

# Avaliação das propriedades físico-químicas de resíduos lignocelulósicos provenientes da produção do biodiesel

## Evaluation of the physico-chemical properties of lignocellulosic residues from biodiesel production

David Cardoso DOURADO [1](#); Everton Lorenzetti TAVARES [2](#); Erivelton César STROPARO [3](#); Kely Viviane de SOUZA [4](#); Éverton HILLIG [5](#); Waldir Nagel SCHIRMER [6](#)

Recibido: 15/12/16 • Aprobado: 28/01/2017

### Conteúdo

- [1. Introdução](#)
  - [2. Materiais e métodos](#)
  - [3. Resultados e discussão](#)
  - [4. Conclusões](#)
- [Referências](#)

#### RESUMO:

O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físico-químicas e caloríficas de resíduos agrícolas (casca de amendoim, de mamona, de macaúba e de pinhão-manso), visando avaliar a possibilidade de utilização desses resíduos na produção de bioenergia. Amostras de cada resíduo foram moídas e submetidas a análise físico-químicas de densidade básica, densidade a 0% de umidade e teor de minerais, além de composição elementar (C, H e O) e poder calorífico superior (PCS). Verificou-se que a casca de macaúba apresentou a maior densidade básica média (0,354 g.cm<sup>-3</sup>) e também a maior densidade a 0% (0,901 g.cm<sup>-3</sup>), seguida do resíduo de amendoim com 0,205 e 0,705, respectivamente. Os resíduos oriundos da macaúba e amendoim apresentaram maiores valores em PCS e menores valores em Teor de Minerais, sendo considerados de melhor qualidade para geração de bioenergia quando comparadas aos resíduos de mamona e pinhão manso

**Palavras-chave:** Bioenergia; matriz energética; resíduo agrícola.

#### ABSTRACT:

The present work focused on evaluating the physico-chemical properties of some agricultural residues (peanut shell, castor bean, Macaw palm and jatropha) in order to evaluate their use for the bioenergy production. To accomplish this purpose, a sample of each residue were milled and parameters as densities, elemental composition (C, H and O) and upper heating value (UHV) were determined. Results showed that Macaw palm bark presented the highest average of basic density (0.354 g.cm<sup>-3</sup>) and, consequently, the highest bulk density at 0% (0.901 g.cm<sup>-3</sup>). The residues from Macaw palm and peanut presented higher values of UHV and lower values of minerals.

**Key-words:** Agricultural wastes; bioenergy; energy mix.

# 1. Introdução

A matriz energética mundial é altamente poluidora e insustentável ambientalmente já que se baseia no consumo de combustíveis fósseis. Diante das estimativas de esgotamento das reservas de petróleo, gás natural e carvão mineral, é necessário que exista a preocupação de desenvolvimento de fontes alternativas de energia renováveis, que sejam economicamente viáveis e ecologicamente corretas (ESTEVES & PEREIRA, 2016).

A busca por fontes energéticas sustentáveis com intuito de substituir ou reduzir a pressão sobre os combustíveis fósseis é hoje uma realidade (CASTELLANELLI, & CUNHA, 2015). Energias renováveis como eólica, solar, hidroelétrica e da biomassa tem aumentado sua parcela de atuação na matriz energética mundial.

No Brasil, fontes de bioenergia, principalmente provenientes dos biocombustíveis e da biomassa vegetal, são as mais promissoras atualmente, já que as culturas agrícolas são base da maior parcela do PIB (Produto Interno Bruto) e o país vem alcançando um status promissor como maior produtor e consumidor de biodiesel do mundo (SOUZA et al., 2016).

O biodiesel é um combustível renovável, limpo e pode ser obtido através de vários processos industriais (transesterificação, esterificação e craqueamento). No Brasil, inúmeras espécies vegetais são utilizadas na produção deste biocombustível como: a soja, o pinhão manso, o amendoim, a macaúba, o babaçu e diversas outras. Entretanto, dado a alta organização da cadeia produtiva da soja, essa cultura é a mais utilizada na produção do biodiesel brasileiro (CREMONEZ, P. A. et al.(2015).

Na avaliação da viabilidade do aproveitamento de resíduos para a geração de bioenergia torna-se imprescindível a determinação do poder calorífico superior (PCS). O PCS é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa (DOURADO, 2015). Segundo a norma NBR 8633 (ABNT, 1984), o poder calorífico é chamado de superior quando a água resultante da queima encontra-se no estado líquido e, além desta, também são gerados resíduos.

A fabricação do biodiesel não é isenta de resíduos, ou seja, há grande produção de materiais lignocelulósicos que poderiam gerar grande quantidade de bioenergia, por isso, a análise do poder calorífico, dos teores dos componentes elementares, a análise térmica, a densidade e o teor de elementos minerais são parâmetros utilizados na qualificação de um material quando o objetivo é a liberação de energia pela combustão (DOURADO, 2014).

O objetivo desse trabalho foi determinar a densidade aparente a 0% de alguns resíduos agrícolas, que possuem potencial para produção de energia e que são provenientes da cadeia produtiva do biodiesel. Determinar o poder calorífico superior, o teor em minerais e os componentes elementares de quatro resíduos agrícolas, oriundos da fabricação do biodiesel, visando a sua utilização na produção de bioenergia. Estabelecer correlações lineares entre o poder calorífico superior da biomassa residual proveniente da fabricação do biodiesel e as demais variáveis analisadas, como subsídio para o aproveitamento energético dessa biomassa.

---

## 2. Materiais e métodos

Foram utilizados nesse experimento quatro tipos de resíduos de culturas agrícolas destinadas à produção de biodiesel, provenientes de plantios no município de Lavras, estado de Minas Gerais. Os resíduos analisados foram as cascas retiradas dos frutos da mamona, do pinhão manso, da macaúba e do amendoim.

### 2.1. Determinação da densidade básica e da densidade a 0%

Para a condução dos ensaios, foram realizadas três repetições de cada amostra, para determinação da densidade básica e para a determinação da densidade a 0%.

Para a densidade a 0% dos resíduos lignocelulósicos foi considerada as diretrizes do protocolo analítico de caracterização física de componentes e substratos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, com adaptações. A densidade básica da biomassa residual foi determinada pelo método do deslocamento de água, preconizado por Azzini et al. (1981) e citado por Pereira et al. (2004) e por Protásio et al. (2010).

Foi realizada análise de variância, considerando como fator de variação os tipos de resíduos, para as densidades avaliadas. As médias obtidas para cada tipo de resíduo foram comparadas estatisticamente através do Teste de Tukey a 95% de probabilidade.

## 2.2. Determinação do teor de minerais, do poder calorífico superior e dos componentes elementares

Cinco frações de cada resíduo foram amostradas, moídas em moinho tipo Willey e classificadas em função da granulometria com auxílio de um conjunto de peneiras. A fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh foi utilizada na determinação do teor de minerais (TM) segundo norma analítica ABTCP M 11/77 (ABTCP, 1974) e poder calorífico superior (PCS) pela norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) utilizou-se um calorímetro digital da marca IKA C-200®, no qual uma amostra de aproximadamente 0,5g do combustível a ser analisado é pesada num cadinho e, posteriormente, colocada no reator do calorímetro, chamado bomba calorimétrica. As medições e cálculos do PCS estão padronizados com as normas NBR 8633 (ABNT, 1984).

A composição elementar, ou seja, carbono, hidrogênio e oxigênio dos resíduos lignocelulósicos foi determinada através de um analisador da marca Elementar®.

Foi realizada análise de variância e as médias foram comparadas através do Teste de Tukey, a 95% de probabilidade, com auxílio do software estatístico SISVAR. Para verificar a relação entre o PCS e as propriedades físico-químicas, bem como entre o PCS e a composição elementar de cada resíduo foi realizada análise de correlação de Pearson entre essas variáveis. Verificada correlação significativa, foram ajustadas regressões lineares entre o PCS e as demais variáveis de interesse.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Densidade básica e densidade a 0%

Na Tabela 1 encontra-se a análise de variância realizada para o ensaio de densidade básica e de densidade a 0% dos resíduos analisados.

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância realizada para a densidade básica e densidade a 0% dos resíduos lignocelulósicos.

FV	GL	QM	
		DB	DO
RL	3	0,028908	202,63*
Erro	8	0,05593	17,58*
CV(%)		5,53	7,88

FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; Fc: valor de F calculado; CV (%): coeficiente de variação experimental; DB: densidade básica; D0: Densidade a 0%; RL: resíduos celulósicos; e\*: significativo a 95% de probabilidade pelo Teste F.

Observa-se que o efeito dos resíduos avaliados foi significativo para ambas as densidades. Também é possível observar que o experimento foi bem conduzido, uma vez que os coeficientes de variação experimental foram de 5,53% e de 7,88%, considerados baixos para esse tipo de análise (PIMENTEL-GOMES, 2005).

Na Tabela 2 encontra-se o teste de comparação múltipla realizado para a densidade básica e densidade a 0% dos diferentes tipos de biomassa residual avaliada.

**Tabela 2.** Médias de densidade básica e de densidade a 0% dos resíduos lignocelulósicos

RESÍDUOS	DB (g.cm-3)	D0 (g.cm-3)
Casca de Pinhão Manso	0,124 A	0,572 A
Casca de Mamona	0,181 B	0,687 A
Casca de Amendoim	0,205 B	0,705 A
Casca de Macaúba	0,354 C	0,901 B

Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 95% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Observa-se que a casca de macaúba apresentou a maior densidade básica (0,354 g.cm-3) e a casca de pinhão manso a menor (0,124 g.cm-3). Quanto maior a densidade da biomassa, maior será a quantidade de material por volume, o que resultaria em maior produção de bioenergia por volume de resíduo queimado. Protásio et al. (2010), avaliando a viabilidade do aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, encontraram valores de densidade básica variando de 0,078 a 0,249 g.cm-3 para resíduos de cedro australiano, casca e pergaminho de café. A casca de macaúba apresentou densidade básica maior que os resíduos avaliados pelos autores.

Observa-se que o efeito dos resíduos, da mesma forma que para densidade básica, foi significativo para a densidade a 0% de umidade. Da mesma forma que para a densidade básica, a casca de macaúba apresentou maior valor de densidade a 0% (0,901 g.cm-3) e a casca de pinhão manso o menor valor (0,572 g.cm-3). Entretanto, nota-se que estatisticamente as cascas de pinhão manso, mamona e amendoim apresentaram densidade a 0% equivalentes estatisticamente.

### 3.2. Teor de minerais e poder calorífico superior

A Tabela 3 apresenta o resumo da análise de variância obtida com os dados de PCS e TM coletados. Verifica-se que houve diferença estatística entre os resíduos em estudo a 95% de probabilidade para as duas variáveis. Nota-se ainda o baixo valor do coeficiente de variação experimental, o que indica alta precisão do experimento (PIMENTEL-GOMES, 2005).

**Tabela 3:** Resumo da análise variância para o PCS e TM dos resíduos agrícolas.

FV	GL	QM	
		PCS	TM

Resíduos	3	802174,53*	248,83*
Erro	1	1398,525	0,192
CV(%)		0,88	4,31

FV: Fonte de variação, GL: Graus de liberdade, QM: Quadrado médio, CV(%): Coeficiente de variação experimental; PCS: poder calorífico superior; TM: teor de minerais; e\*: Valor significativo a 95% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 4 encontram-se as médias obtidas para PCS e TM, juntamente com o resultado do teste de comparação múltipla realizado pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

**Tabela 4:** Médias dos valores de poder calorífico superior (PCS) e dos teores de minerais (TM), com o teste de comparação múltipla.

Resíduos	PCS (cal.g-1)	TM (%)
Pinhão manso	3822,6 A (0,95)	18,290 D (8,82)
Mamona	4022,2 B (0,48)	13,716 C (1,54)
Amendoim	4607,6 C (0,86)	5,496 B (2,48)
Macaúba	4595,6 C (1,03)	3,174 A (5,60)

PCS (cal.g-1): poder calorífico superior; TM (%): teor de minerais.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 5% pelo teste de Tukey; (e): Coeficiente de variação (%).

A casca de macaúba, de amendoim, de mamona e de pinhão manso apresentaram teor de minerais de 3,17, 5,49, 13,17 e 18,29%, respectivamente.

O PCS variou de 3822 a 4607 cal.g-1 sendo o menor valor determinado para casca de pinhão manso e o maior para casca de amendoim e que foi equivalente estatisticamente ao de macaúba.

Os teores de minerais encontrados para os resíduos são elevados em comparação as madeiras comumente utilizadas para geração de energia como as do gênero *Eucalyptus* sp. Trugilho et al. (1996) estudando madeira de *Eucalyptus* em diferentes idades encontraram teores em minerais em torno de 0,5%. Já Protásio et al. (2010), caracterizando resíduos lignocelulósicos e avaliando a viabilidade energética dessa biomassa, encontraram valores de TM de 6,82 e 4,92, para resíduos da colheita de milho e casca de café, respectivamente.

Vale et al. (2000), trabalhando com culturas de *Eucalyptus grandis* sob diferentes adubações, verificaram que sua madeira apresentou PCS médio de 4650 cal.g-1, valor próximo ao poder calorífico superior das cascas de macaúba e de amendoim. Protásio et, al. (2010), encontraram valores médios de 4606 e 4515 cal.g-1 para resíduos do processamento dos grãos de café e da colheita do milho, respectivamente.

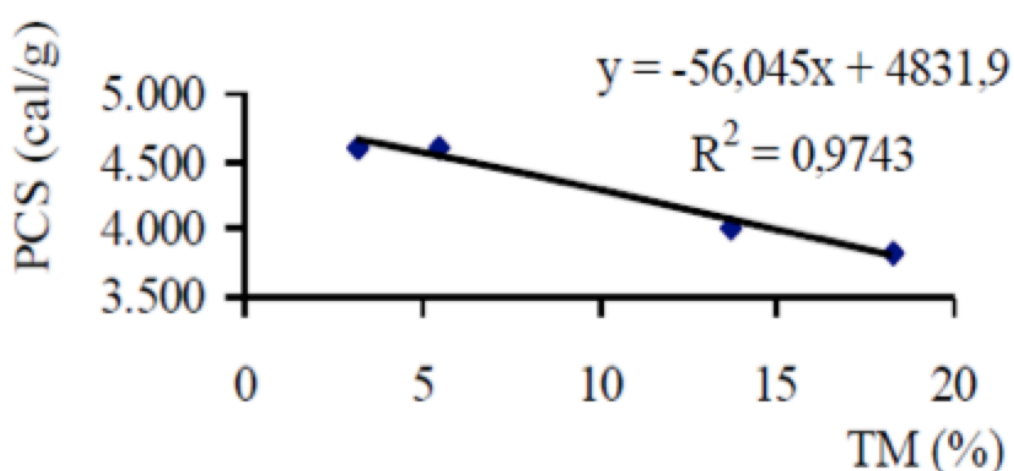
### 3.3 Relação entre o PCS e as propriedades físico-químicas dos resíduos

Na Tabela 5 é apresentada a correlação de Pearson entre o PCS e as propriedades físico-químicas dos resíduos. Verificou-se correlação significativa entre o PCS e a TM, com coeficiente de correlação de -0,987.

**Tabela 5:** Correlação de Pearson entre PCS e as propriedades físico químicas dos resíduos.

	DB	DO	PCS	TM
DB	1			
DO	0,994*	1		
PCS	0,781	0,773	1	
TM	-0,870	-0,860	-0,987*	1

A Figura 1 apresenta a relação funcional entre PCS e TM, pode-se notar um alto ajuste do modelo linear ( $R^2=0,97$ ) e uma correspondência de grandezas entre as variáveis avaliadas. O alto coeficiente de determinação infere que a reta média representa bem a variação do PCS em função da variação do TM.



**Figura 1.** Relação entre PCS e TM dos resíduos agrícolas avaliados.

Avaliando o modelo linear proposto percebe-se que quanto maior o teor de minerais menor a energia liberada durante a combustão completa da biomassa. Isso ocorre porque os minerais (matéria inorgânica) não liberam energia durante a queima.

### 3.4. Relação entre o PCS e componentes elementares dos resíduos

Na Tabela 6 encontram-se as médias obtidas para o PCS e os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio. Avaliando o coeficiente de variação entre os ensaios realizados nota-se relativa heterogeneidade no poder calorífico superior, teor de carbono e oxigênio dos resíduos lignocelulósicos. Observa-se ainda uma correspondência de grandezas entre as variáveis analisadas.

**Tabela 6.** Poder calorífico superior e análise elementar dos resíduos

Resíduos	PCS	C (%)	H (%)	O (%)
Amendoim	4607,6	46,14	5,84	46,09
Mamona	4022,2	40,76	5,18	51,73
Pinhão Manso	3822,6	39,01	5,34	54,35

Macaúba	4595,6	46,42	5,78	47,21
CV (%)	9,40	8,73	5,87	7,76

PCS: poder calorífico superior (cal/g); C(%): teor de carbono; H (%): teor de hidrogênio;

O (%): teor de oxigênio; CV (%): coeficiente de variação.

Na Tabela 7 encontram-se as correlações lineares de Pearson realizadas entre o PCS e os componentes elementares da biomassa residual analisada.

**Tabela 7.** Correlações lineares de Pearson entre o PCS e os componentes elementares.

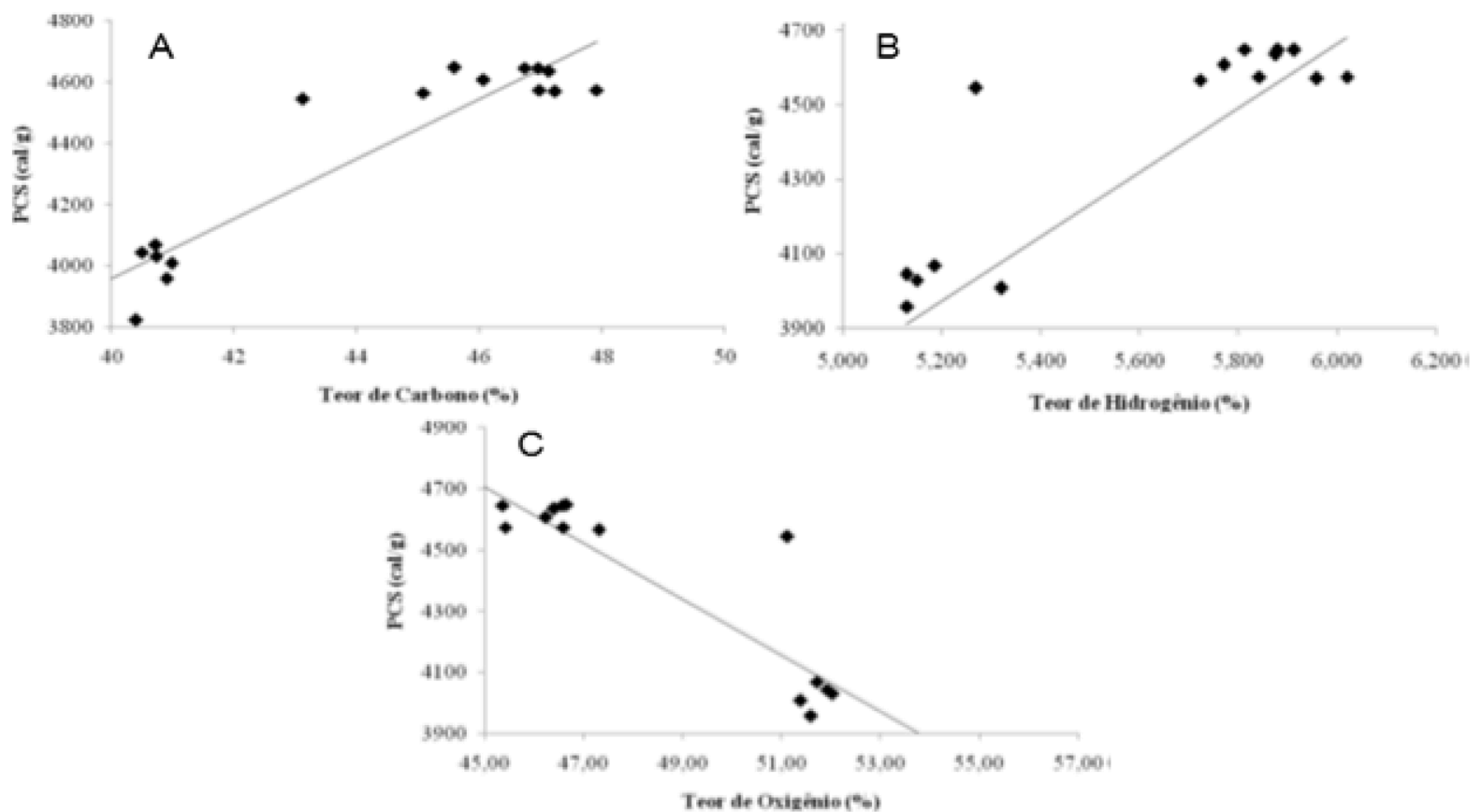
PCS	C	H	O
	0,96	0,80	-0,94

PCS: poder calorífico superior (cal/g); C(%): teor de carbono; H (%): teor de hidrogênio;

O (%): teor de oxigênio.

Observa-se correlação linear de Pearson significativa e positiva entre o PCS e o teor de carbono e entre o PCS e o teor de hidrogênio. Isso indica que há uma tendência de maiores valores de PCS estarem associados a maiores valores de carbono e hidrogênio. Essa relação já era esperada, uma vez que, o carbono é o principal constituinte da biomassa vegetal e o hidrogênio é um elemento altamente energético e contribui ativamente para a quantidade de energia liberada na combustão completa da biomassa vegetal. A correlação linear encontrada entre o PCS e o teor de oxigênio também foi significativa, mas negativa, o que indica que essas variáveis são inversamente proporcionais, ou seja, maiores valores de PCS estão associados a menores valores de oxigênio. Resultado semelhante foi obtido por Protásio et al. (2010), que encontraram correlação linear positiva entre o PCS e o carbono e negativa entre o PCS e o oxigênio, avaliando o carvão vegetal de *Eucalyptus* sp.

Na Figura 2 (A/B/C) são apresentados os gráficos do PCS em função do teor de cada constituinte elementar das biomassas avaliadas. Observam-se as tendências já discutidas anteriormente.



**Figura 2.** PCS em função dos constituintes elementares da biomassa avaliada. A: PCS e poder calorífico superior; B: PCS e teor de hidrogênio; C: PCS e teor de oxigênio.

## 4. Conclusões

A casca de macaúba apresentou a maior densidade básica média (0,354 g.cm<sup>-3</sup>) e também a maior densidade a 0% (0,901 g.cm<sup>-3</sup>). Portanto, existe grande potencial de aproveitamento desse resíduo, pois fatores econômicos, como o transporte da biomassa, são essenciais para a viabilidade do aproveitamento energético da biomassa;

Os resíduos apresentaram elevados teores de minerais, sendo que o poder calorífico superior das cascas de macaúba e amendoim apresentaram valores próximos aos de espécies comumente utilizadas na geração de bioenergia.

Os resíduos oriundos da macaúba e do amendoim apresentaram maiores valores em PCS e menores valores em TM, portanto apresentam melhor qualidade para geração de bioenergia quando comparadas aos resíduos de mamona e pinhão manso.

Encontrou-se correlação significativa entre o poder calorífico superior e os teores dos constituintes elementares da biomassa residual avaliada, sendo positiva para teores de carbono e hidrogênio e negativa para o teor de oxigênio. Esses resultados indicam que os resíduos lignocelulósicos ideais para a produção de bioenergia são aqueles com alto teor de carbono e hidrogênio e baixo teor de oxigênio.

## Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8633: Carvão Vegetal – determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel/ABTCP, Normas técnicas. São Paulo, ABTCP, 1974.

AZZINI, A. et al. Curva de Maturação da *Crotalaria juncea* L. em função da densidade do caule. **Bragantia**, Campinas, v. 40, n. 1, p. 1-10. 1981.

CASTILHO, E.; ALZOLA, A. Utilización de biomasa: determinación del poder calorífico de los conos de três especies forestales cubanas. **Revista Florestal**, Baracoa, v. 18, n. 2, p. 117-120. 1988.



- Dourado, D.C. Estudo de fibrocimento com resíduos de pneu. 2015. 83p. **Tese (Doutorado)** – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- DOURADO, D.C.; Poder calorífico e análise elementar de pneus automobilísticos inservíveis e de frutos da macaubeira. 2011. 86p. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- PEREIRA, S. J. et al. Celulose de tucum (*Bactris inundata*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 130-140. 2004.
- PIMENTEL-GOMES. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 451 p, 2009.
- PIMENTEL-GOMES. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 451 p.2009.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Aproveitamento e caracterização de resíduos da biomassa agrícola e florestal visando a produção de energia. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA E BIOTECH FAIR, 5., 2010, Curitiba. Anais...Curitiba: Centro de Eventos FIEP, CD-ROM,2010.
- Protocolos Analíticos. Disponível em: <<http://www6.ufrgs.br/agronomia/disciplina/substrato/metodologia.htm>>. Acesso em: 31 jul. 2016.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. & MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna. Revista Cerne v.2, p. 94-11, 1996.
- VALE, A.T. et al. Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden e Acacia mangium Willd em diferentes níveis de adubação. Revista Cerne, v.6, n.1, p.83-88, 2000.
- DE SOUZA, V. H. A., DOS SANTOS, L. T., CAMPOS, A. F., & CAROLINO, J. Um panorama do biodiesel no brasil e no mundo: esforços para a ampliação do setor e desafios. **Revista Augustus**, v. 21, n. 41, p. 117-130, 2016.
- CASTELLANELLI, C.A. & CUNHA, L.M. The round tables and the process of land grabbing: Aspects of governance on the social seal of the national program for production and use of biodiesel. Revista Espacios. Vol. 36, Pag. 12, (Nº 18), 2015.
- CREMONEZ, P. A.; FEROLDI, M., NADALETI, W. C., ROSSI, E., FEIDEN A., CAMARGO M. P. , CREMONEZ F. E., KLAJN F. F. Biodiesel production in Brazil: current scenario and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 415-428, 2015.

- 
1. Professor do Departamento Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste. Email: [davidssp@yahoo.com.br](mailto:davidssp@yahoo.com.br)
  2. Mestrando em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-oeste.
  3. Professor do Departamento Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste
  4. Professor do Departamento Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste
  5. Professor do Departamento Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste.
  6. Professor do Departamento Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste
- 

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015  
Vol. 38 (Nº 26) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](mailto:webmaster)]