye (2014), gerar problemas quanto à manutenção dos equipamentos, como o entupimento de tubulação.

Como o teor de carbono fixo está inversamente relacionado aos teores de material volátil e de cinzas, isso explica o menor teor de carbono fixo para a quirela de sorgo (4,3%) e o maior para sabugo (21,97%), seguido do café (20,65%).

Na literatura são encontrados valores de 18,32% de carbono fixo para o sabugo de milho, segundo Demirbas (2004), 13,67% também em sabugo e 12,19% em palhada de milho, conforme Dantas (2013), e 8,6% para bagaço de sorgo (VIEIRA, 2014). Horst (2013) indicou, para serragem de madeira, 14,22% de CF. Vale et al. (2007) encontraram um teor de carbono fixo de 10,31% em resíduos de café e 16,47% em maravalha.

### 3.4 Poder calorífico superior

Os resultados referentes ao poder calorífico superior de cada resíduo estão dispostos nas Tabelas 4 e 5. A Tabela 4 exibe a análise de variância desse parâmetro onde o p-valor foi menor que 5%, indicando que há diferença estatística. Na Tabela 5, as médias de cada resíduo estão detalhadas nas duas unidades mais comumente utilizadas para medidas energéticas e o agrupamento a que pertencem, segundo o Teste de Tukey.

**Tabela 4.** Análise de variância ANOVA do Poder Calorífico Superior dos resíduos analisados.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Biomassa	10	24,23	2,42	598,28	0,000
Erro	9	0,03	0,00		
Total	19	24,27			



**Tabela 5.** Teste de Tukey entre as médias do poder calorífico superior dos resíduos analisados.

RESÍDUO	MJ/kg	(Kcal/kg)
Madeira Madeireira	20,68 A	4.944
Madeira C Civil	19,80 B	4.732
Sabugo	18,52 C	4.426
Milho Processo	18,51 C	4.424
Milho Palhada	18,41 C	4.335
Quirela	18,27 C	4.335
Sorgo	17,85 D	4.266
Feijão	17,42 E	4.163
Quirela + Palha	17,40 E	4.159
Café	16,78 F	4.010

\*médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Assim, a madeira de madeireira apresentou o maior poder calorífico superior, seguido da madeira de construção civil. Calegari et al. (2005), analisando diversas biomassas, encontraram um PCS de refilo/costaneira de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. de 5110 kcal/kg e, para maravalha, de 4945 kcal/kg, semelhantes aos determinados aqui em madeira de madeireira.

Os resíduos derivados de milho (sabugo, quirela, milho palhada e milho processo) foram os que apresentaram o maior agrupamento de médias de PCS, como consta na Tabela 5, sendo que o derivado de milho que mais se distanciou da média dos demais foi o quirela + palha. Segundo Rocha (2002), o sabugo de milho tem um poder calorífico de 15,65 MJ/kg, inferior ao encontrado neste trabalho (18,52 MJ/kg). Em palhada de milho, os valores encontrados neste estudo foram similares aos encontrados por Horst (2013) para o referido parâmetro.

Ainda quanto aos resíduos de milho, Dantas (2013) encontrou valores de PCS semelhantes entre caule (4.348 kcal/kg), folhas (4,365 kcal/kg), sabugo (4.476 kcal/kg) e palha (4.564 kcal/kg).

O menor PCS foi o do resíduo de café (16,78 kcal/kg), semelhante ao encontrado por Vale et al. (2007) para casca de café (3.933 kcal/kg). Paula et al. (2011) determinaram para o caule e a vagem de feijão um poder calorífico superior de 4488 e 4218 kcal/kg, respectivamente.

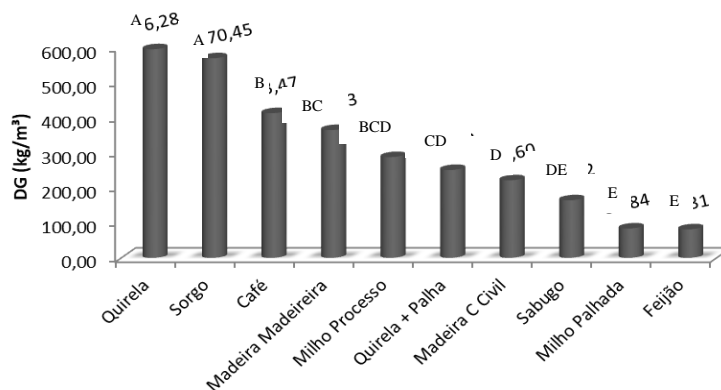
### 3.5 Densidade a granel

A Tabela 6 apresenta o resultado da análise de variância comparando a densidade a granel de todos os resíduos, indicando que houve diferença significativa entre os mesmos (o p-valor foi menor que 5%). A Figura 4 exibe as médias para cada biomassa.

**Tabela 6.** Análise variância ANOVA para densidade a granel.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Biomassa	9	8986	99846	49,38	0,000
Erro	20	4043	2022		
Total	29	9390			

Onde: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados e QM = Quadrado Médio.

**Figura 4.** Densidade a granel dos resíduos.

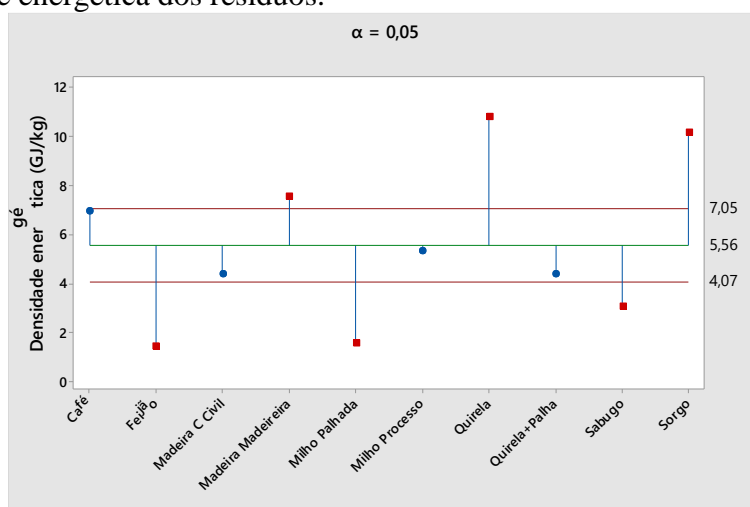
Por ser composta por resíduos de grãos triturados, a quirela de sorgo e a de milho foram as que apresentaram a maior densidade a granel. Ambas apresentaram distribuição granulométrica semelhante, pois, conforme explicam Dias et al. (2012), a densidade do granel é um parâmetro relacionado também com a granulometria do material, onde quanto menor o tamanho da partícula, menor a porosidade (quantidade de espaços vazios), ocasionando uma maior densidade e, quanto maior a granulometria menor a densidade, como encontrado para a palhada de milho e de feijão.

Quanto à densidade a granel de serragem de madeira, podem ser adotados valores na faixa de 150 (madeiras leves) a 250 kg/m<sup>3</sup> (madeiras pesadas), afirmam Pinheiro et al. (2005). Dentre os resíduos de madeira

analisados, apenas a de construção civil encaixa-se dentro da faixa sugerida pelos autores. O café apresentou maiores partículas em faixa granulométrica superior aos demais resíduos, porém, notou-se que isso não reduziu a densidade a granel do material.

### 3.6 Densidade energética

A Figura 5 ilustra as médias da densidade energética para cada resíduo. Observa-se que as maiores densidades foram obtidas na quirela de milho e sorgo, graças às elevadas densidades a granel dos mesmos. Em contrapartida, os resíduos de feijão e de palhada de milho tiveram as menores densidades energéticas, devido à mesma relação inversa.

**Figura 5.** Densidade energética dos resíduos.

Silva, Cardoso Sobrinho e Saiki (2004), analisando a densidade energética de biomassas agrícolas para gaseificação, concluíram que os resíduos de serraria foram os que apresentaram melhor desempenho quanto à densidade energética ( $5769 \text{ MJ/m}^3$ ) e o sabugo de milho o pior ( $2376 \text{ MJ/m}^3$ ). Segundo os autores, a baixa densidade energética do sabugo resultou em baixo rendimento energético do sistema quando se usou esse combustível. Faria et al. (2016) encontraram para casca de café, uma densidade energética líquida de aproximadamente  $3 \text{ GJ/m}^3$ .

Couto et al. (2004) mencionam que a baixa densidade energética da biomassa sólida comparada ao carvão mineral, por exemplo, resulta em custos maiores em transporte e armazenamento. No entanto, o aprimoramento de técnicas para elevar a concentração de energia, como o adensamento em forma de *pellets* e briquetes, ampliará as possibilidades de transformação da biomassa em energia.

### 3.7 Análise química

A avaliação da composição química de resíduos lignocelulósicos faz parte do grupo de variáveis de fundamental importância para a análise de uma matéria-prima como potencial produtora de energia, seja na forma *in natura*, de adensados ou carvão vegetal.

Pela metodologia utilizada, não foi possível obter os valores de cinzas sem extrativos (e conseqüentemente holocelulose) dos resíduos de quirela, quirela + palha, sorgo e milho processo, devido à alta quantidade de amido presente nesses materiais, o que impediu a filtragem, passo determinante para isolar a lignina. Ainda assim, este resultado demonstra uma aptidão no uso indireto desses materiais como aglutinante no processo de compactação de outras biomassas. Na Tabela 7 está o resultado do teste de média dos teores de extrativos, cinzas sem os extrativos, holocelulose e lignina (insolúvel, solúvel e total).

O café apresentou o maior teor de extrativos e cinzas livres de extrativos. A análise do teor de extrativos (17,22%) em palha de milho, realizada por Romão (2015), apontou valor superior ao encontrado neste trabalho. A presença de altos teores de extrativos é uma característica vantajosa para produção de energia devido ao elevado poder calorífico desses componentes (GUO et al., 2010).

Foram observados teores mais elevados de lignina nos resíduos de madeira de madeireira e de construção civil. Como há uma relação inversa entre lignina e holocelulose, era de se esperar que estes mesmos resíduos apresentassem os menores teores de holocelulose.

**Tabela 7.** Teste de Tukey para as médias dos parâmetros da análise química.

RESÍDUO	Extrativos (%)	Cinzas s/ extrativos (%)	Holocelulose (%)	Lignina Ins.(%)	Lignina Sol. (%)	Lignina Total (%)
Madeira C Civil	3,12 F	0,79 CD	68,79 C	31,04 B	0,96 E	32,0 B
Milho Palhada	11,76 BC	2,09 C	81,42 B	17,71 C	2,95 B	20,67 D
Sabugo	9,75 CD	1,62 D	85,38 A	13,50 D	2,73 B	16,23 E
Madeira Madeireira	7,60 DE	1,36 E	64,69 D	35,12 A	1,54 D	36,67 A
Café	24,36 A	4,25 A	79,41 B	21,0 C	3,83 A	24,83 C
Feijão	5,58 EF	2,65 B	79,62 B	20,66 C	2,36 C	23,02 D
Quirela	10,17 BCD	--	--	--	--	--
Quirela + Palha	13,33 B	--	--	--	--	--
Sorgo	10,91 BC	--	--	--	--	--
Milho Processo	12,28 BC	--	--	--	--	--

\*médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

A holocelulose e a lignina são consideradas os principais componentes moleculares da biomassa. Para a produção de energia, maiores teores de lignina e menores teores de holocelulose são desejáveis (BUFALINO et al., 2013), como pode ser observado nos resíduos de madeira analisados.

A quirela de sorgo (assim como a quirela de milho) é utilizada na silagem por ser um alimento de alto valor nutritivo e que apresenta alta concentração de carboidratos solúveis essenciais para adequada fermentação

#### 4 CONCLUSÕES

De maneira geral, os resíduos demonstraram aptidão para serem reaproveitados como fonte de energia, podendo ser utilizados na queima direta ou transformados em outros produtos como carvão ou adensados. Os que apresentaram características mais aceitáveis foram: madeira de madeireira, madeira de construção civil, palha de milho e sabugo de milho. O feijão foi satisfatório, com ressalvas para o teor de cinzas apresentado;

Os resíduos de milho possuem grande potencial para aproveitamento energético, sendo o caule, a palha e o sabugo, os subprodutos mais indicados para esse fim. A

lática. Portanto, seu uso energético ainda é incipiente devido à elevada umidade, alto teor de cinzas e pouca lignina (o mesmo conclui-se para quirela + palha e milho processo). Em contrapartida, o sorgo é promissor para a indústria energética, apresentando um PCS de 4298,40 kcal/kg (EMBRAPA, 2012), um teor de carbono de 68,3% (MIRANDA, 2011), e um teor de lignina na ordem de 18,60% (SANTOS, 2012) a 23,20% (FREITA et al., 2016), similares aos da cana-de-açúcar.

quirela de milho, por outro lado, amplamente utilizada como alimento animal, não apresentou aptidão como fonte de energia devido ao excesso de amido. Essa característica, no entanto, possibilita o uso da quirela como aglutinante no processo de adensamento de outras biomassas vegetais para produção energética. A mesma finalidade pode-se indicar para a quirela de sorgo;

Os teores de cinzas, apesar de elevados, apresentaram resultados satisfatórios, pois quando se trata de resíduos agrícolas, é comum a presença de outros materiais contidos no solo (ou adquiridos em outros processos), o que pode interferir nos resultados.

## 5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto. Ao

Serviço Florestal Brasileiro (SFB) por disponibilizar os Laboratórios de Química e Bioenergia do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) para a execução dos ensaios.

## 6 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8112**: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986 a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1986 b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6922**: carvão vegetal - ensaios físicos de determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro; 1981.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. 6p. 2003.

BUFALINO, L.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A. Relation of transverse air permeability with physical properties in different compositions of sugarcane bagasse particleboards. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 150-157, 2013.

CALEGARI, L. FOELKEL, C. E. B.; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA P.; SANTINI, E. J. Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v.2, n.1, p. 37-46, 2005.

CAPACITEC/FAP-DF – **Centro de Capacitação Tecnológica/Núcleo de Apoio Tecnológico do Setor Moveleiro**. Brasília: FAP/DF, 2000. 36p.

CARVALHO, L.L.M.; ALMEIDA, R.M.R.G.; PIMENTEL, W.R.O.; SILVA, M.C.S. Avaliação da hidrólise da palha e sabugo de milho para produção de etanol 2G. *In*: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Fortaleza/CE, 2016. **Anais...** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.

Companhia de Planejamento do Distrito Federal – CODEPLAN. **Safra 2012/13**: Produção recorde de grãos no Brasil e na região geoeconômica de Brasília (RGB) e evolução no período 1990 a 2013. Brasília: CODEPLAN/GDF, 2013. 30p.

COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK; L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v.1, n.1, p. 71-92, 2004.

DANTAS, V.F.S. **Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zeamays L.*) e do epicarpo do pinhão manso (*Jatropha curcas L.*)**. 2013. 36p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.

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

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – DIN. **EN 14774-2** - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method. Germany, 2009.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – DIN. **EN 15103** - Solid biofuels - Determination of bulk density. Germany, 2010.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Documentos**. Brasília-DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público privada: oportunidades, perspectivas e desafios. **Documentos**. Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 76p.

FARIA, W.S.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A. de C.O.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JR, J.B. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v.11, n.1, p. 137-147, 2016.

FREITA, C.M. FREITA, L.A.; ROVIERO, J.P.; TENÓRIO, E.M.F.; RABELO, S.C.; MUTTON, M.R.J. Caracterização de cinzas, lignina, celulose e hemicelulose em bagaço de sorgo e cana-de-açúcar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA AGROPECUÁRIA, AGRÍCOLA E AMBIENTAL, 1, 2016, Jaboticabal. **Anais...**Jaboticabal: CBMAAA, 2016, 5p.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. *Journal of fuel Chemistry and Technology*, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

HORST, D.J. **Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro, v.30 n.12 p.1-82 dezembro, 2017.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo concorrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MATIELLO, J. B. **O café**: do cultivo ao consumo. São Paulo: Globo, 1991. p. 320. (Coleção do Agricultor. Grãos).

MENEGALE, V.L.C.; LEÃO, A.L.; GRASSI FILHO, H.; MENEGALE, M.L.C. Resíduos agroindustriais para enriquecimento de fertilizante orgânico. **Energia na Agricultura**, Botucatu, vol. 27, n.2, p.113-123, 2012.

MIRANDA, M. R. da S. **Bagaço do sorgo**: estimativa de parâmetros cinéticos e pirólise analítica. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- MORAIS, D.M de. **Briquetes de resíduos lignocelulósicos como potencial energético para a queima de blocos cerâmicos**: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal. 2007. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- NAKASHIMA, G.T.; MARTINS, M.P.; SILVA, D.A da.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M.; Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n.34, p.22-29, 2014.
- NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO. G. Caracterização da biomassa vegetal. *In*: BARRETO, E. J. F. (Coord.). **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 52-53, 2008.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical chatacterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. **Biomass and Bioenergy**, v.27, n.6, p.653-669, 2004.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PEREIRA, T. V.; SEYE O. Caracterização físico-térmica de biomassa local. Dourados: ENEPEX, UFGD/UEMS. 2014.
- PINHEIRO, G.F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v.2, n.2, p. 113-123, 2005.
- PROTÁSIO, T. de P.; ALVES, I.C.N.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; BALIZA, A.E.R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.
- RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- ROCHA, J. D. Gaseificação da biomassa: histórico e conceitos básicos. *In*: **Tecnologia e estado da arte da gaseificação de biomassa**. Manaus: Universidade do Amazonas, 2002.
- ROMAO, D.R. **Potencial de fibras de resíduo agrícola: palha de milho (*Zeamays L.*) para produção de celulose**. 2015. Monografia (Graduação) – Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília.
- SANTOS, M. S. R. **Estudo de pré-tratamentos de palha e sabugo de milho visando a produção de etanol 2G**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- SANTOS, T.N. **Avaliação da biomassa de sorgo sacarino e palma forrageira para produção de etanol em Pernambuco**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- SILVA, J. de S., NOGUEIRA, R.M., ROBERTO, C.D. **Tecnologia de secagem e armazenagem para a agricultura familiar**. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2005. 138p.

SILVA, J.N.; CARDOSO SOBRINHO, J.; SAIKI, E.T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.405-411, 2004.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI - **T 204 om-88**. (s.d.). Solvent extratives of wood and pulp. Atlanta, GA: TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry, v.1, 1996.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI - **T 211 om-93**. (s.d.). Ash in wood, pul, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1993.

TAYLOR, C. C.; KUNG, J. The effect of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of high moisture corn in laboratory silos. **Journal of Dairy Science**, v. 85, p. 1526–1532, 2002.

TEMPLETON, D.; EHRMAN, T. Determination of acid-insoluble lignin in biomass. **National Renewable Energy Laboratory** (NREL), Golden, v.14, n.1, 1995. 13p.

VALE, A.T.; GENTIL, L.V.; GONÇALEZ, J.C.; COSTA, A.F da. Caracterização energética de resíduos de grão de café (*Coffea arábica*, L) e de madeira (*Cedrelingacatenae formis*), DUKE. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416-420, 2007.

VIEIRA, A.C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

VIEIRA, R. C.; ANTUNES, D. P. C.; SILVA, M. C. S.; ALMEIDA, R. M. R. G. Estudo do processo de hidrólise de resíduos lignocelulósicos do milho para a produção de bioetanol. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis-SC, 2014.