



**EDSON RUBENS DA SILVA LEITE**

**MADEIRA E CARVÃO DE *Coffea arabica* L.:  
CARACTERIZAÇÃO PARA USO ENERGÉTICO**

**LAVRAS – MG**

**2013**

**EDSON RUBENS DA SILVA LEITE**

**MADEIRA E CARVÃO DE *Coffea arabica* L.: CARACTERIZAÇÃO  
PARA USO ENERGÉTICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração processamento e utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado

**LAVRAS - MG**

**2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Leite, Edson Rubens da Silva.

Madeira e carvão de *Coffea arabica* L. : caracterização para uso energético / Edson Rubens da Silva Leite. – Lavras : UFLA, 2013.  
159 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Sebastião Carlos da Silva Rosado.

Bibliografia.

1. Biomassa. 2. Bioenergia. 3. Resíduo da cafeicultura. 4. Carvão vegetal. 5. Biocarvão. 6. Pirólise. I. Universidade Federal de Lavras.  
II. Título.

CDD – 674.1

**EDSON RUBENS DA SILVA LEITE**

**MADEIRA E CARVÃO DE *Coffea arabica* L.: CARACTERIZAÇÃO  
PARA USO ENERGÉTICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração processamento e utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 9 de Maio de 2013.

Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dr. Alfredo Napoli	CIRAD – MONTPELLIER-FRANÇA
Dr. Rubens José Guimarães	UFLA
Dr. Leandro Carlos Paiva	IFSULMINAS- CAMPUS MACHADO

Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2013**

A Deus, por todas as vitórias alcançadas em minha vida.

**OFEREÇO.**

À minha esposa Glaucia , às minhas filhas, Gleice Caroline, Giovana Carine e Geane Cristine pelo apoio e compreensão e por serem meu alicerce.

Ao Sr. Pedro e Isaura, por estarem presente nos momentos importantes da minha vida.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre nos faz triunfar em Cristo e, por meio de nós, manifesta em todo lugar o seu conhecimento.

À Gláucia, por estar sempre ao meu lado com amor, carinho, paciência e dedicação e que sempre me incentivou a prosseguir.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas, Campus Machado (IFSULMINAS), pela liberação e apoio.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

Ao Thiago de Paula Protásio, que não foi apenas um parceiro, mas um amigo e exemplo de dedicação e seriedade com a qual conduz seus trabalhos, e com seu entusiasmo em contribuir com a ciência que nos contagia. Muito obrigado pelo apoio e incentivo.

Ao professor Sebastião Carlos da Silva Rosado pela sua orientação e apoio em todos os momentos.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho pelos seus ensinamentos e orientação que foram relevantes para realização deste trabalho.

Ao professor José Reinaldo pelos conhecimentos repassados que foram relevantes para o meu crescimento profissional.

Ao professor Giovane Francisco Rabelo, pela amizade e apoio ao desenvolvimento da pesquisa e a todos com os quais tive o privilégio de conviver no departamento de engenharia (CEDIA).

Ao professor Lourival Mendes e ao Wilson (Melão) pela acolhida e apoio junto ao UEPAM.

Aos professores Akira e José Tarcísio, pelos conhecimentos repassados e pela disposição em ceder seus laboratórios para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Alfredo Napoli e ao Cirad pelo apoio no Seminário de energia da biomassa “EnerBiomassa’12”, promovido pela Secretaria de Estado do Planejamento e

do Desenvolvimento Econômico (Seplande) e Prospective 2100, realizado em Maceió-AL.

Aos funcionários do Departamento de Ciência Florestais em especial ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Claret e Cristiane Rodrigues Carvalho, pelo auxílio imprescindível nas atividades do cotidiano.

Ao Senhor Sebastião Supriano Miranda (Tião Caixa-d'água), pela sua ajuda técnica e pela sua disposição em ajudar a todos.

Ao Allan Motta pela amizade e auxílio no início das etapas experimentais, que foram importantes para conclusão deste trabalho.

Aos produtores, Alex Nanetti e Luiz Adalto de Oliveira pelo fornecimento da madeira do cafeeiro que muito contribuiu para este estudo.

Ao Rafael Farinassi, Fabio Satoshi e ao Ricardo pelo privilegio que tive em conviver e pela boa convivência.

Ao Pastor Rocha e toda sua equipe pela amizade e pela ministração da palavra de Deus que sempre iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço a todos que colaboraram de forma direta ou indireta na execução deste trabalho.

“..... Cristo, no qual estão escondidos todos os  
tesouros da sabedoria e da ciência.”

Colossenses 2.2,3

## RESUMO GERAL

Atualmente, também, os resíduos agrícolas são considerados como potenciais fontes de energia, além de poderem contribuir para o desenvolvimento econômico de comunidades rurais. Resíduos agrícolas atraem o interesse como matéria prima para geração de energia em toda parte do mundo, seja como lenha ou como matéria prima para carbonização ou, ainda, em briquetes. Estes resíduos, geralmente, estão disponíveis em grandes quantidades nas áreas de produção. Este estudo foi realizado com os objetivos de avaliar a qualidade e o potencial energético da madeira e do carvão vegetal do cafeeiro, além de verificar a influência do sistema de cultivo (convencional, orgânico e agroflorestal) e da cultivar (Mundo Novo e Catuaí) na geração de bioenergia. Foram utilizadas madeiras de *Coffea arabica* L. provenientes de três sistemas de cultivo (agroflorestal, convencional e orgânico) e de duas cultivares distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos, ou seja, os cafeeiros agroflorestal natural Mundo Novo (NtMN), agroflorestal natural Catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional Catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico Catuaí (OrgC). Foram amostradas, aleatoriamente, quatro plantas, com idade de aproximadamente 10 anos, resultando em 24 arbustos abatidos. Foram quantificados os teores dos componentes elementares (C, H, N, S e O), de cinzas, lignina, extrativos totais e holocelulose, a densidade básica, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior, o poder calorífico superior e inferior volumétricos das madeiras analisadas. Para avaliação da qualidade do carvão vegetal do cafeeiro, foram quantificados os teores dos componentes elementares (C, H, N, S e O) a cinzas, a densidade relativa aparente, a densidade relativa verdadeira, o estoque de carbono fixo, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior, o poder calorífico superior e inferior volumétricos, além do rendimento em carvão, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e a porosidade do carvão cafeeiro. Verificou-se que as madeiras ConvC, ConvMn e NatC, destacaram-se em razão dos elevados valores de poder calorífico volumétrico, densidade básica, teor de lignina e poder calorífico superior, para produção de bioenergia. Para a produção do carvão vegetal, verificou-se que os sistemas orgânico e convencional com a cultivar Catuaí se destacaram para o uso siderúrgico e energético, principalmente, pelos maiores valores de densidade relativa aparente e energética, estoque em carbono fixo, rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo.

Palavras-chave: Biomassa. Pirólise. Combustão. Bioenergia. Resíduo do cafeeiro.

## GENERAL ABSTRACT

Currently, agricultural residues are also considered as potential energy sources, in addition to the possibility of contributing to the economic development of rural communities. Agricultural residue attracts interest as raw material for power generation all over the world, whether as firewood or as raw material for carbonization, or even in

briquettes. These residues are usually available in large quantities in production areas. This study aimed at evaluating the quality and energetic potential of coffee wood and coal, as well as verifying the influence of the cultivating system (conventional, organic and natural agroforestry) and of the cultivar (Mundo Novo and Catuaí) in the generation of bioenergy. *Coffea arabica* L. wood derived from the three cultivating systems and both varieties were used, in a total of six treatments, i.e. *Coffea* natural Mundo Novo (NtMN), natural Catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional Catuaí (ConvC), organic Mundo Novo (OrgMN) and organic Catuaí (OrgC). Four plants, aged approximately 10 years, were randomly sampled, resulting in 24 killed shrubs. The levels of elementary components (C, H, N, S and O), ash, lignin, total extractives and holocellulose, basic density, superior calorific value, inferior calorific value, superior and inferior volumetric calorific values of the analyzed woods were quantified. For the evaluation of coffee charcoal quality, levels of elementary components (C, H, N, S and O), ash, apparent relative density, true relative density, fixed carbon stock, superior calorific value, inferior calorific value, superior and inferior volumetric calorific values, as well as coal yield, pyroligneous liquid, non-condensable gasses and coffee charcoal porosity were quantified. We verified that ConvC, ConvMn and NatC stood out due to high volumetric calorific values, basic density, lignin content and superior calorific value, for bioenergy production. For charcoal production, we found that the organic and conventional systems with the Catuaí cultivar stood out for steelmaking and energetic use, especially for the larger apparent and energetic relative density, stock in fixed carbon, charcoal and fixed carbon yield values.

Keywords: Biomass. Pyrolysis. Combustion. Bioenergy. Coffee residue.

## SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	11
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	15
2.1 A biomassa como fonte energética .....	15
2.2 O combustível: Madeira e carvão vegetal.....	15
2.2.1 A madeira .....	16
2.2.2 Carvão vegetal.....	18
2.3 Processos de conversão de biomassa em combustíveis .....	19
2.3.1 Pirólise de biomassas.....	19
2.3.2 Os processos de combustão da biomassa .....	20
2.4 O cafeeiro ( <i>Coffea arabica</i> , L) .....	22
2.4.1 O parque cafeeiro e região cafeeira .....	22
2.4.2 Fotossíntese e Biomassa Cafeeira.....	25
2.4.3 O Cultivo de café.....	26
2.4.4 Macronutriente e o teor de cinzas dos cafeeiro .....	27
REFERÊNCIAS.....	29
SEGUNDA PARTE - ARTIGOS.....	35
ARTIGO 1 Avaliação da qualidade da madeira de <i>Coffea arabica</i> L. como fonte de bioenergia .....	35
ARTIGO 2 A madeira de <i>Coffea arabica</i> L. como fonte de bioenergia em diferentes sistemas de cultivos e cultivares.....	61
ARTIGO 3 Avaliação da qualidade do carvão vegetal de <i>Coffea arabica</i> L. como fonte de bioenergia, procedente de diferentes sistemas de cultivos e cultivares.....	93
ARTIGO 4 Análise química elementar e imediata do carvão vegetal de <i>Coffea arabica</i> L. em diferentes sistemas de cultivos e cultivares .....	127
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	157

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

A determinação das propriedades de biomassas é fundamental para o entendimento dos processos de conversão que a utilizam, bem como para o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de transformar a energia contida na biomassa de maneira eficiente e ambientalmente amigável. Atualmente, também, os resíduos agrícolas são considerados como potenciais fontes de energia, além de poderem contribuir para o desenvolvimento econômico de comunidades rurais.

Resíduos agrícolas atraem o interesse como matéria prima para geração de energia em toda parte do mundo, seja como lenha ou como matéria prima para carbonização ou, ainda, em briquetes. Estes resíduos, geralmente, estão disponíveis em grandes quantidades nas áreas de produção. A utilização destes resíduos, no entanto, recebe a crítica de que pode causar as desvantagens de remover materiais orgânicos e causar o empobrecimento dos solos e de aumentar a necessidade de fertilizantes artificiais. Apesar das restrições, existem algumas situações em que o uso de resíduos agrícolas é bastante viável. A falta de conhecimento tecnológico para produção de energia a partir dos resíduos agrícolas é outro ponto a ser destacado. À medida que avançam as pesquisas nesta área e novos processos de utilização de biomassa são desenvolvidos, respeitando o meio ambiente, novos paradigmas são criados e a procura por biomassa tende a aumentar em vários países.

Protásio et al. (2013), com a finalidade de analisar o potencial energético da madeira de *Eucalyptus*, cedro australiano e pinus, além dos resíduos agrícolas como casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, casca de café e resíduos de colheita de milho (sabugo, palha, ramos e folhas), encontraram na casca de café a maior densidade energética entre os materiais estudados. Resultado surpreendente, considerando que os resíduos agrícolas, geralmente, possuem menor densidade energética em comparação com os materiais madeireiros. Este resultado mostra a importância de novos estudos a respeito dos resíduos agrícolas e da biomassa em geral, o que contribui para substituir combustíveis fósseis por renováveis, além de diminuir as preocupações do aquecimento

global, promovida em fontes de CO<sub>2</sub> neutro por causa do seu curto tempo de regeneração, pois o CO<sub>2</sub> produzido durante a combustão, é incorporado rapidamente.

Com o objetivo de diminuir o impacto ambiental, muitas pesquisas estão sendo feitas com a co-utilização do carvão e biomassa (JONES et al., 2005; KERN et al., 2012; KUBACKI et al., 2012), muitas dessas biomassas empregadas são resíduos agrícolas.

A biomassa é responsável por dois terços das energias renováveis na Europa e as tendências atuais parecem confirmar esta predominante posição. Isto significa que um considerável crescimento é esperado para o setor, para cumprir as metas da união europeia que é de reduzir em 20% em emissões de gases de efeito estufa (GEE) e possuir uma percentagem de 20% em energia renováveis na matriz energética até 2020 (BECIDAN et al., 2012).

Com relação à energia renovável, o Brasil tem uma matriz energética invejável (47,49%) e os produtos da cana de açúcar, a hidráulica e lenha com 40,57%, 28,80% e 21,65%, respectivamente (BRASIL, 2012), compõem esta matriz. O Brasil, regionalmente, possui resíduos agrícolas com potencial energético como, por exemplo, a casca de arroz no sul, o babaçu no norte e a casca de café no sudeste do país.

Biomassa inclui uma grande variedade de combustíveis com diferentes composições químicas e com características de combustão diversas.

A madeira, por exemplo, tem pouca fração de cinzas e, raramente, causa problemas em caldeiras, enquanto as palhas e gramíneas contêm elevadas concentrações de metais alcalinos e cloro. A maioria dos combustíveis de biomassa tem, relativamente, baixas concentrações de enxofre em comparação com o carvão mineral (NIELSEN et al., 2000).

A maioria do calor e eletricidade gerada, a partir da biomassa, é produzida em sistemas térmicos que utilizam a combustão. No entanto, há desafios como corrosão, incrustações e emissões de poluentes (NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>), além do problema das cinzas. Com respeito à corrosão das superfícies de transferência de calor, os resíduos agrícolas tais como as palhas e capins, por exemplo, possuem um alto teor de potássio e cloro, que são elementos potencialmente prejudiciais em relação à corrosão das superfícies de transferência de calor (SAENGER et al., 2001).

Segundo Becidan et al. (2012), há uma variedade de soluções para resolver tais problemas como ligas resistentes à corrosão e revestimentos de melhor qualidade, além de melhores métodos de limpeza e a utilização de aditivos. Tais aditivos são substâncias químicas que podem atenuar a corrosão.

Para Nielsen et al. (2000), é evidente que o cloro, sob algumas concentrações, pode causar corrosão acelerada, resultando em aumento da oxidação e o desperdício de metal. Para esses pesquisadores a corrosão causada pelo cloro está intimamente ligada a metais alcalinos.

Além da combustão direta e a co-utilização da biomassa com carvão mineral, tem-se na literatura um novo conceito para o carvão vegetal o Bio-carvão. Existem várias linhas de evidência de que o carvão desempenha um papel importante na fertilidade do solo pelo elevado potencial de retenção de nutriente. A pirólise com o bio-carvão pode oferecer uma opção para reduzir a crítica ao uso de resíduos agrícolas e, também, o conflito entre o cultivo de culturas para diferentes fins, por exemplo, energia versus sequestro de carbono ou energia versus alimentos (NOVAK et al., 2009).

A demanda por biomassa tem aumentado, não somente motivada pelos aumentos do preço de petróleo e pela exigência de mudanças climáticas, mas também pelo desenvolvimento de novas técnicas ou melhoria de processos ao usá-la. Entre esses processos de melhorias está a compactação de resíduos em um produto de maior densidade do que a matéria prima original, conhecido como densificação ou briquetagem. A biomassa briquetada pode substituir algum carvão em usinas de energia, o que reduz as emissões de carbono e efeito estufa (PANWAR; PRASAD; WASEWAR, 2011).

Portanto, seja como lenha, carvão, briquete ou pellets o resíduo agrícola tem muito a contribuir para geração de energia sem agredir o meio ambiente e reduzir a dependência por combustíveis fósseis.

Entre os resíduos agrícolas, o café se destaca por ser a bebida mais consumida no mundo e a maior commodity negociada, depois do petróleo, e em função da grande procura deste produto, grandes quantidades de resíduos são gerados (MUSSATTO et al., 2011). A produção mundial de café, em 2012, atingiu 144.061 milhões de sacas de 60 kg em todo mundo, sendo o Brasil o maior produtor (35,28%) que, juntamente com Vietnã

(15,27%), produzem a metade de todo café produzido no mundo (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - OIC, 2012).

O modelo de cafeicultura, adotado no Brasil, desde o início do século XIX, caracteriza-se pelo monocultivo a pleno sol, mas o cafeeiro pode ser cultivado em consórcio com árvores, os agroflorestais, a exemplo dos cafeeiros da Colômbia, Venezuela, Costa Rica, México, Nicarágua e Panamá (LOPES et al., 2012).

Portanto, este trabalho objetiva-se em caracterizar a madeira e o carvão vegetal do cafeeiro para fins energéticos, além de verificar a influência do efeito sistema de cultivo (natural agroflorestal, orgânico e o convencional) e o efeito de duas cultivares (Catuaí e Mundo Novo) na geração de energia.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 A biomassa como fonte energética**

Biomassa é um termo utilizado para designar toda matéria orgânica derivada de plantas e animais. Segundo Basu (2010), nos Estados Unidos existem muitas definições para o termo biomassa. Como biomassa renovável, o autor cita que biomassa é material vegetal, incluindo resíduos colhidos ou recolhidos de produção ativa de terras agrícolas. Logo, pode-se considerar como biomassa as plantas, como a cana de açúcar, árvores, como o pinus e o eucalipto, bem como os resíduos do processamento de produtos agrícolas como as cascas de café e arroz, fezes de animais e resíduos orgânicos domiciliares e industriais (SILVA, 2012).

O uso de combustíveis de biomassa fornece benefícios substanciais na medida em que o meio ambiente seja afetado. Biomassa absorve o dióxido de carbono, durante o crescimento e emite-o durante a sua combustão. Utilização de biomassa como combustível para produção de energia oferece a vantagem de um combustível renovável e neutro em CO<sub>2</sub>.

### **2.2 O combustível: Madeira e carvão vegetal**

No Brasil, a biomassa é constituída em grande parte pela madeira, onde o uso se divide em produção de carvão vegetal (carbonização) e consumo direto (combustão) (VALE; BRASIL; LEÃO, 2002).

Embora no balanço energético nacional a oferta de lenha e carvão tenha diminuído ao longo dos anos, individualmente, observa-se pela Figura 1, que tanto a produção de lenha como de carvão vegetal no Brasil tem uma tendência de crescimento, certamente em razão do aumento da atividade industrial no Brasil. Esta tendência justifica a importância desse combustível para o país e a necessidade de novos produtos de maior densidade energética.

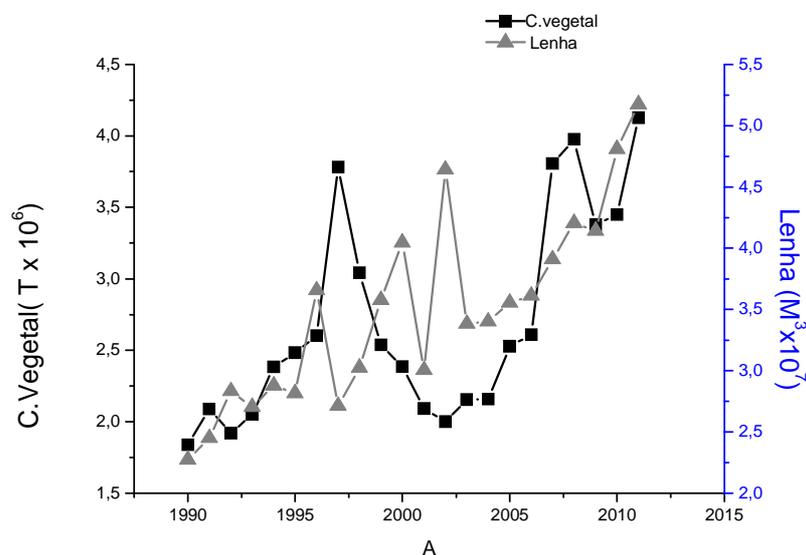


Figura 1 Produção de lenha e carvão vegetal no Brasil

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2013)

### 2.2.1 A madeira

A madeira é um material orgânico e os seus constituintes químicos estão diretamente relacionados com as suas propriedades químicas, físicas e energéticas. É composta, majoritariamente, por três compostos principais com estruturas características: celulose, hemiceluloses e lignina. A celulose é o principal componente da parede celular vegetal e pode ser considerado um polímero de alto peso molecular formado basicamente por moléculas de glicose. As hemiceluloses são polissacarídeos ramificados de baixo peso molecular que acompanha a celulose na parede celular, dando origem a uma estrutura chamada de holocelulose. Ao contrário da celulose, as hemiceluloses podem ser dissolvidas em água. A lignina é um polímero aromático de um sistema heterogêneo e ramificado, sem nenhuma unidade repetidora definida. É o elemento responsável por dar resistência à planta.

A lignina é diretamente responsável pela geração de carvão vegetal a partir da pirólise de biomassas (MOK et al., 1992). Existe, ainda, um quarto grupo chamado de extrativos, que é um grupo de menor expressão, composto por substâncias aromáticas, alifáticas nitrogenadas, glicosídeos, terpenos, carboidratos e esteroides. São responsáveis, por exemplo, pelo cheiro, cor e resistência natural ao apodrecimento.

Silva et al. (2005) encontraram em madeira de *Eucalyptus grandis* valores médios dos teores de holocelulose, lignina e extrativos de 69, 27 e 4%, respectivamente e verificaram que os teores de extrativos e lignina aumentaram com a idade, com maiores concentrações nos discos próximos da base. Verificaram, também, que o teor de holocelulose diminuiu com a idade, com maiores concentrações nos discos retirados nas regiões superiores do tronco.

Estes valores estão, relativamente, próximos aos encontrados na literatura para clones de eucaliptos. Na Tabela 1 estão apresentados alguns resultados de análise do conteúdo de componentes estruturais de biomassas obtidos em diversos trabalhos.

Tabela 1 Teores percentuais (em massa) de componentes estruturais de biomassas

Fonte	Biomassa	Hocelulose	Extrativo	Lignina
Neves et al. (2011)	Clones de Eucalyptus	66,23	4,12	29,5
Trugilho, Lima e Mori (2003)	Mad. de eucalipto	62,02	7,24	30,59
Demirbas e Demirbas (2004)	Sabugo de Milho	81,5	3,5	15
Telmo e Lousada (2011)	Pinus	57,4	12,7	30

Quanto à energia, a lignina é um componente desejável na conversão da madeira em carvão e seu teor e tipo são parâmetros importantes, do ponto de vista industrial. Isso porque, de modo geral, espera-se que quanto maior a proporção de lignina total e menor a relaçãoiringil/guaiacil, maior será a conversão em carvão vegetal, em função da maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas (SANTOS et al., 2012; SOARES, 2011).

Para a quantificação energética da biomassa, Quirino et al. (2004), descreveu que o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise química imediata são as propriedades importantes da madeira para sua utilização como combustível.

O poder calorífico é a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível ( $\text{kcal.kg}^{-1}$  ou  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ). Existe, também, o poder calorífico inferior, quando não se considera o calor latente do vapor d'água formado na combustão (BRAND, 2010).

O poder calorífico tem relação com os teores da química elementar que pode se expressar de forma positiva, com maiores teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio, além de baixos teores de cinzas (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011).

Os extrativos exercem importante papel na utilização da madeira, pois influenciam as suas propriedades físicas e energéticas.

### 2.2.2 Carvão vegetal

A madeira é a principal fornecedora de matéria prima para produção de carvão vegetal. Na literatura existem vários trabalhos, usando a análise elementar, para justificar o poder calorífico de várias biomassas, principalmente, do carvão vegetal (BABU, 2008; BILGEN; KAYGUSUZ, 2008), pois são produzidos no processo de pirólise e a concentração de carbono são superiores ao da biomassa in natura.

Para a produção de bioenergia é desejável que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio, cinzas e nitrogênio em virtude das relações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; HUANG et al., 2009; PROTÁSIO et al., 2011).

Altas proporções de hidrogênio ou oxigênio, em comparação com o carbono, geralmente, reduzem o valor da energia útil do carvão em função da menor energia útil mantida em ligações C-O do que em ligações C-C (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008). Para estes pesquisadores, a composição química do carvão influencia fortemente nos valores da exergia.

Exergia é um termo técnico na termodinâmica definida como o trabalho máximo derivada da energia. Portanto, o trabalho, ou o trabalho em si é exergia (FUKUDA, 2003) e está intimamente relacionado com o hidrogênio, oxigênio e carbono. Segundo Bilgen e Kaygusuz (2008), os especialistas em energia devem considerar a segunda lei, ou exergia na concepção de usinas a carvão.

## **2.3 Processos de conversão de biomassa em combustíveis**

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta, de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). Destaca-se aqui a pirólise e a combustão.

### **2.3.1 Pirólise de biomassas**

A pirólise é o processo pelo qual a biomassa é degradada, termicamente, em atmosfera inerte, convertendo a biomassa de baixa densidade energética ( $\sim 1,5 \text{ GJ/m}^3$ ) e outros materiais orgânicos em uma fração líquida (líquido pirolenhoso ou bio-óleo) com alta densidade energética ( $\sim 22 \text{ GJ/m}^3$  ou  $\sim 17 \text{ MJ/kg}$ ), uma fração sólida (carvão vegetal) com um alto conteúdo energético ( $\sim 18 \text{ MJ/kg}$ ) e uma fração gasosa que possui um conteúdo relativamente baixo de energia (LAIRD; BROWN; LEHMANN, 2009).

Segundo Bridgwater (2012), temperatura do reator entre  $400$  a  $500^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento maior que  $1^\circ\text{C. min}^{-1}$  e altos tempos de residência favorecem a produção de produtos sólidos.

Pirólise tem sido aplicada por milhares de anos para produção de carvão vegetal, mas é apenas nos últimos 30 anos que rápidas pirólises a temperaturas moderadas de cerca de  $500^\circ\text{C}$  e tempos de reação muito curtos, de até 2 s tornou-se de considerável interesse. Isto é porque o processo, diretamente, dá rendimentos elevados de líquidos de até 75% em peso, que podem ser usados diretamente numa variedade de aplicações ou utilizado como um portador de energia eficiente (BRIDGWATER, 2012).

A biomassa apresentam processos de degradação diferenciada. Wild et al. (2009) mostraram cinco etapas de degradação: A (secagem), B (transição vítrea/amolecimento), C (depolimerização e recondensação), D (devolatilização limitada e carbonização) e E (devolatilização extensiva e carbonização). A termodegradação dos principais compostos da biomassa tem comportamentos distintos. Nele as hemiceluloses mostram-se mais instáveis começando o processo de depolimerização ao redor de  $125^\circ\text{C}$ , a celulose apresenta o início de sua decomposição a partir de  $200^\circ\text{C}$ . Já a lignina passa por uma fase chamada de transição vítrea, onde se verifica o amolecimento de sua estrutura, processo que ocorre em torno de  $110$  a  $150^\circ\text{C}$ . A lignina, também, apresenta uma ampla faixa de decomposição térmica ( $220$  a  $400^\circ\text{C}$ ).

### **2.3.2 Os processos de combustão da biomassa**

A combustão é uma reação de oxidação que o combustível sofre, ocorrendo quando a quantidade de oxigênio é suficiente para transformá-lo em gases, deixando

como resíduo somente os óxidos minerais (cinzas). É uma reação francamente exotérmica, isto é, de liberação de energia. O carbono e o hidrogênio, no caso da madeira, combinam-se com o oxigênio, gerando grande quantidade de energia. Existem duas formas de combustão, a combustão completa (oxigênio em excesso) e combustão incompletas (presença controlada de oxigênio). A intensidade da combustão é medida, geralmente, pela presença de CO, que é um gás oxidável (BRIDGWATER, 2012).

Como descreveu Bridgwater (2012), a combustão gera como produto primário o calor, que, por meio das caldeiras encontram mercado na indústria de geração de calor e eletricidade.

A combustão da biomassa (madeira) apresenta diversas fases: pré-aquecimento, secagem, pirólise, ignição, queima com chama, extinção da chama e incandescência. A incandescência é um processo de queima sem chama, também, chamada de calcinação.

No processo de combustão da madeira. Primeiramente ocorre o pré-aquecimento até a sua superfície atingir a temperatura de vaporização da água contida na madeira. Forma-se, então, uma frente de vaporização que se propaga em direção ao centro da madeira. À medida que a madeira continua a ser aquecida, a sua superfície atinge uma temperatura acima da qual forma-se uma frente de reação de decomposição térmica chamada pirólise, com a consequente liberação de voláteis (uma mistura de hidrocarbonetos leves) e alcatrão (hidrocarbonetos pesados). Se a taxa de liberação de voláteis, durante a pirólise, for grande o suficiente para formar uma mistura combustível acima do seu limite inferior de inflamabilidade, então, vai existir uma fase de queima com chama, caso contrário somente ocorrerá a pirólise e, ao fim desta, a incandescência. Após a saída dos voláteis, a madeira transforma-se em carvão cuja composição depende da madeira e do fluxo de calor incidente.

O carvão em contato com o ar a alta temperatura passa, então, a sofrer um processo de oxidação (incandescência), formando principalmente CO e CO<sub>2</sub>. A oxidação pode ocorrer na superfície externa do carvão ou também no seu interior, dependendo das taxas de reação heterogênea e de difusão do oxigênio dentro da estrutura porosa do carvão.

As diferenças de constituição física (grau de porosidade, densidade, alinhamento das fibras, inclusões) e química (teores de umidade, resinas, aditivos, sais

minerais, celulose, hemicelulose, lignina) podem afetar, significativamente, as características de queima dos materiais celulósicos em suas várias fases (CASTRO, 2005).

## **2.4 O cafeeiro (*Coffea arabica*, L)**

No mundo existem cerca de 100 espécie de cafeeiros, das quais apenas duas são importantes economicamente: *Coffea arabica* L.(café arábica) e *Coffea canephora* Pierre (café robusta).

O cafeeiro é uma planta perene, dicotiledônea, de porte arbustivo ou arbóreo, de caule lenhoso de forma cilíndrica com casca cinzenta e rugosa, folhas persistentes, onduladas nos bordos e de coloração verde-acinzentada quando jovens e verde-brilhante quando adulta e flores brancas hermafroditas, pertencente ao gênero *Coffea*.

A espécie *Coffea arabica* tem altura média variando de 3 a 5 metros, podendo chegar a 10 metros. Seu tronco tem de 8 a 10 centímetros de diâmetro (PEREIRA, 2008).

### **2.4.1 O parque cafeeiro e região cafeeira**

Estima-se que a cafeicultura esteja presente em 1.700 municípios brasileiros, um total de 300 mil propriedades rurais gerando com isso empregos e renda.

O Brasil possui 5.749.032.100 de covas em produção e 1.038.447.500 de covas em formação, Minas Gerais contribui com 68,8% de covas em formação e 55,7% de covas em produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB,

2013). Na figura 2 pode-se visualizar como a produção cresceu desde o ano 2004, tanto nos ciclos de baixa como de alta produtividade.

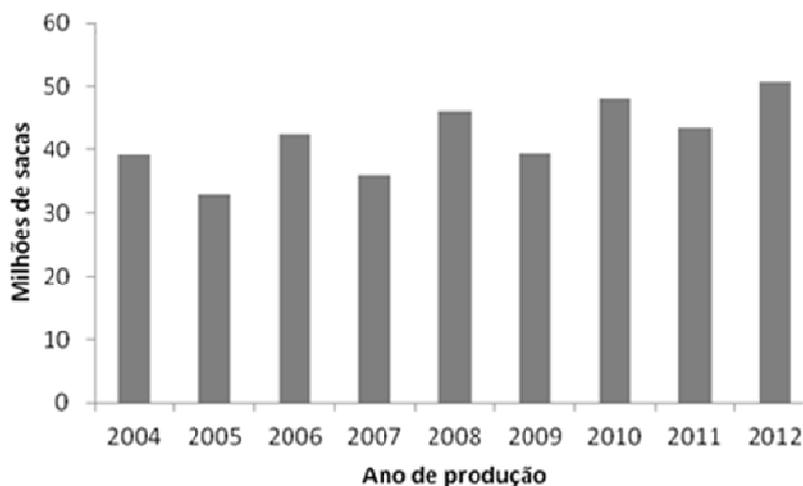


Figura 2 Produção em milhões de sacas no período de 2004 a 2012.

Fonte: CONAB (2013)

A área plantada com as espécies arábica e canephora no país totalizam 2.375,79 mil hectares. O resultado mostra um crescimento de 1,99% sobre a área de 2.329,36 hectares, existentes na safra 2012, ou seja, foram acrescentados 46.428,8 hectares. Em Minas Gerais está concentrada a maior área com 1.241,12 mil hectares, predominando a espécie arábica com 97,7%. A área total estadual representa 52,49% da área cultivada com café no país e, conseqüentemente, o primeiro do ranking nacional (CONAB, 2013).

Segundo Vieira et al. (2009), Minas Gerais produz café arábica a altitude média de, aproximadamente, 950 metros. As cultivares mais utilizadas são o Catuaí e o Mundo Novo. Em razão de aspectos climáticos, a região, também, é também produtora dos cafés tipo *gourmet*, cafés especiais que possuem nuances diferentes e se destacam pelo sabor diferenciado e pelo aroma mais acentuado. Por esta razão são considerados diferentes comercialmente e tornam-se muito valorizados no mercado. Com 70% da renda das propriedades rurais do Sul de Minas oriundas do café, percebe-se a importância dessa cultura na região. A região do município de Machado encontra-se

entre as mais importantes regiões cafeeiras do Sul de Minas, com uma cafeicultura caracterizada por estar num relevo acidentado e com predominância de produtores de médio porte.

#### **2.4.2 Fotossíntese e Biomassa Cafeeira**

A fotossíntese é o processo pelo qual as biomassas vegetais se originam. A fotossíntese é o processo bioquímico no qual o dióxido de carbono, “sequestrado” da atmosfera, reage com a água na presença de luz solar, produzindo um monossacarídeo (hexose) e liberando oxigênio para a atmosfera.

Pode-se dizer que a planta, por meio do processo de fotossíntese armazena a energia proveniente da luz solar. Uma vasta quantidade de biomassa cresce todos os anos, sequestrando dióxido de carbono da atmosfera e, quando queimada, ocorre a liberação do dióxido de carbono que havia sido previamente sequestrado.

A fotossíntese resulta na produção de carboidratos estruturais e não estruturais, compreendendo os tecidos da planta. Os componentes da biomassa incluem celulose, hemiceluloses, lignina, lipídio, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos. As concentrações de cada classe de compostos variam dependendo da espécie, tipo de tecido de planta, estágio de crescimento e condições de crescimento (JENKINS et al., 1998).

Amaral, Rena e Amaral (2006) concluíram que, no cafeeiro, existem flutuações na taxa fotossintética e que as flutuações na taxa fotossintética potencial não explicam as variações no crescimento, e a diminuição ocorrida na taxa pode estar relacionada com resistências bioquímicas nos cloroplastídios. Porém, Moraes, Marur e Caramori (2003), estudando as características fisiológicas e de crescimento do cafeeiro, constatou que baixo nível de radiação incidente sobre os cafeeiros sombreados com guandu resultou em decréscimos na taxa fotossintética e na transpiração, maior altura de planta, folhas maiores e com menor quantidade de matéria seca. Esses resultados indicam que o excesso de sombra afeta, drasticamente, a fisiologia e morfologia de *C. arabica*.

### 2.4.3 O Cultivo de café

Hoje em dia, café é economicamente cultivado no Brasil a pleno sol, em virtude de sua adaptação a esta condição gerando maior capacidade produtiva com base na química intensiva de fertilização (sistema convencional).

A cafeicultura orgânica desenvolveu no Brasil, também, a pleno sol, mas respeitando os princípios da agricultura orgânica que são: a não utilização de agrotóxicos, que desequilibram o agro ecossistema; os sistemas de produção orgânicos geram um equilíbrio solo/planta pelo uso da matéria orgânica, produzindo plantas mais resistentes às pragas e doenças.

Lopes et al. (2012) verificaram que o sistema convencional é extremamente dependente de fontes externas de insumos, principalmente, agroquímicos (fertilizantes e agrotóxicos). O sistema orgânico, também, utiliza insumos de fora da propriedade como o farelo de mamona, esterco de animais e produtos orgânicos industrializados. O sistema natural agroflorestal possibilita a produção de outros gêneros alimentícios que contribuem com a renda mensal da propriedade. O seu manejo caracteriza-se pela roçada da vegetação, utilização da palha de café própria e a arborização da lavoura. Na maioria dos países da América Latina, o cultivo do café ocorre em sistemas sombreados (sistema agroflorestais), com resultados satisfatórios no solo e melhoria no microclima e preservação do ecossistema (MORAIS et al., 2008).

A lenha é a principal fonte de energia para muitas pessoas na terra. Um estudo feito por Rice (2008), com produtores no Peru e na Guatemala, constatou que entre os produtores de café, mesmo tendo acesso a serviços elétricos, menos de 1 em 35, na verdade cozinha com eletricidade. Mesmo em áreas de café onde a intensificação do SAF tiver ocorrido, as árvores disponíveis (incluindo o cafeeiro) são exploradas como fonte de madeira. Rice (2008) lembra que o café sombreado perde em produtividade, mas pode se compensar com os produtos não café, como a lenha e materiais de construção, que podem representar um quinto a um terço do total realizado a partir do agroflorestal.

Morais et al. (2008), estudando a anatomia foliar em *Coffea arabica* sombreados com guandu (*Cajanus cajan*), em comparação ao cultivo a pleno sol,

concluiu que as folhas completamente expostas à luz solar, apresentaram parênquima paliçádico com células mais longas, menos espaço intracelular e um número maior de estômatos. As folhas sob sombra densa apresentaram maiores espaços intercelulares, com as células da epiderme mais espessas e uma menor quantidade estômatos.

As plantas cultivadas em pleno sol apresentaram maiores valores de fotossíntese líquida. Isso evidenciou que as espécies *Coffea arabica* tem uma vasta gama fenotípica à adaptação às mudanças na intensidade da radiação.

Baliza et al. (2012) verificaram que a quantidade de radiação incidente influencia a estrutura interna das folhas dos cafeeiros e suas respectivas funções. O nível com 90% de sombra não é recomendado para o cultivo do cafeeiro, pois reduz a taxa fotossintética, apresentando menor espessamento do mesofilo e do parênquima paliçádico. O nível com 35% de sombra é o mais recomendado para cultivo do cafeeiro em ambiente sombreado, pois, nesse nível ocorre melhoria da estrutura interna das folhas do cafeeiro, o que pode favorecer características fisiológicas interessantes para otimizar o desenvolvimento dessa cultura.

#### **2.4.4 Macronutriente e o teor de cinzas dos cafeeiro**

Catani et al. (1965) estudaram a distribuição de macronutrientes no cafeeiro de 10 anos de idade, variedade “Mundo Novo”, cultivado em condições de campo e observaram à seguinte ordem decrescente :  $K > Ca > Mg > P \approx S$  e que o conteúdo de nutrientes encontrado no tronco foi de 19,7% , enquanto que no fruto apenas 7,5%.

Vassilev et al. (2010), caracterizando os elementos químicos em 86 variedades de biomassa, encontraram em ordem decrescente de abundância, os elementos C, O, H, N, Ca, K, Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn e Ti. Esses autores destacaram a tendência de enriquecimento de K entre a biomassa lenhosa e K e P entre a biomassa agrícola. Segundo esses autores, há diferenças entre a composição da biomassa e carvão vegetal sendo a biomassa rica em umidade, compostos voláteis, Ca, Cl, H, K, Mg, Mn, Na , O e P e possui menores teores de cinzas, carbono fixo, Al, Fe, N, Si, S e Ti quando comparada ao carvão vegetal.

As cinzas são compostas por todo o material que não queima, tornando-se um resíduo do processo de combustão.

Segundo Brand (2010), altos teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico por unidade de massa, visto que os materiais minerais não participam do processo de combustão, mas são contabilizados na massa do combustível submetido ao processo de queima.

O conteúdo de cinzas da biomassa pode ser dividido em duas categorias, natural e poluído (contaminação). O conteúdo de cinzas natural da biomassa é derivado das substâncias inorgânicas que participam das reações de combustão e se apresentam na forma de cinzas após o término da mesma (BRAND, 2010).

O teor de cinzas derivado da contaminação da biomassa consiste na incrustação de materiais, como terra, areia e pedra que se agregam na biomassa, durante as atividades de colheita, transporte e manuseio desta entre o local de produção até seu uso na geração de energia.

O conhecimento do teor de cinzas, natural ou de contaminação, tem um significado importante por duas razões básicas: a cinzas não se queima permanecendo no local do processo, exigindo um sistema próprio para sua retirada e pode causar problemas de corrosão em equipamentos de combustão.

Segundo Brand (2010), o conhecimento do teor de cinzas do combustível é importante no planejamento dos sistemas de combustão. Porém, de modo geral, os teores de cinzas apresentados pela biomassa não atingem níveis importantes que possam vir a causar maiores problemas quando de seu uso como combustível.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. A. T. do; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. do. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 377-384, mar. 2006.
- BABU, B. V. Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefinig**, Chichester, v. 2, n. 5, p. 393-414, Sept./Oct. 2008.
- BALIZA, D. P. et al. Trocas gasosa e características estrututais adptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 250-258, set./dez. 2012.
- BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis**. Burlington: Elsevier, 2010. 364 p.
- BECIDAN, M. et al. Ash related behaviour in staged and non-staged combustion of biomass fuels and fuel mixtures. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 41, p. 86-93, Mar. 2012.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, p. 776-785, Mar. 2008.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- BRASIL. **Balanco energético nacional 2012: ano base 2011**. Rio de Janeiro, 2012. 282 p.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 38, p. 68-94, Mar. 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953411000638>>. Acesso em: 28 jan. 2013.

CASTRO, A. **Uma investigação teórico-experimental da combustão de madeira**. 2008. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São Jose dos Campos, 2005.

CATANI, R. A. et al. Absorção de nitrogênio e enxofre pelo cafeeiro *Coffe arabica* variedade mundo novo (B Rodr.) Choussy aos dez anos de idade. In: ANAIS DA ESALQ, 22., 1965, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1965. p. 81-93.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira: 1ª estimativa, janeiro/2013**. Brasília, 2013. 18 p. Disponível em:  
<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_01\\_09\\_17\\_43\\_49\\_boletim\\_cafe\\_janeiro\\_2013.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_01_09_17_43_49_boletim_cafe_janeiro_2013.pdf)>. Acesso em: 05 fev. 2013.

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, Hebei, v. 22, n. 2, p. 135-143, 2004.

FUKUDA, K. Production of exergy from labour and energy resources. **Applied Energy**, London, v. 76, n. 4, p. 435-448, Dec. 2003.

HUANG, C. et al. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, jan. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de Agropecuária. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**: 2013. Disponível em:  
<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2010/pevs2010.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2013.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Coffee prices**. London, 2013. Disponível em: <[http://www.ico.org/coffee\\_prices.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/coffee_prices.asp?section=Statistics)>. Acesso em: 17 fev. 2013.

JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel Aprocessing Technology**, Amsterdam, v. 54, n. 1/3, p. 17-46, Mar. 1998.

JONES, J. M. et al. Devolatilisation características das misturas de carvão e biomassa. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 74, n. 1/2, p. 502-511, Aug. 2005.

KERN, S. et al. Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant: influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 97, p. 1-10, Sept. 2012.

KUBACKI, M. L. et al. Small-scale co-utilisation of coal and biomass. **Fuel**, London, v. 101, p. 84-89, Aug. 2012.

LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; LEHMANN, J. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Chichester, v. 3, n. 5, p. 547-562, Sept./Oct. 2009.

LOPES, P. R. et al. Produção de café agroecológico no sul de Minas Gerais: sistemas alternativos à produção intensiva em agroquímicos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, v. 7, n. 1, p. 25-38, 2012.

MOK, W. S. L. et al. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 31, n. 4, p. 1162-1166, 1992.

MORAIS, H. et al. Modifications on leaf anatomy of Coffea arabica caused by Shade of Pigeonpea (Cajanus cajan). **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 13-15, 2008.

MORAIS, H.; MARUR, C. J.; CARAMORI, P. H. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com gandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, out. 2003.

MUSSATTO, S. I. et al. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 4, n. 5, p. 661-672, 2011.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

NIELSEN, H. P. et al. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 26, n. 3, p. 283-298, 2000.

NOVAK, J. M. et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals of Environmental Science**, Boston, v. 3, n. 843, p. 195-206, 2009.

PANWAR, V.; PRASAD, B.; WASEWAR, K. L. Biomass residue briquetting and characterization. **Journal of Energy Engineering**, New York, v. 137, n. 2, p. 108-114, June 2011.

PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PEREIRA, M. A. **Confecção de moveis com a madeira de *Coffea arabica* L.** 2008. 59 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

PROTÁSIO, T. D. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, Jan. 2013.

\_\_\_\_\_. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Renabio**, Viçosa, MG, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

RICE, R. Agricultural intensification within agroforestry: the case of coffee and wood products. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 128, n. 4, p. 212-218, Dec. 2008.

SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, 2001.

SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.

SILVA, J. P. **Caracterização da casca de café (*Coffea arabica* L.) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, maio/jun. 2005.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e física da madeira e carvão vegetal de *Eucalypto urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

TELMO, C.; LOUSADA, J. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 5, p. 1663-1667, 2011.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécie do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.

VIEIRA, T. G. C. et al. Mudanças no parque cafeeiro da região de Machado, MG, 2000-2007: estudo espaço-temporal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: SBS, 2009. p. 6369-6376.

WILD, P. J. de et al. Biomass valorisation by staged degasification. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 85, n. 1/2, p. 124-133, May 2009.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGOS**

**ARTIGO 1** **Avaliação da qualidade da madeira de *Coffea arabica L.* como fonte de bioenergia**

Normas da Revista Cerne (versão aceita para publicação)

**Edson Rubens Da Silva Leite, Thiago de Paula Protásio, Sebastião Carlos da Silva Rosado, Paulo Fernando Trugilho, Gustavo Henrique Denzin Tonolo, Lina Bufalino**

Programa de pós-graduação: Ciência e tecnologia da Madeira  
Universidade Federal de Lavras, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

## **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA DE *Coffea arabica* L. COMO FONTE DE BIOENERGIA**

**RESUMO:** Objetivou-se neste trabalho avaliar, por meio da análise de componentes principais, a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L. em diferentes variedades e sistemas de cultivo como fonte de bioenergia. Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural, convencional e orgânico) e de duas variedades distintas (Mundo Novo e catuaí), totalizando seis tratamentos. Foram quantificados os teores dos componentes elementares (C, H, N, S e O), de cinzas, lignina, extrativos totais e holocelulose, a densidade básica, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior, o poder calorífico superior e inferior volumétricos das madeiras analisadas. Foi realizada a análise estatística multivariada de componentes principais. Os escores das componentes principais de interesse foram determinados como forma de dividir as madeiras em grupos. O grupo I foi composto pela madeira do cafeeiro orgânico Mundo Novo e natural Mundo Novo; o grupo II pelo orgânico catuaí, e o grupo III pelas madeiras dos cafeeiros convencional Mundo Novo, natural catuaí e convencional catuaí. Os resíduos madeireiros da espécie *Coffea arabica* L. apresentaram grande potencial para o uso energético, com destaque para as madeiras provenientes do sistema de cultivo convencional e da variedade catuaí. As madeiras do grupo III se destacaram em razão dos elevados valores de poder calorífico volumétrico, densidade básica, teor de lignina e poder calorífico superior. Entretanto, as madeiras desse grupo apresentaram elevado teor de nitrogênio.

Palavras-chave: biomassa, bioenergia, resíduos da cafeicultura.

## EVALUATION OF *Coffea arabica* L. WOOD QUALITY AS A SOURCE OF BIOENERGY

**ABSTRACT:** This work aimed to evaluate, through principal component analysis, the quality of *Coffea arabica* L. wood obtained from different growth systems and varieties as a source of bioenergy. Wood from three different growth systems (natural, conventional and organic) and two different varieties (Mundo Novo and catuaí) were used, totalizing six treatments. The contents of elementary components (C, H, N, S and O), ash, lignin, total extractives and holocellulose, basic density, the higher heating value, the lower heating value, as well as the lower and higher volumetric heating value of the analyzed woods were quantified. Principal components multivariate statistical analyses were conducted. The scores of the principal components of interest were determined as a way to divide the woods into groups. Group I was composed by the wood from the organic coffee “Mundo Novo” and “natural Mundo Novo”; Group II by the organic “catuaí”, and Group III by the wood from the coffee “convencional Mundo Novo”, “natural catuaí” and “convencional catuaí”. Wood residues from the species *Coffea arabica* L. showed great potential for energetic use, especially the woods from the conventional tillage and the variety “catuaí”. Woods from Group III stood out, due to the high volumetric heating values, basic density, lignin content and higher heating value. However, the woods of this group showed a high nitrogen content.

**Keywords:** biomass, bioenergy, coffee planting residues.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, tem-se buscado fontes alternativas de energia renovável, uma vez que a matriz energética mundial é altamente dependente dos combustíveis fósseis. A grande vantagem da utilização da biomassa vegetal como fonte de energia consiste nas emissões neutras de dióxido de carbono, desde que esses biocombustíveis sejam utilizados próximos dos locais de colheita, evitando assim, emissões de CO<sub>2</sub> com o transporte (PROTÁSIO et al., 2013a).

O CO<sub>2</sub> produzido a partir da queima da biomassa é absorvido pelas plantas por meio do processo fotossintético, que crescem em um ciclo relativamente curto, (VOIVONTAS et al., 2001; MOGHTADERI et al., 2006; LÓPEZ-RODRIGUES et al., 2009). Diante disso, o aproveitamento da biomassa residual advinda da cafeicultura pode ser vantajoso do ponto de vista econômico e ambiental, pois esses resíduos apresentam baixo custo e significativa disponibilidade.

O Brasil se destaca no cenário internacional como grande produtor de café. Em 2013 o país deve colher entre 46,98 e 50,16 milhões de sacas de 60 quilos do produto beneficiado, em uma área estimada de 2.375,79 mil hectares (CONAB, 2013), sendo adotadas várias técnicas de manejo e sistemas de cultivos específicos para cada localidade ou tipo de solo que podem influenciar

na qualidade e no rendimento energético da madeira do cafeeiro. O sistema de cultivo natural caracteriza-se pela pouca interferência humana na lavoura, ou seja, não são realizadas adubações químicas, aplicações de herbicidas ou inseticidas e podas regulares. Já o sistema de cultivo convencional é amplamente utilizado no Brasil e segue os preceitos clássicos da cafeicultura. O sistema de cultivo orgânico visa à diminuição dos resíduos de agrotóxicos e uma diversificação da cafeicultura por meio de consórcios em sistemas agroflorestais, pois se fundamenta em princípios agroecológicos e de conservação dos recursos naturais (THEODORO et al., 2003).

A grande produção brasileira de café resulta em grande quantidade de resíduos lignocelulósicos provenientes do processamento dos grãos, bem como das renovações das lavouras cafeeiras, que apresentam potencial para a produção de bioenergia. Contudo, é fundamental a avaliação da composição química, física e energética da biomassa, pois os cálculos de rendimento dos sistemas de combustão e eficiência dos projetos de geração de energia dependem de características como, por exemplo, poder calorífico, densidade, teores de lignina, extrativos totais, carbono, oxigênio, hidrogênio, materiais voláteis e cinzas.

Nesse contexto, o poder calorífico é uma das principais características avaliadas na biomassa para o uso energético, pois expressa a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume do material combustível. Contudo, o poder

calorífico é amplamente influenciado pela composição química e tipo de biomassa, umidade, carbono fixo e cinzas (DEMIRBAS, 2004; SHENG & AZEVEDO, 2005; BRAND, 2010; EROL et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012a; REIS et al., 2012b).

Diante da ausência na literatura de estudos relacionados à avaliação do potencial energético da madeira de *Coffea arabica* L., o objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio da análise de componentes principais, a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L. de diferentes variedades e sistemas de cultivo como fonte de bioenergia.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização química, física e energética da madeira

Foram utilizadas madeiras de *Coffea arabica* L. provenientes de três sistemas de cultivo (natural, convencional e orgânico) e de duas variedades distintas (Mundo Novo e catuaí), totalizando seis tratamentos, ou seja, os cafeeiros natural Mundo Novo (NtMN), natural catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico catuaí (OrgC).

Foram amostradas aleatoriamente quatro repetições, com idade de aproximadamente 10 anos, resultando em 24 arbustos abatidos. De cada arbusto foram retirados dois discos de aproximadamente 5 cm de espessura, sendo um

obtido na base para determinação da densidade básica e outro a 30 cm de altura do solo, destinado às análises químicas e energéticas.

As madeiras foram coletadas no câmpus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais no município de Machado (MG), latitude 21°40' S, longitude 45°59' W e altitude de 873 m.

Na determinação da densidade básica da madeira foi utilizado o método de imersão segundo a norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

O teor de cinzas foi determinado segundo as diretrizes previstas na norma M11/77 (ABTCP, 1974a) com o uso de um forno tipo mufla. Os extrativos totais e a lignina insolúvel da biomassa avaliada foram quantificados seguindo as determinações das normas M3/69 (ABTCP, 1974b) e M70/71 (ABTCP, 1974c), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido pela subtração dos teores de cinzas, extrativos totais e lignina da massa seca total da biomassa utilizada.

A análise elementar foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), para quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca dos resíduos lenhosos da cafeicultura. As amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada para o ensaio 2 mg da fração retida na peneira de 270 mesh, conforme utilizado por Neves et al. (2011), Protásio et al. (2011), Protásio et al. (2012b) e

Protásio et al. (2013a). O teor de oxigênio foi obtido por diferença, segundo a Eq. 1 (BECH et al., 2009).

$$O=100-C-H-N-S-Cz \quad (1)$$

Onde,  $O$  é o teor de oxigênio (%);  $C$  é o teor de carbono (%);  $H$  é o teor de hidrogênio (%);  $N$  é o teor de nitrogênio (%);  $S$  é o teor de enxofre (%) e  $Cz$  é o teor de cinzas (%).

Para a quantificação do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro digital da marca IKA C-200 de acordo com os procedimentos descritos na NBR 8633 (ABNT, 1984). As amostras para determinação do PCS foram classificadas em peneiras de 40/60 mesh, sendo utilizadas no ensaio as frações das amostras retidas na peneira de 60 mesh, as quais foram secas em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  até massa constante. O poder calorífico inferior a 0% de umidade foi estimado utilizando a Eq. 2.

$$PCI=PCS-(600 \times 9H/100) \quad (2)$$

Onde,  $PCI$  é o poder calorífico inferior (kcal/kg);  $PCS$  é o poder calorífico superior (kcal/kg) e  $H$  é o teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico superior volumétrico ( $PCS_v$ ) e o poder calorífico inferior volumétrico ( $PCI_v$ ) foram calculados multiplicando-se a densidade básica da madeira pelo poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), respectivamente (BRAND, 2010).

## 2.2 Análise de componentes principais

Foram consideradas apenas as médias de cada variável e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se a matriz de correlação dos dados. Esse procedimento equivale a padronizar as variáveis e permite maior acurácia na análise (MINGOTI, 2005). Foram determinados os escores das componentes principais de interesse como forma de classificação e formação de grupos da madeira avaliada.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando-se o *software* R versão 2.11.0, pacote *stats* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Observou-se que as três primeiras componentes principais explicaram 89,49% da variância total. Portanto, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas três componentes.

Na Tabela 1 encontram-se os autovetores e as correlações entre as variáveis originais e as três primeiras componentes principais (CP1, CP2 e CP3) consideradas.

A componente principal 1 encontra-se altamente correlacionada com a densidade básica da madeira, o teor de lignina insolúvel, o PCSv e o PCIv e pode ser interpretada como um índice de rendimento energético. Quanto maiores

os valores dessas variáveis maior será o valor numérico (escore) da componente principal 1 (CP1) e mais propício será o material para a produção de bioenergia

Tabela 1 Autovetores ( $\hat{e}$ ) e as correlações (r) entre as variáveis originais e as 3 primeiras componentes principais

Table 1. Eigenvectors ( $\hat{e}$ ) and correlations (r) between original variables and the first 3 principal components

Variáveis	CP1		CP2		CP3	
	$\hat{e}_1$	r	$\hat{e}_2$	R	$\hat{e}_3$	R
Extrativos	-	-0,84	-0,208	-0,45	0,161	0,24
Lignina	0,316	0,76	-0,189	-0,40	0,265	0,39
Nitrogênio	0,255	0,61	0,070	0,15	0,467	0,69
Hidrogênio	-	-0,34	0,290	0,62	0,224	0,33
Carbono	-	-0,60	0,329	0,70	0,180	0,27
Enxofre	0,113	0,27	-0,110	-0,23	0,587	0,87
Oxigênio	0,100	0,24	-0,429	-0,92	-0,146	-0,22
Cinzas	0,224	0,53	0,328	0,70	-0,286	-0,42
PCI	0,013	0,03	-0,404	-0,86	-0,173	-0,26
Densidade	0,413	0,99	0,025	0,05	0,019	0,03
PCIv	0,412	0,98	-0,003	-0,01	0,006	0,01
Holocelulose	0,216	0,52	0,331	0,71	-0,319	-0,47
PCSv	0,411	0,98	-0,005	-0,01	0,006	0,01
PCS	-	-0,01	-0,383	-0,82	-0,151	-0,22

PCI: poder calorífico inferior; PCIv: poder calorífico inferior volumétrico; PCSv: poder calorífico superior volumétrico; PCS: poder calorífico superior.

Analisando-se a segunda componente principal (CP2), pode-se perceber que os maiores coeficientes, em módulo, referem-se aos teores de carbono, cinzas, oxigênio, poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico superior (PCS) e holocelulose. Contudo, o maior coeficiente refere-se ao poder calorífico inferior, característica de grande importância na avaliação da biomassa para a produção energética. Quanto maiores os teores de carbono, cinzas e holocelulose

maior será o valor numérico dessa componente principal, sendo o contrário verificado para o teor de oxigênio e para o PCI e PCS.

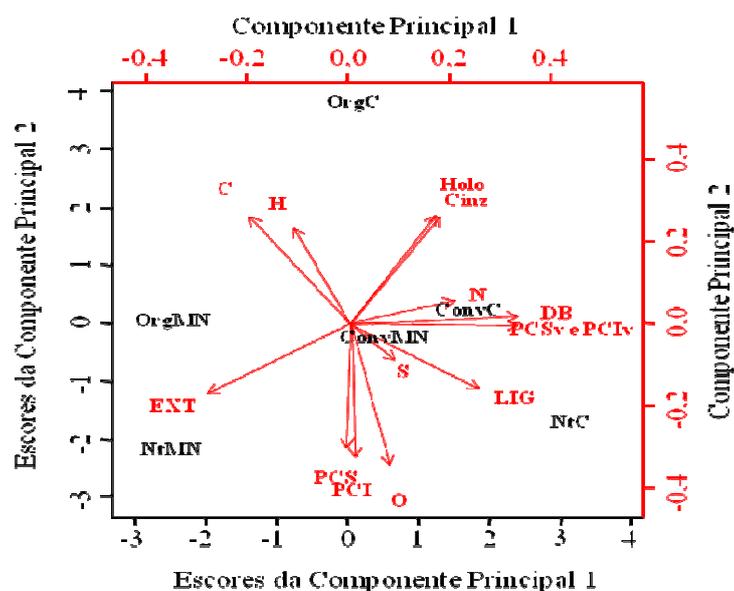
A terceira componente principal (CP3) pode ser interpretada como um índice de poluição ambiental e não aproveitamento energético da biomassa, pois os maiores coeficientes dessa componente são relativos aos teores de nitrogênio e enxofre.

Na Figura 1 encontram-se o diagrama de ordenação das variáveis originais e os escores das componentes principais 1 e 2. Um ponto qualquer plotado no diagrama (representando a madeira proveniente de um sistema de cultivo e de uma variedade de *Coffea arabica L.*) pode ser relacionado com cada seta (representando as variáveis originais observadas) (ALVARENGA & DAVIDE, 1999).

Observa-se que se pode formar três grupos distintos considerando-se as componentes principais 1 e 2 que explicam 74% da variabilidade dos dados. Além disso, as variáveis mais importantes para a classificação e seleção da biomassa para a geração de bioenergia apresentaram maior contribuição nessas duas componentes.

O grupo I é formado pela madeira do cafeeiro orgânico Mundo Novo e natural Mundo Novo; o grupo II pelo orgânico catuaí, e o grupo III pelas madeiras provenientes dos cafeeiros convencional Mundo Novo, natural catuaí e convencional catuaí.

Para a primeira componente principal (CP1) pode-se perceber que as madeiras do cafeeiro convencional Mundo Novo (ConvMN), natural catuaí (NtC) e convencional catuaí (ConvC), pertencentes ao grupo III, apresentaram os maiores escores em decorrência dos elevados valores de densidade básica, lignina, PCSv e PCIv. O mesmo não foi observado para as madeiras do grupo I devido aos menores valores dessas características. Esse resultado é indicativo de que as madeiras provenientes do grupo III são mais propícias à produção de bioenergia.



C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; S: enxofre; Holo: holocelulose; Cinz: cinzas; DB: densidade básica; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCSv: poder calorífico superior volumétrico; PCIv: poder calorífico inferior volumétrico; LIG: lignina; EXT: extrativos totais.

Figura 1 Diagrama de ordenação das variáveis originais e escores das duas primeiras componentes principais

Figure 1. Diagram of original variables ordination and scores of the first two principal components.

Observa-se ainda que as madeiras do grupo I, natural Mundo Novo e orgânico Mundo Novo, apresentaram altos teores de extrativos totais. Os extrativos exercem importante papel na utilização da madeira, pois influenciam as suas propriedades físicas e energéticas (TELMO & LOUSADA, 2011; PROTÁSIO et al., 2012a; VARGAS-MORENO et al., 2012) e dependendo da sua estabilidade térmica, essas substâncias podem contribuir para o aumento do rendimento em carvão vegetal (SANTOS et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012a).

Nota-se que a madeira da espécie *Coffea arabica* L. advinda do sistema orgânico variedade catuaí (grupo II) apresentou os menores valores de PCS e PCI e o menor teor de oxigênio, mas não os menores teores de carbono, holocelulose e cinzas quando comparada às demais madeiras, resultando em elevado escore para a componente principal 2.

Na Tabela 2 encontram-se os valores médios das características observadas para os grupos formados pelas componentes principais 1 e 2, bem como os coeficientes de variação encontrados.

Observa-se que, em média, os três grupos formados apresentaram teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, bem como de poder calorífico superior e inferior similares.

Para a produção de bioenergia é desejável que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio e cinzas, devido às relações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico (DEMIRBAS & DEMIRBAS, 2004; HUANG et al., 2009; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011).

Tabela 2 Valores médios das características observadas para os grupos formados pela análise de componentes principais, bem como os coeficientes de variação encontrados (entre parênteses)

Table 2. Mean values of the characteristics observed for groups made by grouping analysis, as much as the variation coefficients found (between parentheses)

Características	Grupo I	Grupo II	Grupo III
Extrativos totais (%)	17,24 (3,30)	6,71 (5,44)	9,13 (23,08)
Lignina (%)	30,95 (17,01)	30,04 (7,44)	34,04 (5,50)
Holocelulose (%)	50,63 (10,70)	61,48 (3,45)	55,42 (2,31)
Nitrogênio (%)	0,39 (23,34)	0,42 (6,44)	0,52 (16,03)
Hidrogênio (%)	6,60 (1,36)	6,64 (1,27)	6,60 (1,18)
Carbono (%)	49,68 (1,38)	50,07 (1,19)	49,31 (0,84)
Enxofre (%)	0,04 (30,46)	0,03 (20,33)	0,04 (15,75)
Oxigênio (%)	42,11 (1,83)	41,07 (1,52)	42,11 (1,17)
Cinzas (%)	1,18 (9,52)	1,77 (14,56)	1,42 (2,48)
PCS (kcal/kg)	4673 (0,53)	4627 (0,63)	4675 (0,37)
PCI (kcal/kg)	4316 (0,56)	4268 (0,75)	4319 (0,37)
Densidade básica	610 (2,45)	660 (1,70)	697 (2,19)
PCSv (Gcal/m <sup>3</sup> )	2,85 (2,85)	3,05 (2,20)	3,26 (1,88)
PCIV (Gcal/m <sup>3</sup> )	2,63 (2,86)	2,82 (2,29)	3,01 (1,94)

PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCSv: poder calorífico superior volumétrico; PCIV: poder calorífico inferior volumétrico.

Observou-se que as madeiras pertencentes ao grupo I apresentaram altos teores de extrativos totais e baixo teor de holocelulose, o que pode ser benéfico

para a produção energética (DEMIRBAS, 2001; DEMIRBAS, 2004; PROTÁSIO et al., 2012a). A holocelulose é menos estável termicamente e não contribui para o aumento do rendimento em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012a). Contudo, esse grupo apresentou valores de densidade básica, PCSv e PCIv inferiores aos demais grupos, o que resulta em um menor rendimento energético da biomassa.

O grupo II, formado pela madeira do cafeeiro orgânico catuaí, ocupou posição intermediária quanto ao seu aproveitamento energético, pois apresentou os menores valores para o PCS e para o PCI e maiores valores de cinzas e holocelulose quando comparado às demais biomassas analisadas, mas não apresentou a menor densidade básica, resultando assim em maiores valores de PCSv e o PCIv em relação ao grupo I.

O grupo III, formado pelas madeiras provenientes dos cafeeiros convencional Mundo Novo, natural catuaí e convencional catuaí, apresentou elevado potencial para a produção de bioenergia devido aos altos valores de densidade básica, PCSv, PCIv e lignina em relação aos demais grupos. Dessa forma, a madeira proveniente desse grupo apresenta grande potencial para a produção de carvão vegetal devido à maior densidade básica e ao elevado teor de lignina (TRUGILHO et al., 1997; PROTÁSIO et al., 2012a).

O valor médio encontrado para a densidade básica das madeiras de *Coffea arabica* L. do grupo III foi superior ao encontrado para diferentes

espécies e clones do gênero *Eucalyptus* (TRUGILHO et al., 2001; TRUGILHO et al., 2003; RODRIGUES et al., 2008; NEVES et al., 2011; REIS et al., 2012a; 2012b; PROTÁSIO et al., 2013b) e reforçam o grande potencial energético da biomassa analisada. Sabe-se que quanto maior a densidade básica maior será a disponibilidade de energia por unidade de volume de madeira e maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

No entanto, o grupo III apresentou teor de nitrogênio superior aos demais e à média geral determinada por Brand (2010) para madeiras de folhosas (0,30%). Para a produção de bioenergia é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades de nitrogênio, pois esse constituinte pode resultar em poluição ambiental, com a formação de óxidos de nitrogênio tóxicos, formação de chuva ácida e corrosão após a combustão (BILGEN & KAYGUSUZ, 2008; KUMAR et al., 2010), além de não apresentar correlação positiva com o poder calorífico (HUANG et al., 2009).

Já os baixos teores de enxofre encontrados para a madeira do cafeeiro dos diferentes grupos não comprometem a utilização energética dessa biomassa.

Os teores de cinzas observados para a madeira do cafeeiro dos três grupos formados foram superiores ao comumente encontrado (0,04% a 1,00%) para a madeira das espécies/clones pertencentes ao gênero *Eucalyptus* (TRUGILHO et al., 2001; CAIXETA et al., 2003; MORI et al., 2003;

TRUGILHO et al., 2003; NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013).

O elevado teor de cinzas é desvantajoso porque diminui a transferência de calor no combustível e aumenta a corrosão dos equipamentos utilizados no processo, uma vez que os minerais não participam da combustão da biomassa (TAN & LAGERKVIST, 2011). Além disso, o alto teor de cinzas no carvão vegetal utilizado na siderurgia, proveniente de uma madeira com maior teor de minerais, pode provocar o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, promovendo variações nas propriedades do ferro-gusa, aço ou ferro-liga (NEVES et al., 2011; ASSIS et al., 2012).

Os teores de lignina e extrativos totais encontrados neste trabalho foram superiores ao relatado por Trugilho et al. (1996) para a espécie *Eucalyptus saligna* em diferentes idades. Os valores médios de lignina encontrados por Caixeta et al. (2003) para genótipos do gênero *Eucalyptus* (28,96%) e por Gomide et al. (2005) para clones de *Eucalyptus* (29,30%) também foram inferiores ao determinado para a madeira do cafeeiro (32,34%).

Já Trugilho et al. (2003) e Protásio et al. (2013) encontraram valores médios de lignina total de 31,77% e 31,41% para diferentes clones de *Eucalyptus*, respectivamente, corroborando ao observado para as madeiras de *Coffea arabica* L. analisadas.

Dentre os componentes químicos a lignina é a que apresenta a maior estabilidade térmica devido às ligações carbono-carbono entre as unidades monoméricas de fenil-propano e, conseqüentemente, a estabilidade de sua matriz aromática (SHARMA et al., 2004; YANG et al., 2006). Logo, quanto maior o teor de lignina mais indicada é a madeira para a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012a).

O poder calorífico superior determinado por Protásio et al. (2012b) para os seguintes combustíveis de biomassa: maravalhas de eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar, polpa celulósica de bambu, casca de café, resíduos da colheita do milho e casca de arroz foi inferior ao relatado nesse trabalho para a madeira do cafeeiro proveniente dos três grupos formados. Isso ocorreu possivelmente devido aos maiores valores de lignina e extrativos totais (DEMIRBAS, 2001; DEMIRBAS, 2004; TELMO & LOUSADA, 2011; PROTÁSIO et al., 2012a) observados para a madeira do cafeeiro em relação ao observado por Protásio et al. (2012b) para as biomassas citadas.

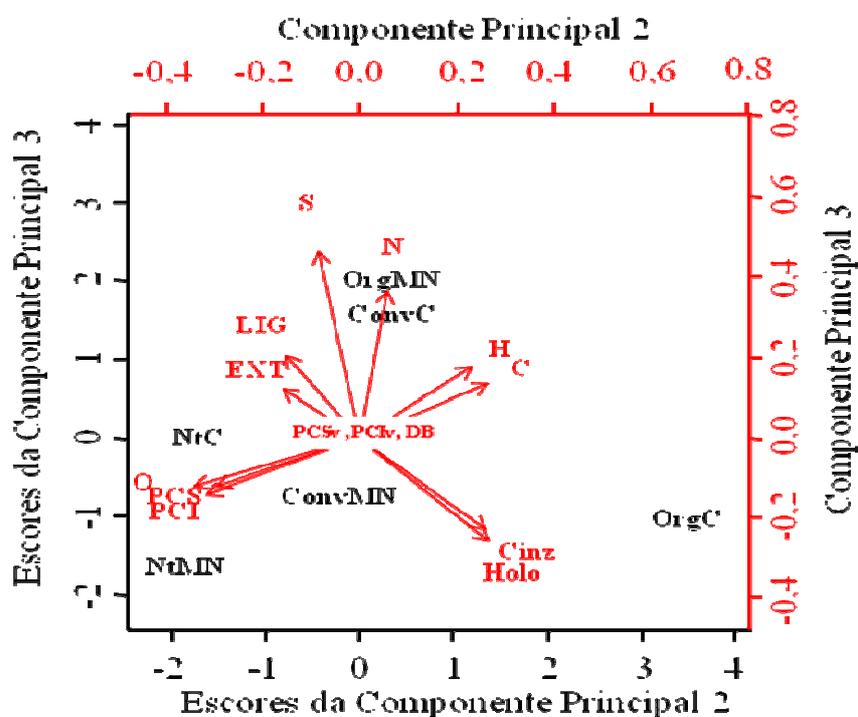
O poder calorífico superior volumétrico observado para as madeiras dos três grupos formados foi superior ao relatado por Lima et al. (2011) para a espécie *Eucalyptus benthamii* aos 6 anos de idade de 2,22 Gcal/m<sup>3</sup> e por Protásio et al. (2013b) para clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 3,5 anos de idade de 2,38 Gcal/m<sup>3</sup>. Vale et al. (2001) encontraram poder calorífico superior volumétrico médio de 3,17 Gcal/m<sup>3</sup> para o carvão vegetal de dez

espécies do cerrado utilizadas como fonte de bioenergia, assemelhando-se ao encontrado para o grupo III. Esses resultados são indicativos do potencial energético dos resíduos madeireiros da cafeicultura.

Na Figura 2 encontram-se o Diagrama de ordenação das variáveis originais e os escores das componentes principais 2 e 3.

Observa-se que as madeiras dos cafeeiros orgânico Mundo Novo (OrgMN) e convencional catuaí (ConvC) apresentaram elevados valores numéricos para a componente principal 3, devido aos altos teores de nitrogênio que podem dificultar a utilização energética da biomassa e levar a riscos de poluição ambiental. As demais madeiras analisadas apresentaram baixos escores para a componente principal 3, evidenciando baixos teores de nitrogênio e enxofre.

Encontrou-se alta densidade básica, alto poder calorífico superior e inferior e um elevado poder calorífico volumétrico para as madeiras de *Coffea arabica* L. em relação às espécies/clones de *Eucalyptus* spp comumente utilizados na geração de bioenergia, com destaque para o sistema convencional e a variedade catuaí. Isso pode resultar em bons rendimentos energéticos em sistemas de geração de energia como termelétricas ou gaseificadores.



C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; S: enxofre; Holo: holocelulose; Cinz: cinzas; DB: densidade básica; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCS<sup>v</sup>: poder calorífico superior volumétrico; PCI<sup>v</sup>: poder calorífico inferior volumétrico; LIG: lignina; EXT: extrativos totais.

Figura 2 Diagrama de ordenação das variáveis originais e escores das componentes principais 2 e 3

Figure 2. Diagram of original variables ordination and principal components 2 and 3 scores.

Além disso, os resíduos madeireiros da cafeicultura utilizados no presente trabalho apresentaram altos teores de hidrogênio, lignina e extrativos totais. Os resultados encontrados demonstram a potencialidade de utilização energética da madeira do cafeeiro e que pode resultar em um melhor aproveitamento ambiental e econômico dessa biomassa residual.

## 4 CONCLUSÕES

Os resíduos madeireiros da espécie *Coffea arabica* L. apresentaram grande potencial para o uso energético, com destaque para as madeiras provenientes do sistema de cultivo convencional e da variedade catuaí. Foram encontrados altos teores de extrativos totais, lignina, carbono e elevada densidade básica e poder calorífico volumétrico.

A técnica multivariada de componentes principais foi eficiente na análise bioenergética das madeiras de *Coffea arabica* L., sendo obtidos grupos homogêneos das amostras avaliadas. As madeiras do grupo III (convencional Mundo Novo, natural catuaí e convencional catuaí) se destacaram, como fonte direta de bioenergia ou para a produção de carvão vegetal, devido aos elevados valores de poder calorífico volumétrico, densidade básica, poder calorífico superior e teor de lignina.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 933-942, 1999.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: Carvão Vegetal – determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, Brasil, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M-11/77**: Teor de cinzas. São Paulo, Brasil, 1974a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M3/69: Métodos de ensaio**. São Paulo, Brasil, 1974b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M70/71: Métodos de ensaio**. São Paulo, Brasil, 1974c.

BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 534 – 537, 2009.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, v. 85, n. 8, p. 776 –785, 2008.

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

CAIXETA, R. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 43-51, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Avaliação da safra agrícola cafeeira – 1ª Estimativa - Janeiro/2013. Brasília, 2013. 19 p.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, v. 22, n. 2, p. 135-143, 2004.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001.

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2004.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA H.; KUÇUKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 170–173, 2010.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129- 137, 2005.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v.29, n. 6, p.1793–1797, 2009.

KUMAR, R.; PANDEY, K. K; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, v. 21, n. 4, p.514 – 516, 2010.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, 2011.

LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; ATANET, C. P.; BLÁZQUEZ, F. C.; CELMA, A. R. Spatial assessment of the bioenergy potential of Forest residues in the western province of Spain, Caceres. **Biomass and Bioenergy**, Oxford v. 33, n. 10, p. 1358-1366, 2009.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297p.

MOGHTADERI, B.; SHENG, C.; WALL, T. F. An overview of the Australian biomass resources and utilization technologies. **BioResources**, v. 1, n. 1, p. 93-115, 2006.

MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; CARDOSO, M. G. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319 – 330, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122 -133, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources** Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013a.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, 2013b.

PROTÁSIO, T. P.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; BUFALINO, L.; COUTO, A. M; TRUGILHO, P. F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012a.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p.497-505, 2012a.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012b.

RODRIGUES, E. A. C.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; SANTOS, A. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 147- 152, 2008.

SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN1, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. **Fuel**, London, v. 83, n.11-12, p. 1469-82, 2004.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 5, p. 499-507, 2005.

TAN, Z.; LAGERLIVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011.

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; SOUZA, C. A. S. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1039-1047, 2003.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66 - 80, 2003.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104 – 114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v.2, n. 1, p.94 -111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259 -267, 1997.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 89, p. 89 – 95, 2001.

VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KONKIOS, E.G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, n. 2, p. 101-112, 2001.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy Fuels**, Washington, v. 20, n.1, p. 388–393, 2006.

**ARTIGO 2 A madeira de *Coffea arabica* L. como fonte de bioenergia em diferentes sistemas de cultivos e cultivares**

**Edson Rubens da Silva Leite, Sebastião Carlos da Silva Rosado\***

\* Programa de pós-graduação: Ciência e tecnologia da Madeira  
Universidade Federal de Lavras, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

**Artigo normalizado de acordo com a NBR 6022(ABNT,2003).**

**A MADEIRA DE *Coffea arabica* L. COMO FONTE DE  
BIOENERGIA EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVOS E  
CULTIVARES**

**RESUMO**

Objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L. em diferentes cultivares e sistemas de cultivo como fonte de bioenergia, além de selecionar a melhor variedade e tipo de cultivo para produção de carvão vegetal e bioenergia. Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural, convencional e orgânico) e de duas cultivares distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos. Foram quantificadas as composições química, elementar, molecular e imediata da madeira, determinando-se a densidade básica, o estoque de carbono na madeira, o poder calorífico superior e inferior, além do poder calorífico superior e inferior volumétricos das madeiras analisadas. O teor de materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior e inferior e o teor de lignina não sofreram influência de cultivar ou sistema. Já o teor de holocelulose sofreu influência de cultivar e o sistema orgânico com a cultivar Catuaí se destacou pelo alto teor de holocelulose sendo estatisticamente diferente dos demais tratamentos. Para as demais variáveis estudadas (cinzas, extrativos totais, densidade básica, estoque de carbono na madeira, poder calorífico superior e inferior volumétrico) houve influência do efeito de cultivar. A cultivar Mundo Novo apresentou altos teores de extrativos, o que influenciou na estabilidade térmica das madeiras analisadas. Os resíduos madeireiros da espécie *Coffea arabica* L. apresentaram grande potencial para o uso energético, com destaque para a cultivar Catuaí, pela maior densidade básica, maior estoque em carbono na madeira e maior poder calorífico superior e inferior volumétrico e o menor teor de extrativos.

Palavras-chave: Biomassa. Energia. Resíduos da cafeicultura.

## 1 INTRODUÇÃO

Intensificar os investimentos em energia é fundamental para atingir um desenvolvimento sustentável, mas a energia, também, é uma fonte de muitos problemas econômicos, ambientais e sociais de hoje. Energia desempenha um papel importante no momento atual do mundo e a demanda por energia cresce rapidamente. A melhor maneira de absorver o enorme aumento na demanda de energia é por meio da diversificação (GARCIA et al., 2012). Neste contexto, a biomassa aparece como um recurso atraente. Os materiais lignocelulósicos podem, assim como os combustíveis fósseis, serem usados para a produção de diferentes tipos de combustíveis (sólido, líquido e gasoso) e para geração de diferentes tipos de energia (calor e eletricidade).

Entre os grupos de biomassas, os resíduos agrícolas têm atraído o interesse como matérias-primas para a carbonização, porque, geralmente, estão disponíveis em grandes quantidades, em função do processamento e parecem difíceis de usar, exceto quando utilizados como combustíveis (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2012).

O Brasil tem uma diversidade regional para geração de energia por meio da biomassa e resíduos agrícolas. A cana-de-açúcar com 10,6 Mha (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010) e o eucalipto com 4,5 Mha (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011) são as duas principais fontes de biomassa utilizadas para produção de energia no Brasil. No

entanto, há outras espécies que poderão ser exploradas numa política de desenvolvimento regional como os resíduos dos cafeeiros com 2,3 Mha (IBGE, 2010) e o babaçu, principalmente no Maranhão, com, aproximadamente, 12 milhões de hectares plantados no nordeste (LIMA et al., 2007).

Diante dessa diversidade é preciso determinar o real potencial dos resíduos de biomassa para produção de energia global ou regional. Deve-se notar que há no Brasil cerca de 5,6 bilhões de pés de café, pouco mais da metade só no Estado de Minas Gerais, totalizando cerca de 290 mil produtores em 15 estados. A área de plantio estimada em 2012 é de 2.351,3 mil hectares, o que representa um crescimento de 3,21% sobre a área de 2.278 mil hectares, existentes na safra 2011 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012), o que corresponde a 35,3% da produção mundial de café, gerando uma enorme quantidade de biomassa seca.

Em vários países produtores de café, tais como Colômbia, Venezuela, Costa Rica, Panamá e México, o cultivo é feito, também, em sistemas agroflorestais (SAF). No Brasil, a maioria dos produtores prefere o cultivo a pleno sol, sendo em sistema convencional ou orgânico, por acreditarem que o sombreamento diminui a produtividade e aumenta a necessidade de mão-de-obra, além da dificuldade na passagem de máquinas. Estima-se que mais de 90% das lavouras existentes no Brasil são a pleno sol (RICCI; COSTA; PINTO, 2006).

Na literatura pouco se relata sobre a questão energética dos resíduos do cafeeiro e a influência dos sistemas de cultivo e das cultivares na geração de bioenergia. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar

a qualidade da madeira de *Coffea arabica* L., para fins energéticos, utilizando três sistemas de cultivos existentes no Sul de Minas Gerais, o natural agroflorestal, orgânico e convencional e duas cultivares, Mundo Novo e Catuaí.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material utilizado e amostragem**

Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural agroflorestal, convencional e orgânico) e de duas cultivares distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos, ou seja, os cafeeiros natural Mundo Novo (NtMN), natural Catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional Catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico Catuaí (OrgC).

A lavoura de café cultivada a pleno sol (sistema convencional), plantada em 1995, e a lavoura de café orgânico (sistema orgânico), plantada em 2001, forneceram as madeiras, que foram coletadas no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais no município de Machado (MG), latitude 21°40' S, longitude 45°59' W e altitude de 873 m, sendo o solo classificado como latossolo vermelho-amarelo distrófico.

A nutrição do cafeeiro convencional foi realizada com aplicação de adubação química com formulação NPK 25-00-25 e com superfosfato simples. Entretanto, para o cafeeiro orgânico a nutrição foi realizada com palha de café e esterco bovino.

A lavoura de café em sistema natural agroflorestal (sistema natural) foi implantada em 1985, no espaçamento de 3,5 x 1,0 m e, em 1998, foi adotado o modelo de produção natural orgânico em sistema agroflorestal consorciado com frutíferas e árvores nativas. As bananeiras

foram cultivadas ao redor dos talhões do cafeeiro para servir como quebra-vento. Já entre as linhas foram cultivadas árvores nativas e plantas anuais. Essa lavoura recebeu recepa total em 2001 e não recebeu aplicação de insumos agrícolas desde 1997. A partir dessa data, realizou-se apenas o manejo das plantas invasoras com enxada e roçadeira.

A nutrição do cafeeiro natural orgânico foi realizada com a aplicação de palha de café e com a serapilheira acumulada pelos restos de folhas, plantas invasoras e galhos oriundos do sistema agroflorestral. As madeiras, sobre o sistema de cultivo natural agroflorestral, foram fornecidas por uma propriedade no município de Machado, Sul de Minas Gerais, nas proximidades das coordenadas geográficas 21° 39' 59" S e 45° 55' 16" W e altitude de, aproximadamente, 900 m.

Foram amostradas, aleatoriamente, quatro plantas, resultando em 24 arbustos abatidos. Os arbustos foram seccionados em toretes de, aproximadamente, 90 cm de comprimento e diâmetros que variaram de 5 a 10 cm. Junto à base foram retirados discos de, aproximadamente, 5 cm de espessura, para determinação da densidade básica. O restante dos toretes foi dividido em quatro partes e duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a caracterização da madeira.

## **2.2 Caracterização física, química e energética da madeira**

Na determinação da densidade básica da madeira foi utilizado o método de imersão segundo a norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

O estoque de carbono na madeira por unidade de volume (ECM) foi calculado multiplicando-se a densidade básica da madeira pela porcentagem do carbono elementar.

O teor de cinzas foi determinado segundo as diretrizes previstas na norma M11/77 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP, 1974a) com o uso de um forno tipo mufla. Os extrativos totais e a lignina insolúvel da biomassa avaliada foram quantificados seguindo as determinações das normas M3/69 (ABTCP, 1974b) e M70/71 (ABTCP, 1974c), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido pela subtração dos teores de cinzas, extrativos totais e lignina da massa seca total da biomassa utilizada.

Para a quantificação dos teores de materiais voláteis e carbono fixo, utilizou-se o procedimento descrito na ASTM D.1764-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007).

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), em relação à massa seca de madeira, foram realizados em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube) em duplicata. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e, completamente, incineradas a 1.200 °C.

O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a equação 2, utilizada por Assis et al. (2012) e Protásio et al. (2011, 2012) e recomendada por Bech, Jensen e Dam-Johansen (2009).

$$O(\%) = 100 - C(\%) - H(\%) - N(\%) - S(\%) - Cz(\%) \quad (2)$$

em que O é o teor de oxigênio; C é o teor de carbono; H é o teor de hidrogênio; N é o teor de nitrogênio; S é o teor de enxofre e Cz é o teor de cinzas.

Para a quantificação do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro digital da marca IKA C-200 de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (ASTM, 2004). As amostras, para determinação do PCS, foram classificadas em peneiras de 40/60 mesh, sendo utilizadas no ensaio as frações das amostras retidas na peneira de 60 mesh, as quais foram secas em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  até massa constante. O poder calorífico inferior a 0% de umidade foi estimado utilizando a Eq. 1.

$$PCI = PCS - (600 \times 9H/100) \quad (1)$$

Onde, *PCI* é o poder calorífico inferior (kcal/kg); *PCS* é o poder calorífico superior (kcal/kg) e *H* é o teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico superior volumétrico (*PCS<sub>v</sub>*) e o poder calorífico inferior volumétrico (*PCI<sub>v</sub>*) foram calculados multiplicando-se a densidade básica da madeira pelo poder calorífico superior (*PCS*) e inferior (*PCI*), respectivamente (BRAND, 2010; PROTÁSIO et al., 2013).

### **2.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva por Raios X (EDS)**

As amostras de madeiras foram classificadas em peneiras de 40/60 mesh, sendo utilizadas no ensaio as frações das amostras retidas na

peneira de 60 mesh, montadas em “stubs”, metalizadas no aparelho evaporador de carbono modelo Union CED 020 e observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por Espectroscopia de Energia Dispersiva por Raios X no aparelho Quantax XFlash 5010 Bruker.

Para caracterizar a composição das cinzas, os elementos metálicos foram normalizados e utilizou-se a massa molecular dos óxidos metálicos ( $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$  e  $P_2O_5$ ) para estimar o percentual de óxido em relação ao total das cinzas.

#### **2.4 Análise termogravimétrica (TGA)**

Para as análises termogravimétricas, as madeiras foram reduzidas a pó, sendo utilizada a fração granulométrica que passou pela peneira de 200 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*. Para essa análise foi utilizado o equipamento DTG-60H da marca SHIMADZU. As amostras de, aproximadamente, 4 mg foram submetidas a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 550 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, utilizando um fluxo de nitrogênio de 50 mL min<sup>-1</sup>.

Utilizando-se a primeira derivada da curva TG, que estabelece a perda de massa em função da temperatura, foi possível identificar a taxa de perda de massa por segundo e os picos característicos de degradação térmica da biomassa.

## 2.5 Avaliação experimental

Na avaliação das características quantificadas na madeira de *Coffea arabica* L. utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em um esquema fatorial 3 x 2 considerando-se como níveis dos fatores os diferentes sistemas e cultivares e 4 repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Eq. 3:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Onde:  $Y_{ijk}$  é a observação do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2$  e  $3$ ), no  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ) na  $k$ -ésima repetição ( $k = 1, 2, 3$  e  $4$ );  $\mu$  é uma constante inerente a todas as observações;  $\tau_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2,$  e  $3$ ), efeito fixo;  $\beta_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ), efeito fixo;  $(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação entre  $\tau_i$  e  $\beta_j$ , efeito aleatório, e  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental associado à observação  $Y_{ijk}$ , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância  $\sigma^2$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Características avaliadas da madeira

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados das análises de variância para as características avaliadas na madeira do cafeeiro *Coffea arabica L.* Verifica-se que o efeito da interação sistema x cultivar foi significativo para densidade básica, extrativos totais, cinzas, estoque em carbono na madeira, poder calorífico superior e inferior volumétricos. Sendo assim, optou-se em fazer o seu desdobramento e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar e vice versa.

Tabela 1 Resumo das análises de variância para as características que apresentaram interação sistema x cultivar

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio					
		DB (kg/m <sup>3</sup> )	ET (%)	CINZAS (%)	ECM (kg/m <sup>3</sup> )	PCSv (Kcal/m <sup>3</sup> )	PCIv (kcal/m <sup>3</sup> )
Sistema	2	7567,717*	9,3297*	0,0294 <sup>ns</sup>	1530,186*	0,190737*	0,16830*
Cultivar	1	19564,173*	342,921*	0,2360*	4694,484*	0,36260*	0,31281*
S x C	2	2602,0167*	46,6627*	0,0505*	491,00137*	0,06390*	0,05200*
Erro	23	257,7594	2,1506	0,0110	114,3285	0,0059	0,0051
	CVe (%)	2,42	12,82	7,82	3,25	2,5	2,5

Em que: CVe (%) = coeficiente de variação experimental; PCSv = poder calorífico superior volumétrico; PCIv = poder calorífico inferior volumétrico, ECM = estoque de carbono na madeira, DB = densidade básica, ET= extrativos totais \* = significativo a 5% pelo Teste F; <sup>ns</sup> = não significativo a 5% pelo Teste F.

Na (Tabela 2) encontra-se o resultado da análise de variância para os teores de voláteis, carbono fixo, lignina e poder calorífico superior e

inferior e holocelulose. Observa-se que somente o teor de holocelulose apresentou o efeito significativo de cultivar.

Tabela 2 Resumo das análises de variância para voláteis, carbono fixo, lignina, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e holocelulose

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio					
		Voláteis	Carbono fixo	PCS	PCI	Lignina	Holocelulose
Sistema (S)	2	15,324 <sup>ns</sup>	14,3521 <sup>ns</sup>	3264,500 <sup>ns</sup>	4350,9255 <sup>ns</sup>	10,94582 <sup>ns</sup>	12,74926 <sup>ns</sup>
Cultivar (C)	1	9,0160 <sup>ns</sup>	8,93040 <sup>ns</sup>	5430,0416 <sup>ns</sup>	5249,26681 <sup>ns</sup>	9,513004 <sup>ns</sup>	223,443038*
S x C	2	3,74750 <sup>ns</sup>	4,62083 <sup>ns</sup>	183,16666 <sup>ns</sup>	236,53232 <sup>ns</sup>	38,114154 <sup>ns</sup>	51,595237 <sup>ns</sup>
Erro	23	6,1437	6,24823	988,23611	1132,6619	19,676474	23,611696
	CVe (%)	3,08	16,59	0,67	0,78	13,71	8,86

Em que: CVe (%) = coeficiente de variação experimental; PCS = poder calorífico superior; PCI= poder calorífico inferior \* = significativo a 5% pelo Teste F; <sup>ns</sup> = não significativo a 5% pelo Teste F.

A média encontrada para os teores de materiais voláteis (80,39%), carbono fixo (19,15%), poder calorífico superior (4665 kcal.kg<sup>-1</sup>) e inferior (4310 kcal.kg<sup>-1</sup>) estão de acordo com valores encontrados na literatura para o gênero *Eucalyptus*. Segundo Brand (2010), a composição química imediata na base seca para a madeira de folhosa é em torno de 81,42% de materiais voláteis e 17,82% em carbono fixo e poder calorífico de 4600 Kcal.kg<sup>-1</sup>, portanto próximo aos valores encontrados neste estudo. O teor de lignina para a madeira do cafeeiro (32,34%) foram superiores aos relatados por Caixeta et al. (2003) para genótipos do gênero *Eucalyptus* (28,96%) e por Gomide et al. (2005) para clones de *Eucalyptus* (29,30%). Maiores teores de lignina são interessantes do ponto de vista da utilização da biomassa como fonte de energia, em função da maior estabilidade térmica (WILD et al., 2009) e poder calorífico (BRAND, 2010).

Na Tabela 3 encontram-se as médias, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito sistema, dentro de cultivar e vice versa, com os respectivos testes de comparação múltipla realizados para as características apresentadas na Tabela 1.

Para o teor de cinzas na madeira, verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar mostrou que a cultivar Catuaí não apresentou diferença entre os sistemas, o contrário ocorreu com a cultivar Mundo Novo que apresentou o menor teor de cinzas no sistema orgânico.

Tabela 3 Análise da interação sistema x cultivar para algumas características da madeira

Características	Cultivares	Sistemas		
		Convencional	Orgânico	Natural
Cinzas (%)	Catuaí	1,42 aA	1,45aB	1,45 aB
	Mundo Novo	1,38 bA	1,1 aA	1,24 abA
Extrativos totais (%)	Catuaí	9,21 aA	6,79 aA	6,98 aA
	Mundo Novo	11,19 aA	17,14bB	17,33 bB
DB (Kg.m <sup>-3</sup> )	Catuaí	705 bA	662 aB	709 bB
	Mundo Novo	684 bA	605 aA	615 aA
ECM (Kg.m <sup>-3</sup> )	Catuaí	350 aA	332 aB	346 aB
	Mundo Novo	338 bA	302 aA	303 aA
PCSV(Gcal.m <sup>-3</sup> )	Catuaí	3,28 bA	3,06 aB	3,31 bB
	Mundo Novo	3,21 bA	2,81 aA	2,88 aA
PCIV(Gcal.m <sup>-3</sup> )	Catuaí	3,03 bA	2,82 aB	3,05 bB
	Mundo Novo	2,96 bA	2,59 aA	2,66 aA

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Observa-se, ainda, que a cultivar Catuaí apresentou maiores teores de cinzas que a cultivar Mundo Novo em todos os sistemas de cultivo. Para o sistema convencional, as diferenças entre as cultivares não foram significativas, o oposto ocorreu para os sistemas orgânico e natural.

O teor de cinzas varia muito em função da espécie, posição na biomassa vegetal, idade, além de ser influenciado pelo local de crescimento. A madeira do cafeeiro analisada apresentou teor médio de cinzas de 1,34%, sendo superior ao comumente relatado na literatura para a madeira do gênero *Eucalyptus* (0,47%) apresentadas por Brand (2010). Porém, o teor de cinzas do cafeeiro não influenciou na qualidade energética da madeira, pois o poder calorífico superior e inferior não foi influenciado pelo sistema e cultivar, sendo a média encontrada semelhante a outros combustíveis lignocelulósicos.

O poder calorífico da biomassa pode ser parcialmente correlacionado com a concentração de cinzas. Madeiras com menos de 1% de cinzas, geralmente, têm valores próximos de 20 MJ. kg<sup>-1</sup> e para cada aumento de 1% de cinzas ocorre um decréscimo de 0,2 MJ.Kg<sup>-1</sup> no poder calorífico (JENKINS et al., 1998), portanto altos teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico por unidade de massa, visto que os materiais minerais (cinzas) não participam do processo de combustão, mas são contabilizados na massa do combustível submetido ao processo de queima (BRAND, 2010).

Quanto ao teor de extrativos, observou-se o efeito de sistema apenas para cultivar Mundo Novo, que apresentou maiores teores em relação à Catuaí. A cultivar Mundo Novo, sobre os sistemas orgânico e natural, apresentou estatisticamente o maior teor de extrativos.

Os teores de extrativos encontrados por Neves et al. (2011) e Oliveira et al. (2010) para clones de *Eucalyptus* foram de 4,53% e 4,12, respectivamente. Protásio et al. (2013) encontram valores elevados de extrativos para resíduos da colheita do milho (17,5%), bagaço de cana de açúcar (16,6%) e madeira de cedro australiano vermelho (12,9%). A média apresentada neste estudo para a madeira do cafeeiro foi de 11,44%, portanto superior aos clones de *Eucalyptus* e inferior ao bagaço de cana, resíduo do milho e ao cedro australiano vermelho.

Pereira (2008) encontrou para a cultivar Mundo Novo o teor médio de 10,3 %, o sistema de cultivo não foi informado, mas, provavelmente, seja o convencional, pois os sistemas orgânico e natural tenderam a aumentar o valor médio deste estudo. Paula et al. (2011) encontraram para o cafeeiro o valor de 10,49% , mas o sistema e a cultivar não foram informados.

Para a densidade básica da madeira, a média encontrada para o cafeeiro foi de 663,21 kg m<sup>-3</sup>. Pereira (2008) encontrou para madeira de *Coffea arabica* cultivar Mundo Novo o valor de 608 kg.m<sup>-3</sup>. Neste estudo a cultivar Catuaí apresentou os maiores valores em todos os sistemas, o que elevou a média encontrada.

Pela análise da densidade básica, a madeira do cafeeiro tem potencial para produzir carvão, porque em todos os sistemas de cultivo os valores foram mais elevados do que a média ( 555 kg.m<sup>-3</sup>) encontrada por Trugilho et al. (2001), em 7 clones de *Eucalyptus grandis* e em 3 *Eucalyptus saligna* ( 565 kg.m<sup>-3</sup>). A densidade básica pode ser considerada um dos principais critérios para a seleção de material para a produção de carvão vegetal, pois gera carvões mais densos, além de

influenciar no estoque em carbono na madeira e no poder calorífico superior e inferior volumétrico.

Para a densidade básica da madeira, verifica-se que a cultivar catuaí apresentou, estatisticamente, o menor valor no sistema orgânico. Já a cultivar Mundo Novo no sistema convencional apresentou o maior valor e, estatisticamente, diferente dos demais sistemas. Portanto, a cultivar catuaí tem um elevado potencial para produção de carvão vegetal e bioenergia. Este mesmo potencial se manteve para o estoque de carbono na madeira e para o poder calorífico superior e inferior, pois não foi observado efeito de sistema, cultivar ou da interação para o poder calorífico superior e inferior.

Para o teor de holocelulose, as cultivares catuaí e Mundo Novo apresentaram, respectivamente, 57,91% e 51,81%. Oliveira et al. (2010), utilizando clone de *Eucalyptus pellita* F. Muell com idade de 5 anos, encontraram valores médios de 65,97%. Neves et al. (2011), utilizando três clones de *Eucalyptus*, encontraram a média de 67,14%. O conteúdo médio de holocelulose neste estudo foi de 54,86%, portanto estão abaixo dos teores encontrados para clones de *Eucalyptus* na literatura.

Para a produção de carvão vegetal menores porcentagens de holocelulose e conteúdo mais elevado de lignina são mais recomendadas, em virtude da maior resistência à degradação térmica da lignina em relação às hemiceluloses e à celulose.

Santos et al. (2012) verificaram que a maior degradação térmica em seus experimentos ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 300 e 400<sup>0</sup>C, durante a qual se obteve perdas superiores a 50% da massa inicial da madeira. Essa faixa de temperatura compreende a fase

de degradação da celulose que, de acordo com a literatura, tem sua maior degradação na faixa de 325 e 375°C.

### Componentes químicos na madeira e nas cinzas de *Coffea arabica* L.

A Figura 1 mostra a distribuição dos elementos químicos encontrados na madeira do cafeeiro. Observam-se maiores quantidades de potássio em todos os sistemas, com destaque ao orgânico Catuaí.

Catani et al. (1965) estudaram a distribuição de macronutrientes no cafeeiro de 10 anos de idade, cultivar Mundo Novo, cultivado em condições de campo e observaram a seguinte ordem decrescente :  $K > Ca > Mg > P \approx S$  e que o conteúdo de nutrientes encontrado no tronco foi de 19,7% , enquanto que no fruto apenas 7,5%.

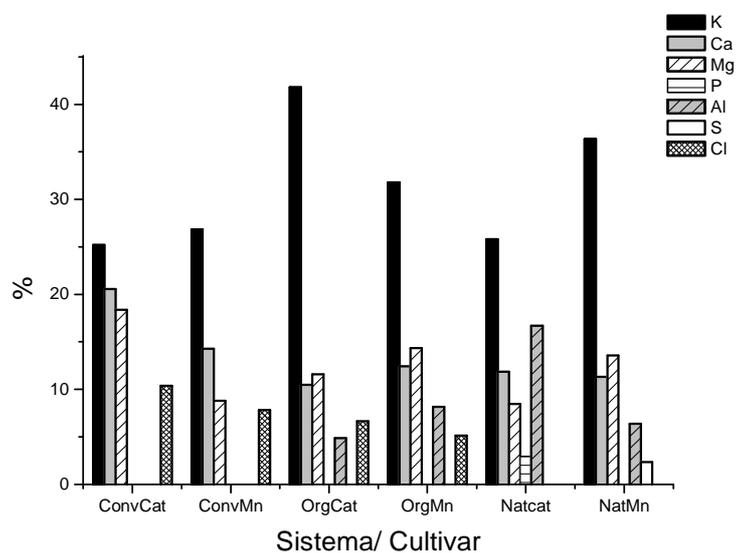


Figura 1 Elementos químicos encontrados na madeira *Coffea arabica* em diferentes sistemas de cultivos

Este resultado, mostrado na Figura 1, está de acordo com Vassilev et al. (2010) que, caracterizando os elementos químicos em 86 variedades de biomassa, encontraram, em ordem decrescente de abundância, os elementos C, O, H, N, Ca, K, Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn e Ti. Esses autores destacaram a tendência de enriquecimento de K entre a biomassa lenhosa e K e P entre a biomassa agrícola.

Neste estudo o cafeeiro apresentou alto teor de enriquecimento de potássio, como mencionado por Vassilev et al. (2010) para biomassa lenhosa. Observa-se que o sistema convencional foi o único sistema a não apresentar alumínio. A toxicidade por alumínio é uma das principais limitações na produtividade de plantas em áreas cultiváveis para diversas espécies de importância agrônômica (CONCEIÇÃO; SERENO; BARBOSA NETO, 2008).

Outros elementos importantes relacionados com a combustão de resíduos agrícolas são os teores de nitrogênio, enxofre e cloro, que podem conduzir à formação de gases poluentes como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HCl (WETHER et al., 2000).

Portanto, menores teores de S, N e Cl são desejados para amenizar o potencial poluidor. Neste estudo o sistema natural foi o único sistema a não apresentar o cloro no tecido lenhoso (Figura 1).

As cinzas do cafeeiro apresentaram uma variação entre 1,25-1,77% entre a caracterização da madeira nos três sistemas estudados e a sua composição está descrita na Tabela 4. O problema das cinzas na

combustão, além de reduzir o poder calórico, é a baixa propriedade de fusão, em virtude da presença de conteúdos elevados de óxido de potássio ( $K_2O$ ) (WETHER et al., 2000). O problema atribuído a baixa temperatura de fusão das cinzas são aglomeração, incrustações e corrosão na superfície de transferência de calor (SAENGER et al., 2001; WETHER et al., 2000).

Os resultados (Tabela 4) mostraram que as cinzas da madeira do cafeeiro possuem alto teor de  $K_2O$  (36,70-65,87%) em comparação aos valores encontrados por Saenger et al. (2001) para cinzas de casca de café (37-38%). Alto teor de  $K_2O$  está atribuído ao uso de fertilizantes em explorações agrícolas (SAENGER et al., 2001).

Tabela 4 Composição química de cinzas da madeira do cafeeiro

	$K_2O$	$CaO$	$MgO$	$Al_2O_3$	$P_2O_5$
ConvCat	50,60	23,98	25,42	N.D	N.D
ConvMn	65,16	20,15	14,69	N.D	N.D
OrgCat	65,87	9,59	12,56	11,99	N.D
OrgMn	51,56	11,70	16,01	20,73	N.D
Natcat	36,70	9,78	8,29	37,25	7,98
NatMn	58,43	10,53	15,01	16,03	N.D

\*N.D= não detectado

Segundo Saenger et al. (2001), existem técnicas das quais o ponto de fusão de cinzas pode ser levantado, como, por exemplo, a utilização de aditivos. Os aditivos que podem aumentar a temperatura de amolecimento das cinzas são o caulino, a cerâmica, alumina, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Portanto, maiores proporções de  $CaO$  e  $MgO$  são desejáveis

para reduzir o efeito que o  $K_2O$ , pode causar com a redução do ponto de fusão de cinzas.

Potássio e cálcio, largamente, definem a temperatura de fusão das cinzas e a razão  $K_2O/ CaO$  é critério essencial de escolha de cinzas de madeira para fins industriais (STERN; GERBER; NATRUN, 2004). Portanto, quanto menor a relação  $K_2O/ CaO$  e  $K_2O/MgO$ , maior será o ponto de fusão. Neste caso, a madeira convcat, se destaca por possuir a menor relação  $K_2O/CaO$  ( 2,1) e  $K_2O/MgO$  (1,99). Stern, Gerber e Natrun (2004) encontraram nas cinzas de madeira valores que variaram entre 0,2 e 0,8 para a relação  $K_2O/CaO$ , portanto, valores inferiores aos encontrados neste estudo, em razão dos elevados teores de potássio encontrados na cinzas do cafeeiro.

#### **Análise termogravimétrica da madeira *Coffea arabica L.***

A Figura 2 apresenta o percentual de perda de massa em função da temperatura (curva TG) das madeiras analisadas. A primeira vista, as curvas de TG para as seis madeiras são semelhantes, mas se observam três etapas que merecem atenção. A primeira é caracterizada pela perda de água, que é mais acentuada até  $100^{\circ}C$ , entretanto o processo de secagem continua, em menor proporção até atingir  $200^{\circ}C$ . Nesta faixa de temperatura, inicia-se a despolimerização e recondensação das hemiceluloses e lignina (WILD et al., 2009).

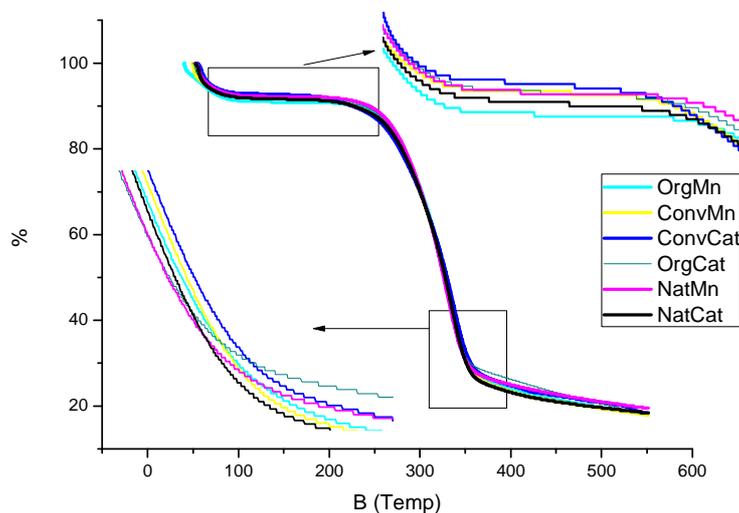


Figura 2 Perda de massa em função da temperatura dos combustíveis analisados (TG)

Na segunda etapa ocorre maior volatilização (200-350°C) e a maior degradação térmica da madeira, principalmente, em virtude da decomposição térmica das hemiceluloses e celulose. Segundo Poletto et al. (2012), esta etapa ocorre em dois passos. A degradação das hemiceluloses com pico máximo em 300°C e em 350°C ocorre a máxima degradação da molécula da celulose. Nesta etapa ocorre um pico proeminente à temperatura correspondente à taxa de decomposição máxima. A terceira e última etapa estabelecida neste estudo ocorre volatilização extensiva e a carbonização da lignina (WILD et al., 2009).

Nota-se, pela Tabela 4, as etapas de degradação da madeira do cafeeiro em função das temperaturas fixadas e a taxa de degradação da segunda e terceira etapas.

Muller et al. (2002) verificaram que as taxas de degradação apresentavam diferenças significativas para as diferentes moléculas que compõem a madeira. Os autores afirmaram que a degradação das hemiceluloses e celulose ocorre a taxas mais elevadas e semelhantes. Neste estudo, a taxa de degradação na segunda etapa variou entre 0,64-0,66 g/°C, e confirma a observação de Muller et al. (2002).

Tabela 5 Etapas de perda de massa

S x C	I Etapa			II Etapa					III Etapa			Pm (%)		
	Ti	Tf	Pm%	Ti	Tp	Tf	Tx(g/°C)	Pm%	Ti	Ec	Tf	Tx(g/°C)	Pm%	Total
ConvCat	54	200	8,22	200	338	350	0,64	58,74	350	371	550	0,44	14,12	81,08
ConvMn	50	200	8,29	200	338	350	0,65	59,63	350	371	550	0,44	13,39	81,31
Natcat	55	200	8,66	200	330	350	0,66	60,41	350	371	550	0,40	11,8	80,87
NatMn	52	200	8,06	200	335	350	0,67	60,68	350	371	550	0,36	11,16	79,9
OrgCat	51	200	8,2	200	328	350	0,66	59,77	350	371	550	0,43	13,2	81,17
OrgMn	50	200	8,8	200	335	350	0,65	58,54	350	371	550	0,43	13,97	81,31

Ti= temperatura inicial, Tf= temperatura final, Pm= perda de massa, Tp= temperatura de pico, Ec= estabilização da curva de perda de massa, Tx=taxa de degradação.

As temperaturas de pico ocorreram na segunda etapa, principalmente, pela degradação da celulose. Observou-se que a madeira com a menor temperatura de pico correspondeu àquela com maior teor holocelulose ou seja, o orgânico Catuaí.

Na terceira etapa, a taxa de degradação variou de 0,36 – 0,44 g/°C. Os sistemas convencional e orgânico estão relativamente muito próximos, mas o sistema natural apresentou diferença entre as cultivares e entre os sistemas, demonstrando maior estabilidade térmica para o natural Mundo Novo. Não havendo diferença estatística para a lignina, a

explicação para este fato pode estar relacionada à qualidade da mesma, além do tipo de extrativo presente.

Observa-se que, na Figura 3, tem-se que a maior velocidade de perda de massa (pico) se relaciona a duas madeiras: natural Mundo Novo e natural Catuaí. Essas madeiras apresentaram elevado teor de extrativos totais. Poletto et al. (2012) mostraram que maiores teores de extrativos, associados com menor cristalinidade da celulose, podem acelerar o processo de degradação e reduzir a estabilidade térmica da madeira. Isso explicaria, em parte, a maior perda de massa no segundo estágio de degradação térmica desses materiais lignocelulósicos. Observa-se, também, que o menor pico da segunda etapa se relaciona às madeiras do sistema convencional. Essas madeiras apresentaram alto teor de lignina e o menor teor de extrativo.

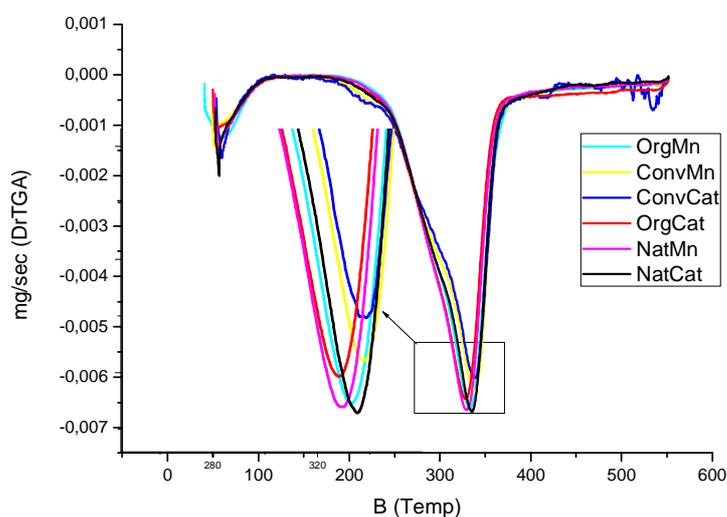


Figura 3 Gráfico da DTG das madeiras analisadas

Os extrativos são compostos de baixa massa molecular, em comparação com a celulose e podem promover a inflamabilidade da madeira, a temperaturas mais baixas, como um resultado da sua elevada volatilidade e, assim, acelerar o processo de degradação (POLETTO et al., 2012).

Segundo Wild et al. (2009), a desgaseificação ocorre em duas etapas consecutivas em 250-300°C e 350-400°C e leva a misturas de produtos de degradação de toda biomassa. As misturas que foram geradas em 250-300°C são, predominantemente, produtos de degradação das hemiceluloses, enquanto que a composição das misturas, que foram obtidas em 350-400°C, é mais representativa para a celulose. Fragmentos de lignina são encontrados em ambas as misturas (WILD et al., 2009).

Portanto, existe, ainda, uma faixa entre 350-400 °C em que a celulose pode estar influenciando na taxa de degradação da terceira etapa, fixada para este estudo. Além do mais este comportamento da natural Mundo Novo pode esta relacionada a outros fatores químicos e ao índice de cristalinidade da celulose.

Destaca-se pela análise termogravimétrica o potencial da natural Catuaí, pela menor perda de massa na terceira etapa. Esse fato está relacionado ao maior teor de lignina dessa cultivar, e conseqüentemente, a maior estabilidade térmica.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resíduos madeiros da espécie *Coffea arabica* L. apresentaram grande potencial para o uso energético. Foram encontrados altos teores de extrativos totais, lignina, carbono e elevada densidade básica e poder calorífico volumétrico.

Entre as características analisadas, os teores de materiais voláteis, carbono fixo, lignina e o poder calorífico superior e inferior não sofreram influência do efeito de sistema ou de cultivar.

A cultivar Catuaí, apresentou melhores médias de densidade básica, cinzas, estoque em carbono por unidade de volume e holoceluloses.

A madeira Convencional Catuaí apresentou a menor relação  $K_2O/CaO$ , portanto, maior ponto de fusão de cinzas entre as madeiras do cafeeiro.

A madeira proveniente do sistema convencional cultivar Catuaí sofreu a menor aceleração ao processo de degradação durante o pico de temperatura.

**WOOD FROM *COFFEA ARABICA* L. AS A SOURCE OF  
BIOENERGY IN DIFFERENT CULTIVATING SYSTEMS AND  
CULTIVARS**

**ABSTRACT**

The aim of this study was to evaluate the quality of *Coffea arabica* L. wood in different cultivars and cultivating systems as a source of bioenergy, as well as select the best variety and type of cultivation for charcoal and bioenergy production. We used wood derived from three cultivating systems (natural, conventional and organic) and two distinct cultivars (Mundo Novo and Catuaí) in a total of six treatments. We quantified the chemical, elemental, molecular and immediate composition of the wood, determining the basic density, carbon stock of the wood, superior and inferior calorific values, superior and inferior volumetric calorific values of the analyzed woods. The volatile material content, fixed carbon, superior and inferior calorific values and the lignin content were not influenced by cultivar or cultivating system. The holocellulose content was influenced by the cultivar, and the organic system with the Catuaí cultivar stood out in regard to the high holocellulose content, being statistically different from the other treatments. For the other studied variables (ash, total extractives, basic density, carbon stock on the wood, superior and inferior volumetric caloric values), there was influence of cultivar effect. Novo Mundo cultivar presented high levels of extractives, which influenced the thermal stability of the analyzed woods. The wood residue of the *Coffea arabica* L. species presented great potential for energetic use, especially for the Catuaí cultivar, because of a higher basic density, larger carbon stock on the wood and larger superior and inferior volumetric caloric values and smaller extractives content.

Keywords: Biomass. Energy. Coffee plantation residue.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762- 84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

\_\_\_\_\_. **E711-87**: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia, 2004. 8 p.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília, 2011. 130 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M-11/77**: teor de cinzas. São Paulo, 1974a. 8 p.

\_\_\_\_\_. **M3/69**: métodos de ensaio. São Paulo, 1974b. 7 p.

\_\_\_\_\_. **M70/71**: métodos de ensaio. São Paulo, 1974c. 8 p.

BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 534-537, out. 2009.

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

CAIXETA, R. P. et al. Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 43-51, jan./fev. 2003.

CATANI, R. A. et al. Absorção de nitrogênio e enxofre pelo cafeeiro *Coffe arabica* variedade mundo novo (B Rodr.) Choussy aos dez anos de idade. In: ANAIS DA ESALQ, 22., 1965, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1965. p. 81-93.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira**: 1ª estimativa, janeiro/2012. Brasília, 2012. 18 p. Disponível em:

<<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>>. Acesso em: 10 nov. 2012.

CONCEIÇÃO, L. D. C. S.; SERENO, M. J. C.; BARBOSA NETO, J. F. Tolerância ao alumínio em plantas: toxicidade, mecanismo e genes em espécies cultivadas. **Revista Brasileira Agrobiologia**, Pelotas, v. 14, n. 3, p. 395-405, jul./set. 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Wood energy**: the way ahead. Disponível em:

<<http://www.fao.org/docrep/005/y4450e/y4450e02.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, Essex, v. 103, n. 1, p. 249-258, Jan. 2012.

GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan./fev. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.  
Diretoria de Pesquisas. Coordenação de Agropecuária. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**: 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2010/pevs2010.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2013.

JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel Aprocessing Technology**, Amsterdam, v. 54, p. 17-46, Mar. 1998.

LIMA, J. R. et al. Biodiesel de babaçu (*Orbignya sp.*) obtido por via etanólica. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 600-603, jan. 2007.

MÜLLER, A. et al. Investigation of thermal degradation of three wood species as initial step in combustion of biomass. **Proceedings of the Combustion Institute**, Berlin, v. 29, n. 1, p. 399-406, 2002.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. quality parameters of *Eucalyptus pellita*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

PEREIRA, M. A. **Confecção de moveis com a madeira de *Coffea arabica* L.** 2008. 59 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

POLETTTO, M. et al. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, Essex, v. 109, p. 148-153, Apr. 2012.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de qualea parviflora. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, out./dez. 2011.

\_\_\_\_\_. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 1166-1185, Aug. 2013.

\_\_\_\_\_. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Agriambi**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, Nov. 2012.

RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; PINTO, A. N. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 569-575, abr. 2006.

SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, May 2001.

SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, jan./mar. 2012.

STERN, W. B.; GERBER, Y.; NATRUN, W. Potassium, calcium glass: new data and experiments. **Archaeometry**, Oxford, v. 1, p. 137-156, Feb. 2004.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, May 2010.

WERTHER, J. et al. A combustão de resíduos agrícolas. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 26, p. 1-27, Feb. 2000.

WILD, P. J. de et al. Biomass valorisation by staged degasification.  
**Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 85, n. 1/2,  
p. 124-133, May 2009.

**ARTIGO 3 Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Coffea Arabica* L. como fonte de bioenergia, procedente de diferentes sistemas de cultivos e cultivares**

**Edson Rubens da Silva Leite, Sebastião Carlos da Silva Rosado\***

\*Programa de pós-graduação: Ciência e tecnologia da Madeira  
Universidade Federal de Lavras, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE  
*COFFEA ARABICA* L. COMO FONTE DE BIOENERGIA,  
PROCEDENTE DE DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVOS E  
CULTIVARES**

**RESUMO**

Objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade do carvão proveniente da madeira de *Coffea arabica* L. procedente de diferentes cultivares e sistemas de cultivo como fonte de bioenergia, além de selecionar a melhor variedade e tipo de cultivo para produção de carvão vegetal. Foram utilizadas técnicas estatísticas univariada e multivariada, além da identificação dos componentes minerais para seleção e avaliação da qualidade do carvão vegetal do cafeeiro, proveniente de três sistemas de cultivo (natural, convencional e orgânico) e duas cultivares distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos. Foi quantificado o teor de cinzas, a densidade relativa aparente, a densidade relativa verdadeira, o estoque de carbono fixo, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior, o poder calorífico superior e inferior volumétricos, além do rendimento em carvão, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e a porosidade do carvão cafeeiro. Observou-se que os sistemas orgânico e convencional com a cultivar Catuaí se destacaram para o uso siderúrgico e energético. O efeito de cultivar sobre a densidade relativa aparente foi importante para formação dos componentes principais e na similaridade entre os sistemas. A cultivar Catuaí do sistema orgânico se destacou no rendimento gravimétrico em carvão e no rendimento em carbono fixo, sendo, estatisticamente, diferente dos demais sistemas. O carvão do cafeeiro apresentou, em todos os sistemas estudados, minerais na seguinte ordem decrescente  $Ca > K > Mg > P$ . O carvão vegetal do cafeeiro, proveniente do sistema convencional, apresentou a menor relação  $K_2O/CaO$ .

Palavras-chave: Biomassa. Bicomcombustível. Subproduto da cafeicultura. Biocarvão.

## 1 INTRODUÇÃO

Carvão vegetal é o produto sólido, obtido por meio da carbonização da madeira, cujas características dependem das técnicas utilizadas para sua obtenção e o uso para o qual se destina.

As propriedades do carvão vegetal estão diretamente relacionadas às características físicas, químicas e anatômicas da madeira utilizada na sua produção. Entre todas as características físicas da madeira, a densidade básica é a que tem maior influência sobre a qualidade do carvão. O rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeira mais densa (OLIVEIRA et al., 2010).

Existem vários tipos de carvão e com diversas finalidades específicas. Segundo Brito e Barrichelo (1981), o carvão metalúrgico, por exemplo, é utilizado na redução de minérios de ferro em alto forno. Este carvão deve ser denso, ter uma boa resistência, além de apresentar baixo teor de materiais voláteis e cinzas. O carvão, para uso doméstico, não deve ser muito duro, ser facilmente inflamável. O carvão para gasogênio, cuja densidade aparente não deve ultrapassar a  $300 \text{ kg.m}^{-3}$  e ter teor de carbono de 75%, o carvão ativado, deve ter grande porosidade para aumentar o poder absorvente.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal. Os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral. É renovável, menos poluente (tem baixo teor de cinzas), praticamente isento

de enxofre/fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011).

Em 2011 o Brasil ofertou 44,1% em energia renováveis e a madeira e o carvão vegetal contribuíram com 9,7%. Em relação ao consumo, o setor industrial foi responsável por 35,9% de toda energia produzida no país. O setor industrial consumiu 8,3% e 5% de lenha e carvão vegetal, respectivamente. O setor siderúrgico foi o maior consumidor de carvão vegetal e o responsável pelo aumento do consumo em 9% em relação a 2010 (BRASIL, 2012).

Diante da importância da lenha e do carvão vegetal para o Brasil, é evidente que a pesquisa com novas biomassas são importantes, principalmente, para a produção de energia térmica ou elétrica. Investimentos em tecnologia têm buscado aumentar a eficiência de conversão em sistema de menor capacidade e reduzir custos de coleta e transporte (BRAND, 2010). Portanto, a utilização de resíduos de outros usos de biomassa e que o conteúdo energético por unidade de volume seja alto e que estejam já concentrados no local de uso, tendo o custo do transporte sido absorvido pelo custo do produto principal, pode aumentar a eficiência de conversão da biomassa em energia.

Entre esses novos produtos de biomassa com finalidade energética, podem se incluir os resíduos da cafeicultura. O Brasil detém 35,3% da produção mundial de café em uma área de 2.278 mil hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012) e gera resíduos com grande potencial para bioenergia (PROTÁSIO et al., 2012, 2013).

No sul de Minas Gerais, maior área produtora de café no Brasil, o manejo agrícola utilizado pela cafeicultura é caracterizado, principalmente, pelo cultivo convencional, sendo altamente dependente de insumos externos à propriedade, como pesticidas e fertilizantes químicos. O sistema orgânico e o agroflorestal natural se diferem no manejo agrícola, principalmente, com relação à fonte dos insumos orgânicos destinados à nutrição dos cafeeiros. O sistema orgânico caracteriza-se por ser cultivado a pleno sol e pelo uso constante de insumos externos à propriedade, utiliza farelo de mamona, palha de café. Já o sistema natural é caracterizado pelo sombreamento e pela realização do manejo dos matos espontâneos com enxada e roçadeira, a nutrição é feita com subproduto do café (palhas) e resto de folhas e galhos oriundos do próprio sistema (LOPES; FERRAZ, 2009).

Na literatura pouco se relata sobre a questão energética dos resíduos do cafeeiro e a influência dos sistemas de cultivo e das variedades na geração de bioenergia. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade do carvão vegetal de *Coffea arabica* L., para fins energéticos, utilizando três sistemas de cultivos existentes no Sul de Minas, o natural agroflorestal, orgânico e convencional.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização do material**

Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural agroflorestal, convencional e orgânico) e de duas variedades distintas (Mundo Novo e Catuaí), totalizando seis tratamentos, ou seja, os cafeeiros natural Mundo Novo (NtMN), natural Catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional Catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico Catuaí (OrgC).

Foram amostradas aleatoriamente quatro plantas, resultando em 24 arbustos abatidos. Os arbustos foram seccionados em toretes de, aproximadamente, 90 cm de comprimento. Da base foram retirados discos de, aproximadamente, 5 cm de espessura, para determinação da densidade básica. O restante dos toretes foi dividido em quatro partes, duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a realização das análises químicas e energéticas da madeira e o restante para a produção de carvão vegetal.

As lavouras de café cultivadas a pleno sol (sistema convencional), plantadas em 1995, e as lavouras de café orgânico (sistema orgânico), plantadas em 2001, forneceram as madeiras que foram coletadas no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais no município de Machado (MG), latitude 21°40' S, longitude 45°59' W e altitude de 873 m.

A nutrição do cafeeiro convencional foi realizada com aplicação de adubação química com formulação NPK. 25-00-25 e com super fosfato

simples. Entretanto, no cafeeiro orgânico a nutrição foi realizada com palha de café e esterco bovino.

A lavoura de café em sistema natural agroflorestal (sistema natural) foi implantada em 1985, no espaçamento de 3,5 x 1,0 m e, em 1998, foi adotado o modelo de produção natural orgânico em sistema agroflorestal consorciado com frutíferas e árvores nativas. As bananeiras foram cultivadas ao redor dos talhões do cafeeiro para servir como quebra-vento, árvores nativas e plantas anuais cultivadas entre as linhas dos cafeeiros. Essa lavoura recebeu recepa total em 2001 e não recebe aplicação de insumos agrícolas desde 1997. A partir dessa data, realiza-se apenas o manejo das plantas invasoras com enxada e roçadeira.

A nutrição do cafeeiro natural orgânico foi realizada com a aplicação de palha de café e com a serapilheira acumulada pelos restos de folhas, plantas invasoras e galhos oriundos do sistema agroflorestal. As madeiras sobre o sistema de cultivo natural agroflorestal foram fornecidas por uma propriedade no município de Machado, Sul de Minas Gerais, nas proximidades das coordenadas geográficas 21° 39' 59" S e 45° 55' 16" W e altitude de, aproximadamente, de 900 m.

## **2.2 Carbonizações e propriedades do carvão vegetal**

A madeira foi carbonizada em um forno elétrico tipo mufla, considerando a taxa de aquecimento de 1,67 °C min<sup>-1</sup>. A temperatura inicial foi de 100 °C e a final de 450°C, permanecendo estabilizada por 30 min, conforme utilizado em vários trabalhos na literatura (ASSIS et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; REIS et al., 2012). O tempo total de

carbonização foi de 4 horas. Foi utilizado em cada ensaio, aproximadamente, 500 g de madeira, previamente seca em estufa a  $103 \pm 2$  °C.

Após as carbonizações, foram avaliados os rendimentos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso condensado (RLP) e, por diferença, em gases não condensáveis (RGNC).

A densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal foi determinada, de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água, conforme descrito na norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

O poder calorífico superior do carvão (PCS) foi obtido em duplicata segundo a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

O poder calorífico inferior a 0% de umidade foi estimado utilizando a Eq. 1.  $PCI=PCS-(600 \times 9H/100)$  (1)

Onde, *PCI* é o poder calorífico inferior (kcal/kg); *PCS* é o poder calorífico superior (kcal/kg) e *H* é o teor de hidrogênio (%).

Foi realizada a análise química imediata nos carvões produzidos visando à determinação dos teores de umidade (TU), materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007). Esse ensaio foi realizado em duplicata.

O estoque em carbono fixo (ECF) no carvão vegetal por unidade de volume foi calculado multiplicando-se a densidade relativa aparente pelo teor de carbono fixo no carvão. Além disso, foi determinado o

rendimento em carbono fixo (RCF) multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo.

O poder calorífico superior volumétrico (PCSv) e o poder calorífico inferior volumétrico (PCIv) foram calculados multiplicando-se a densidade relativa aparente pelo poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), respectivamente.

A densidade verdadeira do carvão vegetal foi obtida de acordo com a norma NBR 9165 (ABNT, 1985). A porosidade do carvão é obtida a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, por meio da Eq.2:

$$PO(\%) = 100 - (DRA * 100) / DRV \quad (2)$$

Onde:

$PO(\%)$  = Porosidade em %

$DRA$  = Densidade Relativa Aparente

$DRV$  = Densidade Relativa Verdadeira

### **2.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva por Raios X (EDS)**

As amostras de carvão foram montadas em “stubs”, metalizadas no aparelho evaporador de carbono modelo Union CED 020 e observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por

Espectroscopia de Energia Dispersiva por Raios X no aparelho Quantax XFlash 5010 Bruker.

Para caracterizar as cinzas, os elementos metálicos foram normalizados e utilizou-se a massa molecular dos óxidos metálicos ( $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$  e  $P_2O_5$ ) para estimar o percentual de óxido em relação ao total das cinzas.

## 2.4 Avaliação experimental

### 2.4.1 Análise estatística univariada: fatorial duplo

Na avaliação das características quantificadas na madeira e no carvão de *Coffea arabica* utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial 3 x 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes sistemas e cultivares e 4 repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Eq. 2:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

Onde:  $Y_{ijk}$  é a observação (características do carvão) do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2$  e  $3$ ), no  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ) na  $k$ -ésima repetição ( $k = 1, 2, 3$  e  $4$ );  $\mu$  é uma constante inerente a todas as observações;  $\tau_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2,$  e  $3$ ), efeito fixo;  $\beta_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ), efeito fixo;  $(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação entre  $\tau_i$  e  $\beta_j$ , efeito aleatório, e  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental associado à observação  $Y_{ijk}$ , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância  $\sigma^2$ .

### **2.4.2 Análise de componentes principais**

Foram consideradas apenas as médias de cada variável e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se a matriz de correlação dos dados. Esse procedimento equivale a padronizar as variáveis e permite maior acurácia na análise (MINGOTI, 2005). Foram determinados os escores das componentes principais de interesse como forma de classificação e formação de grupos da madeira avaliada.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando-se o *software* R versão 2.11.0, pacote *stats* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Características avaliadas do Carvão de *Coffea arabica* L

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se as características energéticas e rendimentos e demais características para o carvão vegetal da madeira do cafeeiro para as duas cultivares e nos diferentes sistemas de cultivo.

Observa-se que as cinzas, matérias voláteis, carbono fixo, além do rendimento gravimétrico e rendimento em carbono são variáveis importantes para decidir a qualidade do carvão vegetal e, mais precisamente o seu poder calorífico superior como combustível (MAJUMDER et al., 2008; NEVES et al., 2011), pois quanto maior o teor de carbono fixo e menores teores de materiais voláteis e cinzas, maior o poder calorífico superior do combustível.

Tabela 1 Variáveis avaliadas do carvão *Coffea arabica* L. nos diferentes sistemas e cultivares

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio					
		TCF	CINZAS	TMV	RGC	DRV	RCF
Sistema	2	19,19092*	0,54490*	16,10371*	0,68742 <sup>ns</sup>	30638,06558*	3,06751*
Cultivar	1	5,26406 <sup>ns</sup>	3,31526*	0,22426 <sup>ns</sup>	7,60500*	94892,20800*	2,0184 <sup>ns</sup>
S x C	2	8,97467*	1,38475*	10,33045*	3,31470*	19696,51455*	3,22216*
Erro	23	2,02222	0,01987	2,09396	0,79724	4274,10202	0,69845
	CVe (%)	1,84	4,84	7,37	2,78	4,45	3,36

Cve= Coeficiente de variação experimental, TCF=teor de carbono fixo, TMV= teor de material volátil, DRV=densidade relativa verdadeira, RCF= rendimento em carbono fixo. \*=significativo a 5% pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ ); ns= não significativo pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ )

Tabela 2 Variáveis avaliadas do carvão *Coffea arabica* L. nos diferentes sistemas e cultivares

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio					
		DRA	ECF	PCS <sub>v</sub>	PCI <sub>v</sub>	PCI	PCS
Sistema	2	2285,1987 <sup>ns</sup>	3069,2524 <sup>ns</sup>	0,3322 <sup>ns</sup>	0,3275 <sup>ns</sup>	6270646,3183 <sup>ns</sup>	6285393,2489 <sup>ns</sup>
Cultivar	1	31279,9280*	16295,3182*	1,2558*	1,23306*	4089378,4380 <sup>ns</sup>	4109447,8004 <sup>ns</sup>
S x C	2	431,6438 <sup>ns</sup>	621,0674 <sup>ns</sup>	0,0522 <sup>ns</sup>	0,0504 <sup>ns</sup>	2949380,3040 <sup>ns</sup>	2938626,6837 <sup>ns</sup>
Erro	23	2109,3385	1390,5614	0,1936	0,1923	8018904,928	8018908,4
	CVe (%)	10,87	11,39	14,36	14,39	9,37	9,32

Cve= Coeficiente de variação experimental, DRA=densidade relativa aparente ECF= estoque de carbono fixo, PCS<sub>v</sub>=poder calorífico superior volumétrico, PCI<sub>v</sub>=poder calorífico inferior volumétrico, PCS= poder calorífico superior, PCI=poder calorífico inferior \*=significativo a 5% pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ ); ns= não significativo pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ )

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar e vice - versa, com respeito às variáveis da Tabela 1.

Para o teor de carbono fixo, observa-se o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar ( Tabela 3), mostrou que a cultivar catuaí no sistema natural apresentou o menor valor e estatisticamente diferente dos demais sistemas. Pelo desdobramento, percebe-se que não houve a influência do sistema sobre a cultivar Mundo Novo. Quanto à avaliação do efeito de cultivar dentro de sistema, verifica-se que houve diferença estatística apenas para o sistema natural, diferenciando-se do sistema orgânico e convencional

Analisando o desdobramento para a variável material volátil, percebe-se que apenas a cultivar Catuaí sofreu a influência do sistema. A Catuaí no sistema natural apresentou o maior valor em material volátil e se diferenciou dos demais.

A média do teor de carbono fixo e material volátil encontrado neste estudo foi de 77,45% e 19,63 % , respectivamente. Na literatura para o gênero *Eucalyptus* e na mesma temperatura de carbonização valores que variam de 73,82% a 83,17% em teores de carbono fixo e de 14,65% a 25,59% em teores de material voláteis (BOTREL et al., 2007; NEVES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; REIS et al., 2012), portanto o teor de carbono fixo e voláteis encontrado no carvão vegetal demonstra o potencial energético do cafeeiro.

Tabela 3 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as variáveis: cinzas, teores de material volátil e carbono fixo, rendimentos gravimétricos e em carbono fixo e densidade relativa verdadeira

Características	Cultivares	Sistemas		
		Convencional	Orgânico	Natural
TCF (%)	Catuaí	78,96 bA	77,81 bA	74,18 aA
	Mundo Novo	77,70 aA	78,91 aA	77,15 aB
TMV (%)	Catuaí	18,26 aA	18,28 aA	22,62 bB
	Mundo Novo	19,84 aA	19,84 aA	19,86 aA
RCF (%)	Catuaí	25,45 bA	26,28 bB	23,82 aA
	Mundo Novo	24,57 aA	24,60 aA	24,63 aA
RGC (%)	Catuaí	32,22 abA	33,77 bB	32,11 aA
	Mundo Novo	31,63 aA	31,18 aA	31,92 aA
DRV(Kg.m <sup>-3</sup> )	Catuaí	1530 aA	1521 aB	1547 aA
	Mundo Novo	1437 bA	1284 aA	1500 bA
Cinzas (%)	Catuaí	2,77 aB	3,89 cB	3,19 bB
	Mundo Novo	2,45 bA	2,19 aA	2,97 cA

Valores médios seguidos de mesmas letras minúsculas, na linha, e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

O teor de materiais voláteis tem dois enfoques significativos na utilização do carvão. Quando ele apresenta um teor de materiais voláteis elevado facilita a ignição e queima com bastante fumaça. Esta característica torna-se desvantajosa quando ele é utilizado como combustível doméstico. Outro fato é que combustíveis com maiores teores de carbono fixo tendem a queimar-se mais lentamente, permanecendo longo tempo na fornalha (BRAND, 2010).

Segundo Majumder et al. (2008), a preferência é por carvão de baixo teor de material volátil e de alto teor em carbono fixo, pois estas variáveis influenciam o poder calorífico do combustível desde que permaneça constante o teor de cinzas.

Para o rendimento em carbono fixo, verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar mostrou que a cultivar Mundo Novo não apresentou diferença estatística. O contrário ocorreu para a cultivar Catuaí que registrou o maior valor para o sistema orgânico e convencional, estatisticamente diferente do sistema natural. Quanto ao efeito de cultivar dentro do sistema, fica evidente que o sistema orgânico apresentou diferença estatística e se diferenciou do sistema convencional e natural. Portanto, a variedade Catuaí no sistema orgânico e convencional possui o maior teor em carbono fixo e não se diferencia entre si.

O rendimento em carbono fixo que expressa a quantidade de carbono presente na madeira e que ficou retido no carvão vegetal, é fruto do rendimento gravimétrico pelo teor de carbono fixo, portanto envolve características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal. O carvão do cafeeiro apresentou em média 24,89% em

rendimento em carbono, este valor está próximo aos da literatura para *Eucalyptus* de 26,64; 24,80; 27,06 (NEVES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; REIS et al., 2012).

Em relação ao rendimento gravimétrico, a média alcançada pelo carvão do cafeeiro foi de 32,14%. Observa-se, pela Tabela 3, que não houve diferença estatística para a cultivar Mundo Novo, mas entre a cultivar Catuaí o sistema natural apresentou o menor rendimento e se diferenciou do sistema orgânico.

Protásio et al. (2011), utilizando a mesma temperatura de carbonização deste trabalho e avaliando a qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*, encontraram o valor médio de rendimento gravimétrico de 34,60%, superior ao carvão de *Coffea arabica* (32,14%). Assis et al. (2012), Neves et al. (2011) e Oliveira et al. (2010), trabalhando com o carvão de *Eucalyptus*, encontraram valores médios de 32,04%, 31,48% e 31,63%, respectivamente, para a mesma temperatura final de carbonização. Rowell e Dietenberge (2005) mostram sobre várias temperaturas o rendimento em carvão da madeira de pinho, celulose e lignina. Para a celulose o maior rendimento é de 63,3% a 325°C e a 400°C esse rendimento diminuiu para 16,7%. A 400°C a lignina isolada obteve um rendimento de 73,3%, nesta mesma temperatura o rendimento em carvão para a madeira de pinho é de 24,9%. Portanto, inferior ao cafeeiro que apresentou o valor mínimo em rendimento de 31,18% e próximo da média de 32,14%. Dessa forma, o rendimento obtido do carvão *Coffea arabica* pode ser considerado satisfatório, pois se apresenta dentro dos limites de rendimento em carvão vegetal em relação à madeira

do gênero *Eucalyptus*, que é notoriamente usado para produção de energia por várias empresas do setor.

Contudo, o rendimento depende da finalidade a que se propõe, considerando-se os aspectos produtivos, geralmente, é desejável obter elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em razão do maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores rendimentos em líquido e em gases não condensáveis, pois esses são subprodutos do processo de pirólise (ASSIS et al., 2012).

Quanto ao rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) e em gases não condensáveis (RGNC), o carvão do cafeeiro não sofreu influência do sistema ou cultivar e a média geral foi de 44,24% e 23,64%, respectivamente.

A densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, isto é, a densidade aparente, descontando-se o volume da porosidade interna. Quando se relaciona a densidade verdadeira com a aparente, tem-se a medida da porosidade do carvão. A porosidade é a medida de espaço vazio “poros” em um material, é uma característica singular do carvão vegetal influenciando na densidade, higroscopicidade e reatividade. Nesse estudo o valor médio encontrado para a densidade relativa verdadeira e porosidade foi de 1470 kg.m<sup>-3</sup> e 71,12%, respectivamente, sendo a cultivar Mundo Novo apresentando carvão mais poroso nos sistemas convencional e natural. Oliveira et al. (2010), trabalhando com carvão de *Eucalyptus pellita* F.Muell, encontraram valores de 1459 Kg.m<sup>-3</sup> para densidade relativa verdadeira e 75,82% de porosidade, portanto valores próximos ao carvão do cafeeiro.

Quanto ao teor de cinzas, verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar mostrou que houve diferença estatística para as duas cultivares estudadas. Entre as cultivares catuaí, o sistema orgânico apresentou o maior valor e se diferenciou dos demais sistemas. Para a cultivar Mundo Novo, o maior teor de cinzas foi do sistema natural e se diferenciou do sistema convencional e orgânico

Quanto ao teor de cinzas, é desejável o baixo teor, pois afeta a gestão do carvão e aumenta os custos de processo e pode reduzir a inflamabilidade (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013). Segundo estes mesmos autores as normas Belégicas e Francesas (NBN M11-001 E NF 846 E) não consideram o teor de cinzas, durante avaliação da qualidade do carvão, no entanto para as normas alemãs o nível máximo aceitável é de 6%.

A média de conteúdo de cinzas no cafeeiro foi de 2,91%, portanto quanto ao teor de cinzas o carvão do cafeeiro atenderia as normas alemãs. Na literatura são encontrados baixos teores de cinzas (< 1%) para o gênero *Eucalyptus* (ASSIS et al., 2012; NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2012).

Na Figura 1 encontra-se o teste de comparação múltipla realizado, considerando a cultivar como fator de variação, uma vez que a interação sistema x cultivar e efeito sistema não foram significativos pelo teste F ( $p$ -valor >0,05) para densidade relativa aparente, estoque de carbono fixo, poder calorífico superior volumétrico e poder calorífico inferior volumétrico.

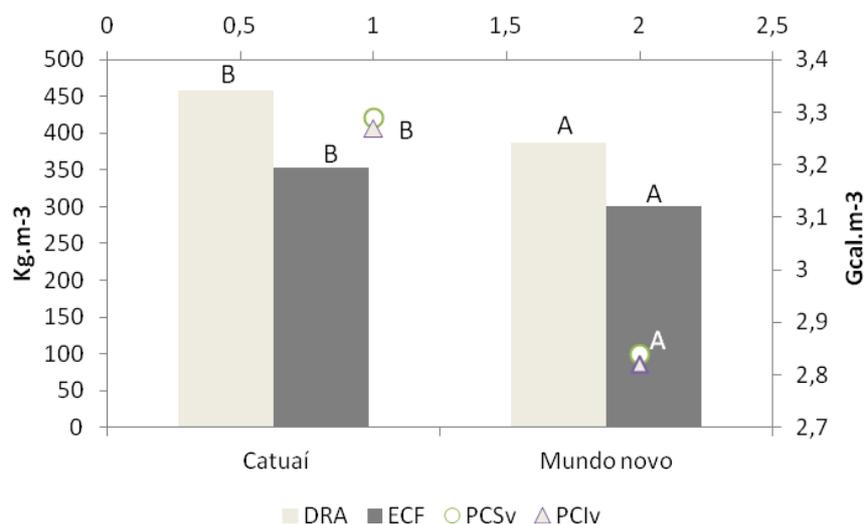


Figura 1 Efeito de cultivar na densidade relativa aparente (DRA), estoque de carbono fixo (ECF), poder calorífico superior volumétrico (PCsv) e poder calorífico inferior volumétrico(PCIv)

Avaliando-se a densidade relativa aparente do carvão do cafeeiro, observa-se que a cultivar Catuaí apresentou maiores valores médios ( $458,62 \text{ Kg.m}^{-3}$ ). A densidade aparente do carvão vegetal, juntamente com a quantificação do poder calorífico, é fundamental para se avaliar o potencial energético de um bicomcombustível, pois determina a sua densidade energética (PCsv e PCIv), ocorrendo um aumento na qualidade de energia por unidade de volume do combustível.

Pereira et al. (2012) encontraram densidade relativa aparente do carvão vegetal para seis clones de eucaliptos, a idade de 7,5 anos uma variação de  $360 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $410 \text{ Kg.m}^{-3}$ . Portanto, valores inferiores ao encontrado neste estudo.

O estoque em carbono fixo (ECF) no carvão vegetal por unidade de volume é o resultado da densidade relativa aparente pelo teor de carbono fixo no carvão, portanto quanto maior a densidade do carvão maior será a sua resistência mecânica e maiores serão os estoques energético e de carbono fixo.

Na literatura encontra-se, para o carvão de *Qualia parviflora*, uma espécie do cerrado, obtido na mesma temperatura deste estudo o valor de 311,68 Kg.m<sup>-3</sup> (PROTÁSIO et al., 2011). Neves et al. (2011), trabalhando com três clones de *Eucalyptus*, em dois locais de plantios e na mesma temperatura de carbonização, encontraram em média 275,04 kg.m<sup>-3</sup> em estoque de carbono fixo. Neste estudo a média em de estoque em carbono fixo para o carvão cafeeiro foi de 353,43 e 301,35 Kg.m<sup>-3</sup> para a variedade catuaí e Mundo Novo, respectivamente. Estes resultados encontrados para o estoque em carbono fixo estão acima dos valores encontrados na literatura o que demonstra a qualidade do carvão do cafeeiro para produção energética.

Observa-se a influência da densidade relativa aparente sobre a densidade energética do cafeeiro, pois os valores similares para o poder calorífico superior nos diferentes sistemas em média de 7158,67 e 7356,33 kcal.kg<sup>-1</sup> para a cultivar catuaí e Mundo Novo, respectivamente, não alterou a tendência da maior densidade relativa aparente gerar maiores densidades energéticas. O que indica que os sistemas e as cultivares estudadas não influenciaram no poder calorífico superior do cafeeiro. A mesma tendência ocorreu para o poder calorífico inferior com medias de 7117,87 e 7315,04 Kcal.kg<sup>-1</sup>, como se pode visualizar a diferença entre o poder calorífico superior e inferior é muito pequena, não

sendo significativa, pois para efeito prático de uso da biomassa para geração de energia são consideradas significativas diferenças superiores a 300 kcal/kg (BRAND, 2010).

Com relação ao poder calorífico volumétrico superior, o cafeeiro apresentou a média de 3,29 e 2,83 Gcal.m<sup>-3</sup> para a cultivar Catuaí e Mundo Novo respectivamente, portanto uma diferença de 0,46 Gcal.m<sup>-3</sup>.

Portanto, com o 1m<sup>3</sup> de carvão da cultivar Catuaí é possível gerar 3824 KWh de energia, ao passo que com o carvão Mundo Novo essa produção seria de 3289 KWh, uma diferença de 535 em KWh.

Na literatura encontra-se, por exemplo, o carvão do clone híbrido GG 100 (ASSIS et al., 2012) com potencial para gerar 2833,52 KWh.m<sup>-3</sup>, portanto inferior ao Mundo Novo. Oliveira et al. (2010), estudando o carvão vegetal do *Eucalyptus pellita* de 5 anos de idade a taxa de aquecimento de 1,36 °C/min e tempo de carbonização de 6h e temperatura de 450°C, encontraram a densidade relativa aparente de 353 kg.m<sup>-3</sup> e poder calorífico superior de 8258 Kcal.kg<sup>-1</sup>, o que corresponde à densidade energética de 2,92 Gcal.m<sup>-3</sup>, gerando o equivalente a 3390 KWh. Pode-se observar que, mesmo com alto poder calorífico do *Eucalyptus pellita*, a produção energética do carvão catuaí foi maior, o que demonstra a potencialidade do *Coffea arabica* em gerar energia. Por outro lado, fica evidente que a densidade do carvão é um fator que exerce muita influência na avaliação energética do carvão do cafeeiro.

### 3.2 Análise da composição mineral da madeira e do carvão de *Coffea arabica L*

Na Tabela 4 encontram-se os valores para os elementos químicos encontrados na madeira do cafeeiro em diversos sistemas de cultivo e para as cultivares Catuaí e Mundo Novo.

Na madeira do cafeeiro foi encontrada a seguinte ordem decrescente  $K > Ca > Mg > Al > P$ . O carvão do cafeeiro apresentou a seguinte ordem decrescente  $Ca > K > Mg > P > Al$ .

Observa-se que os três maiores minerais na madeira se mantiveram no carvão vegetal, mas há uma inversão de teores entre K e Ca. Isto, provavelmente, ocorre porque o ponto de fusão e de ebulição e as entalpias de vaporização dos metais alcalinos terrosos (Ca) são maiores que a dos metais alcalinos (K) (MAHAN, 1995).

Tabela 4 Composição mineral da madeira e do carvão do cafeeiro

	Minerais (madeira)					Minerais (carvão)				
	K	Ca	Mg	Al	P	K	Ca	Mg	Al	P
ConvCat	39,27	32,05	28,67	nd*	nd	33,88	53,35	9,90	nd*	2,87
ConvMn	53,76	28,63	17,61	nd	nd	31,19	56,19	10,85	nd	1,77
OrgCat	60,83	15,25	16,86	7,06	nd	36,82	49,52	10,26	nd	3,41
OrgMn	47,65	18,63	21,51	12,22	nd	35,72	44,15	13,71	nd	6,42
Natcat	39,23	18,00	12,88	25,40	4,49	34,81	43,01	15,04	3,16	3,98
NatMn	53,79	16,70	20,09	9,41	nd	36,16	51,45	8,77	nd	3,62

\*nd: não detectado.

Observa-se que em todos os sistemas e cultivares o teor de potássio diminui com a temperatura de carbonização. Isto está de acordo com Etitgni e Campbell (1991), ao registrarem que o conteúdo de K diminuiu com a temperatura, provavelmente, em virtude do baixo ponto de fusão e dos pontos de decomposição de seu óxido. Segundo estes autores o rendimento de cinzas e a composição química são alterados com a temperatura e, assim, a temperatura de combustão poderia afetar o valor de cinzas da madeira e as suas possíveis aplicações.

Observa-se que existe uma depleção ou redução dos minerais detectados no carvão em relação à madeira. Vassilev et al. (2010) definiram o fator de depleção (FD) como a razão entre o conteúdo de minerais da biomassa com o conteúdo no carvão. Para o cafeeiro o maior fator de depleção ocorreu no sistema convencional de cultivo na seguinte ordem decrescente  $Mg > K$ .

Tabela 5 Composição química de cinzas do carvão do cafeeiro

	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O/CaO
ConvCat	43,94	40,16	8,83	nd*	7,07	<b>1,09</b>
ConvMn	41,78	43,71	10	Nd	4,51	<b>0,96</b>
OrgCat	46,55	36,34	8,92	Nd	7,07	<b>1,28</b>
OrgMn	43,04	30,89	11,37	Nd	14,7	<b>1,39</b>
Natcat	42,12	30,21	12,52	5,99	9,16	<b>1,39</b>
NatMn	45,81	37,83	7,64	Nd	8,73	<b>1,21</b>

\*nd= não detectado

Elevado teor de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) contribui para baixar o ponto de fusão das cinzas o que pode causar aglomeração, incrustações e corrosão na superfície de transferência de calor (SAENGER et al., 2001; WETHER et al., 2000). Portanto, deseja-se que o fator de depleção ou redução do potássio (K) seja o maior possível para o carvão.

Segundo Stern, Gerber e Natrun (2004), o cálcio e o potássio definem a temperatura de fusão das cinzas. Quanto menor a relação K<sub>2</sub>O/

CaO, maior será o ponto de fusão das cinzas. Para o cafeeiro a menor relação  $K_2O/CaO$  ocorreu no sistema convencional. Portanto, a produção do carvão vegetal do cafeeiro com madeira proveniente do sistema convencional é a mais propícia ao uso energético.

### **3.3 Análise de componentes principais (PCA) para o carvão vegetal**

Na Tabela 6 encontram-se os autovetores nas duas primeiras componentes principais, bem como a variância explicada por essas variáveis latentes. Observa-se que as duas primeiras componentes principais apresentaram os maiores autovalores e explicaram 79% da variância total dos dados.

Analisando-se a primeira componente principal observa-se que os maiores autovetores negativos são relativos à densidade relativa aparente, estoque em carbono fixo, poder calorífico superior volumétrico e poder calorífico inferior volumétrico. Logo, quanto maior o valor dessa componente (escore) mais propício será o carvão *Coffea arabica L* para a geração de energia.

Tabela 6 Autovetores ( $\hat{\rho}$ ) das três primeiras componentes principais

Características originais	PC1	PC2
Teor de cinzas	-0,1889	0,226406
Teor de material volátil	0,205202	0,370511
Teor de carbono fixo	-0,12643	-0,4210
Poder calorífico superior	-0,06478	-0,44274
Poder calorífico inferior	-0,06515	-0,44266
Densidade relativa aparente	-0,35399	0,13787
Estoque em carbono fixo	-0,37078	0,038874
Poder calorífico Superior volumétrico	-0,37314	-0,002
Poder calorífico inferior volumétrico	-0,37374	-0,01978
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal	-0,26414	0,115116
Rendimento em líquido pirolenhoso	-0,16987	0,204408
Rendimento em gases não condensáveis	0,280443	-0,24554
Rendimento em carbono fixo	-0,29648	-0,18589
Densidade relativa verdadeira	-0,09663	0,261926
Porosidade	0,285613	0,053405

Quanto à componente principal dois observam-se autovetores negativos e significativos referentes às variáveis: teor de carbono fixo, poder calorífico superior e poder calorífico inferior. Para o teor de material volátil foi obtido um autovetor positivo e com elevada contribuição nessa componente principal. Logo, quanto menores os escores dessa componente principal mais propício será o carvão do cafeeiro para a produção de energia, pois maior será o seu teor de carbono fixo.

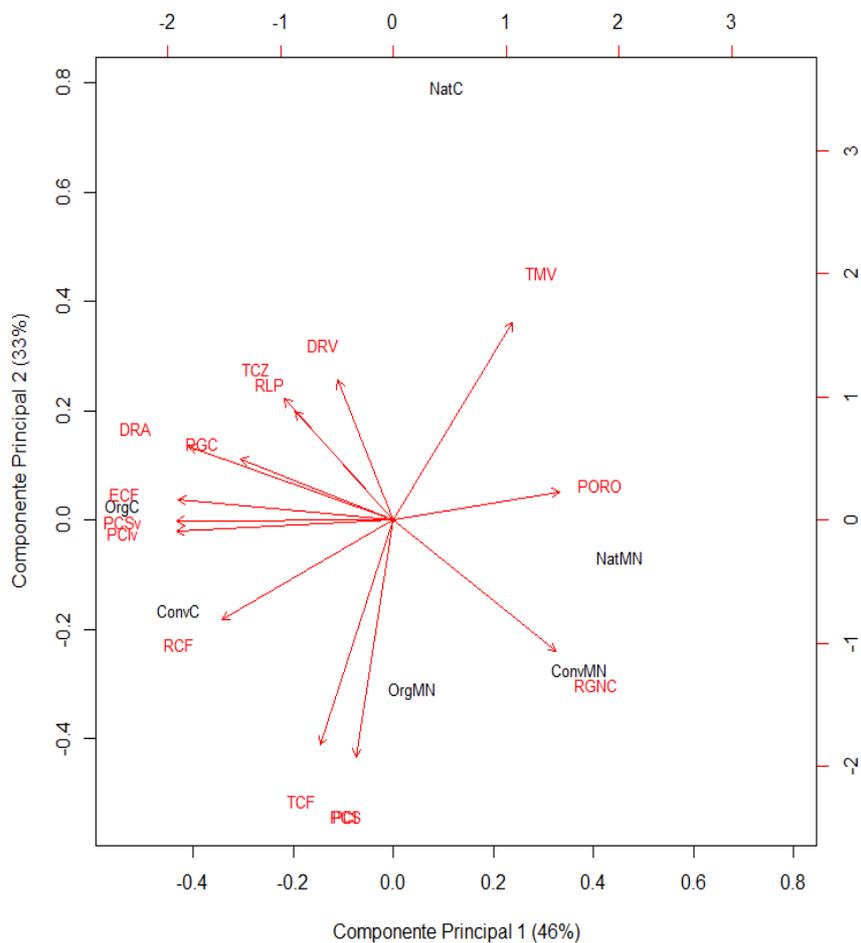


Figura 2 Dispersão do carvão *Coffea arabica* em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais. Em que: PCS: poder calorífico superior; rendimentos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e carbono fixo (RCF); teor de carbono fixo (TCF), teor de materiais volátil (TMV), teor de cinzas (TCz), densidade relativa aparente (DRA), densidade relativa verdadeira (DRV);, ECF: estoque de carbono fixo e poro

Analisando-se a distribuição gráfica dos tratamentos considerados em relação às duas primeiras componentes principais pode-se perceber a distinta separação entre os sistemas e cultivares (Figura 3). Esse resultado indica, de maneira geral, o significativo efeito da cultivar na qualidade do carvão do cafeeiro visando à produção de bioenergia. Esta análise evidencia o resultado encontrado no desdobramento da densidade relativa aparente do carvão, que influenciou nas variáveis energética, em estoque de carbono e em rendimento gravimétrico.

A análise dos autovetores dos componentes principais é fundamental para compreender os agrupamentos formados e a dispersão do carvão no plano cartesiano.

Observa-se que se pode formar três grupos distintos considerando-se as componentes principais 1 e 2 que explicam 79% da variabilidade dos dados (Figura 3). Além disso, as variáveis mais importantes para a classificação e seleção da biomassa para a geração de bioenergia apresentaram maior contribuição nessas duas componentes.

O grupo I é formado pelo carvão cafeeiro orgânico Mundo Novo e natural mundo e convencional Mundo Novo; o grupo II pelo natural Catuaí, e o grupo III pelo carvão proveniente dos cafeeiros convencional Catuaí e orgânico Catuaí.

O grupo I chama atenção por conter em todos os sistemas a cultivar Mundo Novo. A explicação para este fato é, provavelmente, o alto teor em gases não condensáveis e alta porcentagem em poros.

O grupo II apresentou o maior teor em material volátil e em cinzas. O teor de materiais voláteis apresentou vetor oposto ao teor de carbono fixo, (BUSTAMENTE-GARCIA et al., 2013). Portanto, menores

teores de carbono fixo e menor poder calorífico superior e inferior foram os responsáveis pelo isolamento deste grupo dos demais.

O grupo III apresentou índices importantes na avaliação da qualidade do carvão vegetal, ou seja, maior densidade relativa aparente, maior densidade energética, maior rendimento em carvão, maior teor em carbono fixo e estoque em carbono. Esse resultado é indicativo de que as madeiras provenientes do grupo III são mais propícias à produção de bioenergia.

## 4 CONCLUSÃO

A cultivar catuaí do sistema orgânico e convencional se destacou para o uso siderúrgico e energético, principalmente, pelos maiores valores de densidade relativa aparente e energética, estoque em carbono fixo, rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo.

O efeito de cultivar, sobre a variável densidade relativa aparente, foi a responsável pela formação do grupo 3 ( OrgC e ConvC) o que qualificou a cultivar catuaí como mais energética em relação ao Mundo Novo.

Houve uma similaridade entre os sistemas convencional e orgânico quanto ao rendimento em carbono fixo, teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico em carvão.

O carvão vegetal do cafeeiro, proveniente do sistema convencional, apresentou a melhor relação  $K_2O/CaO$ , portanto maior temperatura de fusão das cinzas em relação aos demais sistemas.

### Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, Fapemig e Capes pelo auxílio financeiro; ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas, campus Machado, pelo apoio financeiro e doação do material biológico utilizado ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais (Departamento de Ciências Florestais) da Universidade Federal de Lavras.

**QUALITY ASSESSMENT OF *Coffea arabica* L. CHARCOAL AS A  
SOURCE OF BIOENERGIA, DERIVED FROM DIFFERENT  
CULTIVATING SYSTEMS AND CULTIVARS**

**ABSTRACT**

The objective of this study was to evaluate the quality of charcoal derived from *Coffea arabica* L. wood from different cultivars and cultivating systems as a source of bioenergy, as well as select the best variety and type of cultivation for charcoal production. Univariate and multivariate statistical techniques were used, in addition to the identification of mineral components for the selection and evaluation of coffee charcoal quality, from three different cultivating systems (natural, conventional and organic) and two distinct cultivars (Novo Mundo and Catuaí), in a total of six treatments. We quantified the content of ash, the apparent relative density, true relative density, fixed carbon stock, superior calorific value, inferior calorific value, superior and inferior volumetric calorific values, in addition to charcoal yield, pyroligneous liquid, non-condensable gasses and coffee charcoal porosity. We observed that the organic and conventional systems with the Catuaí cultivar stood out for steelmaking and energetic use. The effect of cultivar over apparent relative density was important for the formation of major components and for the similarity between the systems. The Catuaí cultivar of the organic system was highlighted on the charcoal gravimetric yield and on fixed carbon yield, being statistically different from the other systems. The coffee charcoal presented the following minerals in decreasing order in all studied systems: Ca > K > Mg > P. The coffee charcoal derived from the conventional system presented the lowest K<sub>2</sub>O/CaO ratio.

Keywords: Biomass. Biofuel. Byproduct of coffee production. Biochar.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D 1762- 84:** standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília, 2011. 130 p.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8633:** carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9165:** carvão vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.

BOTREL, M. C. G. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.

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

BRASIL. **Balanco energético nacional 2012:** base 2011. Rio de Janeiro, 2012. 282 p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais; ESALQ-USP, 1981. 25 p. (Série Técnica, 2).

BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, London, v. 42, p. 169-174, Mar. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira: 1ª estimativa, janeiro/2012**. Brasília, 2012. 18 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>>. Acesso em: 10 nov. 2012.

ETITGNI, L.; CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**, Essex, v. 37, n. 2, p. 173-178, 1991.

LOPES, P. R.; FERRAZ, J. M. G. Caracterização do manejo agroecossistemas cafeeiros convencionais, organo-mineral, orgânico e agroflorestal em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, v. 4, n. 2, p. 805-809, nov. 2009.

MAHAN, B. M. **Química: um curso universitário**. 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 1995. 582 p.

MAJUMDER, A. et al. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. **Fuel**, London, v. 87, n. 13/14, p. 3077-3081, Oct. 2008.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, dez. 2011.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. quality parameters of *Eucalyptus pellita*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

PEREIRA, B. L. C. et al. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PROTÁSIO, T. D. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, Jan. 2013.

\_\_\_\_\_. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

\_\_\_\_\_. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Agriambi**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, Nov. 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

REIS, A. A. dos et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

ROWELL, R. M.; DIETENBERGER, M. A. Thermal properties, combustion, and fire retardancy of wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Hand book of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. p. 129-148.

SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, 2001.

STERN, W. B.; GERBER, Y.; NATRUN, W. Potassium, calcium glass: new data and experiments. **Archaeometry**, Oxford, v. 1, p. 137-156, Feb. 2004.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, London, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.

WETHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 26, n. 1, p. 1-27, Feb. 2000.

**ARTIGO 4** *Análise química elementar e imediata do carvão vegetal de Coffea arabica L. em diferentes sistemas de cultivos e cultivares*

**Edson Rubens da Silva Leite, Sebastião Carlos da Silva Rosado\***

\*Programa de pós-graduação: Ciência e tecnologia da Madeira  
Universidade Federal de Lavras, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

**ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR E IMEDIATA DO CARVÃO  
VEGETAL DE *Coffea arabica* L. EM DIFERENTES SISTEMAS DE  
CULTIVOS E CULTIVARES**

**RESUMO**

O café tem uma posição de destaque na economia brasileira, especialmente no Sul de Minas Gerais, principal estado produtor. Apesar de serem amplas as pesquisas, envolvendo a cafeicultura, existe uma carência de bibliografia a respeito do carvão vegetal da madeira *Coffea arabica*. No Brasil existem 5,6 bilhões de pés de café em uma área 2.3 milhões de hectares gerando resíduos como casca do fruto e madeira que apresentam potencial como combustíveis renováveis. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar por meio da análise química elementar e imediata o potencial energético do carvão vegetal de *Coffea arabica*, proveniente de três sistemas de cultivo (orgânico, natural agroflorestal e convencional) e duas cultivares (Catuaí e Mundo Novo). As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) com temperatura final de 450 °C. Determinou-se a composição química elementar e a imediata do carvão vegetal. Os sistemas sobre pleno sol se destacaram para fins energéticos (convencional e orgânico). A cultivar Catuaí no sistema convencional se destacou para o uso energético, principalmente pelos maiores teores de carbono fixo e carbono elementar, maior poder calorífico e, conseqüentemente, o menor teor de voláteis e a menor relação entre H/C. Este trabalho será útil aos produtores na secagem dos grãos, na valorização da madeira, na qualidade do carvão vegetal, além de futuros trabalhos para produção de biocarvão.

Palavras-chave: Biomassa. Bioenergia. Biocarvão. Resíduos da cafeicultura.

## 1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel importante no mundo. A melhor maneira de absorver o enorme aumento na demanda de energia é pela diversificação (GARCÍA et al., 2012). Neste contexto, o uso da biomassa vegetal como fonte de energia resulta um balanço favorável para o carbono global em relação aos combustíveis fósseis (KERN et al., 2012). Além disso, as plantas absorvem o CO<sub>2</sub> por meio do processo fotossintético em um ciclo, relativamente, curto de crescimento.

Comparados com os combustíveis fósseis, a lenha e o carvão vegetal podem ser obtidos a custos muito mais baixos pela população, principalmente, de baixa renda.

De toda a produção de madeira do Brasil, 10% é destinada à produção de carvão vegetal para o uso siderúrgico, mas essa quantidade, ainda, é insuficiente para atender ao crescimento do setor que registrou, em 2011, um aumento de 40% na exportação de ferro-gusa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2012). Diante disso, pesquisas relacionadas à produção de carvão vegetal com materiais lignocelulósicos alternativos (como a madeira do cafeeiro) podem ser uma estratégia para suprir a demanda das usinas siderúrgicas, bem como para o uso doméstico.

Portanto, a carbonização dos resíduos agrícolas se tornou importante não somente para o uso doméstico, metalúrgico ou ativado, mas também tem valor econômico com fertilizante (biocarvão) e

sequestro de carbono e retenção de água no solo (GALINATO et al., 2011; JEFFERY et al., 2011; KARHU et al., 2011; MCHENRY, 2009).

Existem várias evidências de que o carvão desempenha um papel importante na fertilidade do solo. O biocarvão pode oferecer uma opção para reduzir o conflito entre o cultivo de culturas para diferentes fins, como por exemplo, energia por sequestro de carbono ou comida (GASKIN et al., 2008).

Contudo, a utilização do carvão vegetal como fonte de bioenergia e biorredutor do minério de ferro ou como fertilizantes depende das suas características químicas, físicas, térmicas, energéticas e mecânicas e das relações entre tais características. Por exemplo, o valor calórico do carvão vegetal está intimamente relacionado com o teor elementar de carbono, hidrogênio e oxigênio e as razões entre elas.

Proporções elevadas de oxigênio, em comparação com o carbono, geralmente, reduzem o valor calórico do carvão. Altos teores de umidade, cinzas e nitrogênio, também, contribuem para reduzir o valor calórico do carvão vegetal (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008).

Para aperfeiçoar o processo de combustão em reatores adequados, um estudo abrangente sobre a caracterização das propriedades de combustível de biomassa é necessário, que inclui a análise química imediata (determinação dos teores de carbono fixo, umidade, cinzas e materiais voláteis) e a análise química elementar ( C, H, N, S e O) em relação ao valor calórico da biomassa (GARCÍA et al., 2012).

Resíduos agrícolas têm atraído o interesse como matérias-primas (PROTÁSIO et al., 2012) para a carbonização, porque eles, geralmente, são disponíveis em grandes quantidades, em razão do

processamento e parecem difíceis de usar, exceto como combustível (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2012).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2012), o Brasil possui cerca de 5,6 bilhões de pés de café e pouco mais da metade só no Estado de Minas Gerais. São cerca de 290 mil produtores em 15 estados. A área estimada de 2.351,3 milhões de hectares, um crescimento de 3,21% sobre a área de 2.278 milhões de hectares, existentes na safra 2011.

Em vários países produtores de café, tais como Colômbia, Venezuela, Costa Rica, Panamá e México, o cultivo é feito em sistemas agroflorestais (SAF) (RICCI; COSTA; PINTO, 2006). No Brasil, a maioria dos produtores preferem o cultivo a pleno sol, sendo em sistema convencional ou orgânico, por acreditarem que o sombreamento diminui a produtividade e aumenta a necessidade de mão de obra, além da dificuldade na passagem de máquinas. Estima-se que mais de 90% das lavouras existentes no Brasil são a pleno sol (RICCI; COSTA; PINTO, 2006).

As informações existentes na literatura são escassas e pouco se relata sobre a questão energética dos resíduos do cafeeiro e a influência dos sistemas de cultivo e variedades na geração de bioenergia. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade do carvão vegetal de *Coffea arabica* L, para fins energéticos, utilizando três sistemas de cultivos existentes no Sul de Minas Gerais, o natural agroflorestal, orgânico e convencional, por meio de sua composição química imediata e elementar.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material e amostragem efetuada**

Foram utilizadas madeiras provenientes de três sistemas de cultivo (natural agroflorestal, convencional e orgânico) e de duas variedades distintas (Mundo Novo e catuaí), totalizando seis tratamentos, ou seja, os cafeeiros natural Mundo Novo (NtMN), natural catuaí (NtC), convencional Mundo Novo (ConvMN), convencional catuaí (ConvC), orgânico Mundo Novo (OrgMN) e orgânico catuaí (OrgC).

Foram amostradas aleatoriamente quatro plantas, resultando em 24 arbustos abatidos. Os arbustos foram seccionados em toretes de, aproximadamente, 90 cm de comprimento e diâmetros que variaram de 5 a 10 cm. Da base foram retirados discos de, aproximadamente, 5 cm de espessura, para determinação da densidade básica. O restante dos toretes foi dividido em quatro partes, duas partes foram transformadas em cavacos e homogeneizadas para a caracterização da madeira.

A lavoura de café cultivada a pleno sol (sistema convencional), plantada em 1995, e a lavoura de café orgânico (sistema orgânico), plantada em 2001, forneceram as madeiras que foram coletadas no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, no município de Machado (MG), latitude 21°40' S, longitude 45°59' W e altitude de 873 m.

A nutrição do cafeeiro convencional foi realizada com aplicação de adubação química com formulação NPK 25-00-25 e com superfosfato simples e do cafeeiro orgânico com palha de café e esterco bovino.

A lavoura de café em sistema natural agroflorestal (sistema natural) foi implantada em 1985, no espaçamento de 3,5 x 1,0 m, e em 1998 foi adotado o modelo de produção natural orgânico em sistema agroflorestal consorciado com árvores frutíferas e nativas. As bananeiras foram cultivadas ao redor dos talhões do cafeeiro para servir como quebra-vento. Já entre as linhas foram cultivadas árvores nativas e plantas anuais. Essa lavoura recebeu recepa total em 2001 e não recebeu aplicação de insumos agrícolas desde 1997. A partir dessa data, realizou-se apenas o manejo das plantas invasoras com enxada e roçadeira.

A nutrição do cafeeiro natural orgânico foi realizada com a aplicação de palha de café e com a serapilheira acumulada pelos restos de folhas, plantas invasoras e galhos oriundos do sistema agroflorestal. As madeiras sobre o sistema de cultivo natural agroflorestal foram fornecidas por uma propriedade no município de Machado, Sul de Minas Gerais, nas proximidades das coordenadas geográficas 21° 39' 59" S e 45° 55' 16" W e altitude de, aproximadamente, 900 m.

## **2.2 Carbonizações e propriedades do carvão vegetal**

Após as amostras serem transformadas em cavacos no picador industrial, homogeneizadas e secas em estufa determinou-se o teor de umidade em equilíbrio.

A madeira seca foi carbonizada em um forno elétrico tipo mufla, considerando a taxa de aquecimento de  $100\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}$ . A temperatura inicial foi de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a final de  $450^{\circ}\text{C}$ , permanecendo estabilizada por 30 min com resfriamento natural, conforme utilizado em vários trabalhos na literatura (ASSIS et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2012; REIS et al., 2012; TRUGILHO et al., 2001). O tempo total de carbonização foi de 4 horas. Foi utilizado em cada ensaio, aproximadamente, 500 g de madeira, previamente seca em estufa a  $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Depois do resfriamento em convecção natural e a determinação do rendimento gravimétrico, foi realizada a análise química imediata do carvão vegetal visando determinar os teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e, por diferença, de carbono fixo (TCF), conforme diretrizes da norma ASTM D 1762-64 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 1977). Esse ensaio foi realizado em duplicata.

O poder calorífico superior do carvão (PCS) foi obtido segundo a norma NBR 8633 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984).

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), com base à massa seca de carvão, foram realizados em um analisador universal da marca Elementar ( modelo Vario Micro Cube) em duplicata. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a  $1.200^{\circ}\text{C}$ .

O teor de oxigênio foi obtido por diferença conforme a Equação 1. Foram determinadas, ainda, as relações C/H e C/O do carvão vegetal produzido.

$$O (\%) = 100 - C(\%) - H(\%) - N(\%) - S (\%) - Cz (\%) \quad (1)$$

Em que, O é o teor de oxigênio (base seca); C é o teor de carbono; H é o teor de hidrogênio; N é o teor de nitrogênio; S é o teor de enxofre e Cz é o teor de cinzas.

As razões atômicas entre N/C, H/C e O/C foram obtidas pela razão entre estes elementos.

### 2.3 Avaliação experimental

Na avaliação das características quantificadas do carvão de *Coffea arabica* utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), disposto em um esquema fatorial 3 x 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes sistemas e cultivares em 4 repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Eq. 2:  $Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$  (2)

Onde:  $Y_{ijk}$  é a observação (características do carvão) do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2$  e  $3$ ), no  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ) na  $k$ -ésima repetição ( $k = 1, 2, 3$  e  $4$ );  $\mu$  é uma constante inerente a todas as observações;  $\tau_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator sistema ( $i = 1, 2,$  e  $3$ ), efeito fixo;  $\beta_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo nível do fator cultivar ( $j = 1$  e  $2$ ), efeito fixo;  $(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito da interação entre  $\tau_i$  e  $\beta_j$ , efeito aleatório, e  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental associado à observação  $Y_{ijk}$ , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância  $\sigma^2$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Relações atômicas e análise elementar do carvão de *Coffea arabica* L.

A composição química elementar constitui a base dos cálculos de combustão, pois é a partir da porcentagem de cada um de seus elementos que pode ser calculado o potencial energético de um combustível (BRAND, 2010).

Observa-se que o efeito da interação entre sistema x cultivar foi significativo somente para o teor nitrogênio (Tabela 1), evidenciando a existência de dependência entre os fatores considerados (sistema e cultivar). Dessa forma, procedeu-se ao desdobramento e à avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar e vice - versa (Figura 1).

O teor de nitrogênio chama a atenção, pois a média do carvão (1,2%) tem, praticamente, mais que o dobro da madeira do cafeeiro (0,47%). Por algum motivo, o nitrogênio não se volatilizou e pela redução de massa do material o seu percentual no carvão, também, aumentou. Diblasi (2008) constatou que o carvão produzido a baixas temperaturas retém mais nitrogênio, no entanto, a temperaturas mais altas este elemento é liberado.

Oliveira et al. (2010) encontraram no carvão vegetal da madeira de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell, produzido utilizando a temperatura final de 450 °C, o valor de 0,41% de nitrogênio. Na temperatura de 550°C o valor encontrado foi de 0,31%, confirmando a observação neste estudo e de Diblasi (2008).

Com relação à carbonização, observa-se na Tabela 1 que o sistema convencional apresentou altos teores em nitrogênio. A relação entre nitrogênio/carbono foi maior para a cultivar Mundo Novo no sistema convencional.

Tabela 1 Componentes químicos elementares do carvão *Coffea arabica*, o poder calorífico superior, cinzas e as relações atômicas

Madeira	Tipo	Análise Elementar					Cinzas*	PCS <sup>ns</sup>	Relação atômica		
		N*	C <sup>ns</sup>	H <sup>ns</sup>	S <sup>ns</sup>	O	%	MJ/kg	N/C	H/C	O/C
ConvMN	Madeira	0,62	49,47	6,56	0,04	41,92	1,39	19,545	0,0125	0,1326	0,8474
	Carvão	1,39	83,04	3,26	0,01	9,84	2,46	30,948	0,0167	0,0393	0,1185
ConvC	Madeira	0,48	49,62	6,56	0,03	41,88	1,42	19,604	0,0097	0,1322	0,8440
	Carvão	1,30	83,45	3,17	0,02	9,3	2,77	30,999	0,0156	0,0380	0,1114
OrgMN	Madeira	0,46	50,08	6,65	0,04	41,67	1,11	20,15	0,0092	0,1328	0,8321
	Carvão	1,14	83,34	3,18	0,01	10,15	2,19	30,977	0,0137	0,0382	0,1218
OrgC	Madeira	0,43	50,22	6,65	0,03	40,89	1,77	20,309	0,0086	0,1324	0,8142
	Carvão	1,14	82,77	3,16	0,01	9,03	3,89	30,657	0,0138	0,0382	0,1091
NtMN	Madeira	0,32	49,28	6,56	0,04	42,55	1,25	19,39	0,0065	0,1331	0,8634
	Carvão	1,29	82,22	3,16	0,02	10,33	2,98	30,473	0,0157	0,0384	0,1256
NtC	Madeira	0,48	48,85	6,52	0,05	42,65	1,45	19,07	0,0098	0,1335	0,8731
	Carvão	0,94	77,44	3,16	0,01	15,26	3,19	28,262	0,0121	0,0408	0,1971

Onde \* = significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Altas relações C/N implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa. A combustão libera o dióxido de carbono para atmosfera e a relação C/N interfere na velocidade de liberação, juntamente com umidade do material combustível. Quanto menor for a relação C/N, mais rápida será a

liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, durante a combustão, fato este indesejável, pois este gás é um dos responsáveis pelo efeito estufa.

O carvão vegetal apresentou menor teor de enxofre em relação à madeira. Durante a pirólise, ocorreu a liberação de gases sulfurosos, porém as emissões de SO<sub>2</sub> podem ser consideradas desprezíveis quando se trata de biomassa vegetal (DERMIRBAS, 2003; GARCIA et al., 2012; JENKINS et al., 1998), portanto a quantidade de enxofre obtido neste estudo não tem o efeito negativo para o meio ambiente.

Para a produção de bioenergia, é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades de nitrogênio e enxofre, pois esses constituintes podem resultar em poluição ambiental, com a formação de óxidos de nitrogênio e enxofre tóxicos, formação de chuva ácida e corrosão, após a combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; KUMAR et al., 2010), além de não apresentarem correlação positiva com o poder calorífico (HUANG et al., 2009), portanto a quantidade de nitrogênio obtido neste estudo não tem o efeito negativo para o ambiente.

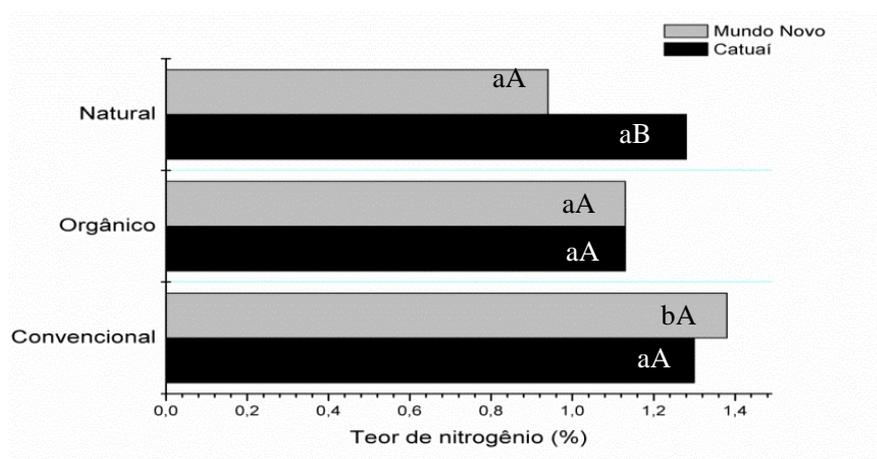


Figura 1 Teor de nitrogênio do carvão dos sistemas nas duas cultivares avaliadas. Barras seguidas de mesma letra minúscula referem-se ao desdobramento de sistema dentro de cada nível de cultivar. Já as letras maiúsculas referem-se ao desdobramento de cultivar dentro de cada nível de sistema. O teste utilizado foi o de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )

Para o nitrogênio, verifica-se pelo desdobramento da interação e avaliação do efeito de sistema dentro de cultivar que com a Mundo Novo o sistema natural e orgânico apresentaram os menores valores, enquanto que o sistema convencional apresentou o maior valor e, estatisticamente, diferente dos demais, como informado por Amaral et al. (2011), que a cultivar catuaí, comparada à Mundo Novo, é menos exigente em nitrogênio.

De maneira geral, os maiores valores nominais em teor de nitrogênio estão atribuídos ao sistema convencional. A explicação para este resultado pode ser que formas inorgânicas de nitrogênio, tais como o nitrato, ureia de amônio, frequentemente fornecidos em fertilizantes são usados para adubação em sistema convencional (WANG; HSU; TSAY, 2012).

Observa-se que o teor de oxigênio diminui com a carbonização o que é desejável em virtude das relações existentes entre esse componente elementar e o poder calorífico superior.

O objetivo da carbonização é aumentar o teor de carbono, como se pode observar na Tabela 1. De um modo geral, o teor de carbono apresenta um intervalo (amplitude) de 48,85 – 50,22% para as madeiras do sistema natural Catuaí e orgânico Catuaí, respectivamente, enquanto que o carvão apresenta uma amplitude de teor de carbono variando de

77,44 – 83,45% para natural Catuaí e convencional Catuaí, respectivamente. Isso resultou em um acréscimo médio de 62,35% em carbono.

Oliveira et al. (2010), usando a mesma temperatura de carbonização para a madeira de *Eucalyptus pellita* obteve carvão com 76,92%; 2,63% e 20,04% para carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente.

Dermirbas (2006), usando temperatura de pirólise entre 21,8- 427 °C, para casca de avelã, encontrou 87,4%, 2,4% 9,2% para carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente. Neste estudo os teores médios foram 82,04%; 3,18%; e 9,73%, respectivamente, valores próximos aos encontrados por Dermirbas (2006) ao usar resíduo agrícola. No entanto, o carvão do cafeeiro obteve qualidade superior ao carvão do *Eucalyptus pellita* pelo maior teor em carbono, hidrogênio e menor teor em oxigênio.

O valor médio em carbono nos sistemas convencional (83,25%) e orgânico (83,06%) que são produzidos a pleno sol, foram superiores ao sistema natural (79,83%) que é produzido sobre sombra.

Há relatos na literatura de que os cafeeiros sombreados apresentam uma redução na fotossíntese líquida em virtude da redução da radiação incidente, enquanto nos cafeeiros ao pleno sol ocorrem as maiores taxas fotossintéticas nos períodos da manhã, com rápidos decréscimos durante as horas de intensa radiação e temperatura elevada em decorrência do fechamento dos estômatos (MORAIS; MARUR; CARAMORI, 2003). No sistema natural agroflorestal as temperaturas são mais baixas que nos sistemas convencionais e as diminuições nas taxas fotossintéticas potenciais, provavelmente, ocorrem em função da

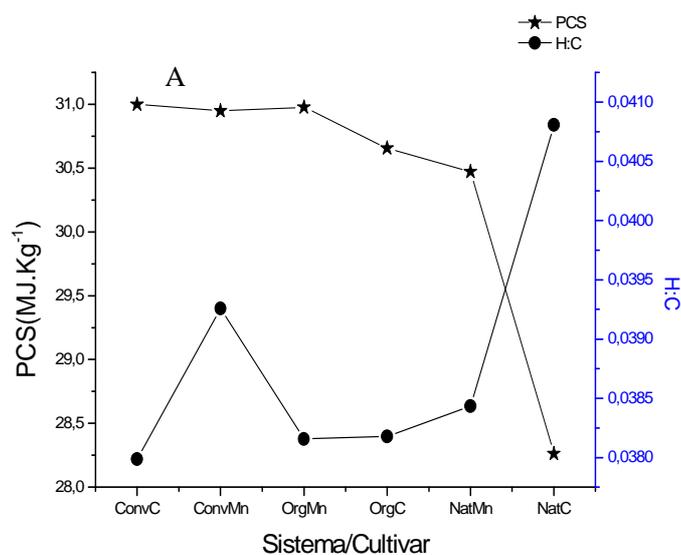
resistência bioquímica nos cloroplastídios provocadas por temperaturas do ar, relativamente, baixas (AMARAL; RENA; AMARAL, 2006).

A fotossíntese resulta na produção de carboidratos estruturais e não estruturais, compreendendo os tecidos da planta. Os componentes da biomassa incluem celulose, hemiceluloses, lignina, lipídio, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos. As concentrações de cada classe de compostos variam dependendo da espécie, tipo de tecido de planta, estágio de crescimento e condições de crescimento (JENKINS et al., 1998). Portanto, cafeeiros que crescem sobre sombras ou a pleno sol devem possuir diferentes concentrações desses compostos.

Os elementos químicos elementares têm um alta relação com o valor calórico dos combustíveis ( Figura 2). O valor de energia de um carvão está intimamente relacionado com o H: O: C e a relação entre estas grandezas. Quando ocorre uma reação química, as ligações dentro das moléculas dos reagentes são quebradas, e átomos e elétrons reorganizam-se para formar produtos. Em reações de combustão ocorre a oxidação rápida dos elementos combustíveis que são o carbono, hidrogênio e enxofre. O enxofre é, normalmente, sem importância, em relação a sua contribuição para a energia liberada pela combustão da biomassa vegetal, mas pode ser uma causa significativa de problemas de poluição e corrosão no caso de utilização dos combustíveis fósseis (como o carvão mineral). Um combustível é dito ter queimado completamente, se todo o carbono presente no combustível é convertido em dióxido de carbono, todo o hidrogênio é queimado para a água, e todo o enxofre é queimado para o

dióxido de enxofre. Se alguma destas condições não for cumprida, a combustão é incompleta (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008).

Chun et al. (2004) descreveram que o grau de carbonização pode ser determinado pela relação H/C, assim o carvão que apresenta a menor relação H/C, indica que tal carvão está altamente carbonizado, pois perdeu hidrogênio para formação de água. Por outro lado a maior razão H/C sugere que o carvão contém uma boa quantidade de resíduo orgânico (CHUN et al., 2004). Teor de resíduo orgânico elevado é certamente relacionado com a baixa temperatura de pirólise, o qual preserva certas estruturas originais de orgânicos (principalmente carboidratos, como resíduo de celulose).



B

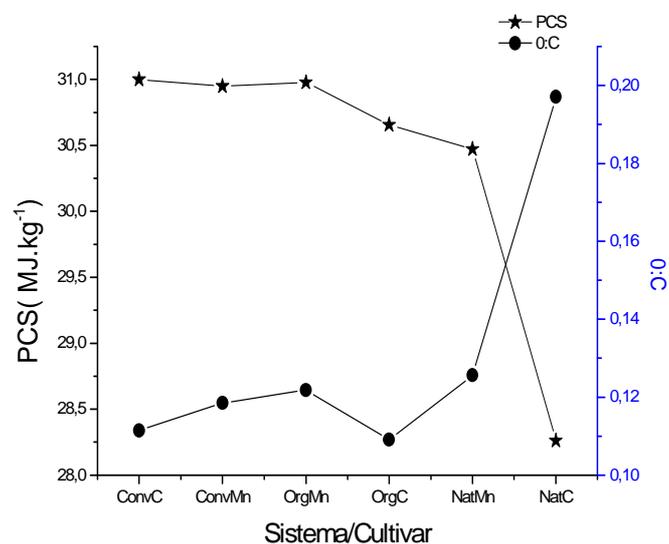


Figura 2 PCS em relação às proporções atômicas H:C (A) e O:C (B) do carvão *Coffea arabica*

Soares (2011) destacou que a maior relação S/G possui maior relação H/C. Para madeira destinada à produção de carvão vegetal, deve-se procurar por materiais com menores relações S/G, uma vez que o grupo guaiacil é mais preservado no processo de pirólise. Portanto, maior relação H/C são madeira mais reativas, ou seja, a menor relação H/C gera menor relação S/G, que é desejável para produção de carvão vegetal. Por esta relação podemos inferir que a madeira do *Coffea arabica* do sistema convencional da variedade catuaí possui uma proporção maior de guaiacil do que siringil.

Embora a temperatura de carbonização tenha sido a mesma para todos os tratamentos, observa-se que o carvão convencional catuaí teve a menor proporção de hidrogênio em relação ao carbono (0,455) e a

cultivar catuaí do sistema natural agroflorestal apresentou a maior relação H:C (0,489) (Tabela 1 e Figura 2). Isso se deve à maior taxa de aumento de carbono na cultivar catuaí convencional (68,17%), ao passo que a cultivar catuaí natural agroflorestal resultou na menor taxa (58,53%), o que pode estar relacionado à relação S/G e à maior taxa bioquímica da fotossíntese em sistema de pleno sol.

Bilgen e Kaygusuz (2008) mostraram que a composição química do carvão influencia fortemente no valor do trabalho da energia química. O valor do trabalho da energia de carvão está intimamente relacionado com as proporções entre o hidrogênio, oxigênio e carbono. Proporções elevadas de hidrogênio e/ou oxigênio em comparação com o carbono, geralmente, reduzem o valor da energia útil do carvão, em função da menor energia útil mantida em ligações C-O do em ligações C-C.

Portanto, o carvão convencional catuaí tem menor resíduo orgânico, menor relação S/G, menor número de ligações C-O e mais ligações C-C e, como consequência, o maior valor do PCS. Já o sistema natural cultivar catuaí apresentou o menor poder calorífico (Figura 2).

Para Chiou et al. (2004), a menor relação O/C indica que as superfícies deste material têm uma baixa afinidade com a água, isso porque o oxigênio se liga ao hidrogênio por meio das ligações de hidrogênio, portanto quanto maior o teor de oxigênio maior a possibilidade desta ligação ocorrer. Logo, a maior relação oxigênio/carbono é prejudicial ao objetivo energético, pois a umidade afeta o potencial energético do combustível, pois são necessários 600 kcal para evaporar 1kg de água à pressão atmosférica (BRAND, 2010).

A cultivar Catuaí, proveniente do sistema natural apresentou a maior relação entre oxigênio/carbono, apresentando maior afinidade em obter umidade, o que é indesejável para um material combustível.

Outro fator a considerar é que os cafeeiros desenvolvidos a pleno sol podem apresentar maiores taxas de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> com menores taxas de condutância estomática, enquanto que nos cafeeiros sombreados, ocorre o contrário, demonstrando que o fator limitante na fixação do carbono está mais ligado à disponibilidade da luz do que a condutância estomática (VILLATORA; ANTONIETA, 2004). Este fator explica o fato do cultivo convencional e orgânico apresentarem maior valor calórico, pois tanto o convencional quanto o orgânico são produzidos em pleno sol, ao passo que o natural (agroflorestal) é sombreado.

### **3.2 Composição química imediata e Poder calorífico Superior do carvão de *Coffea arabica***

Para a composição química imediata observou-se efeito significativo da interação Sistema cultivar para teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e cinzas. Observa-se que o poder calorífico superior não apresentou nenhum efeito significativo.

Isso explica as tendências observadas na Figura 2. Observa-se que o aumento do PCS não ocorre na mesma taxa que o aumento da relação H/C o que indica que o poder calorífico superior é influenciado por outras variáveis.

Tabela 2 Resumo das análises de variância para teores de cinzas, teores de materiais voláteis, teor em carbono fixo, poder calorífico superior e umidade do carvão *C.arabica*

Fator de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio			
		TMV	TCF	TCZ	PCS
Sistema (S)	2	16,10371*	19,19092*	0,54490*	358566,000 <sup>ns</sup>
Cultivar (C)	1	0,22426 <sup>ns</sup>	5,26406 <sup>ns</sup>	3,31526*	234432,66666 <sup>ns</sup>
S*C	2	10,33045*	8,97467*	1,38475*	167640,66666 <sup>ns</sup>
Erro	23	2,093967	2,022228	0,019878	457457,2222
	CVe (%)	7,37	1,84	4,84	9,32

TMV= teor de materiais voláteis (%base seca), TCF= teor de materiais volatéis (%base seca), TCZ= teor de cinzas(%base seca), PCS= poder calorífico superior ( MJ.kg<sup>-1</sup>).

O teor de cinzas (Figura 3) variou de 2,19% (OrgMn) a 3,89% ( OrgC), ficando a média em 2,91%, valores superiores ao teor de cinzas do carvão vegetal de *Eucalyptus* comumente relatado na literatura (ASSIS et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; VALE et al., 2007).

O teor de cinzas é um produto industrial poluente. Na verdade, ela afeta a gestão do carvão e aumenta os custos do processo (AHMARUZZAMAN, 2010) e pode reduzir a inflamabilidade, cobrindo o combustível de oxigênio. Segundo Bustamante-Garcia et al. (2013), as normas belga (NBN M11-001 ) e francesa (NF 846 E) não consideram o teor de cinzas, durante a avaliação da qualidade do carvão, no entanto, para as normas alemãs o nível máximo aceitável é de 6%.

No Brasil a norma PQMQ 3- 03 (SÃO PAULO, 2003) estabelece um teor de cinzas aceitável de 1,5%. Portanto, o carvão do cafeeiro atenderia as normas alemãs, mas não a norma PQMQ 3 – 03.

Observa-se, na Tabela 3, que há influência do sistema na cultivar Catuaí em todas as variáveis estudadas, exceto poder calorífico superior. Quanto ao teor de carbono fixo, a cultivar Catuaí, no sistema convencional, apresentou maior teor e se diferenciou, estatisticamente, das demais cultivares. Em relação ao teor de materiais voláteis, a

cultivar Catuaí, proveniente do sistema natural, apresentou o maior valor se diferenciando, estatisticamente, das demais cultivares.

Para o efeito cultivar, o sistema agroflorestal se diferenciou dos demais sistemas em relação ao teor de carbono fixo e material volátil. Para o teor de cinzas há diferença estatística entre todos os sistemas e cultivares, sendo a cultivar Catuaí a que apresentou maior teor.

Tabela 3 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior do carvão *Coffea arabica*

Sistemas	Cultivar	TCZ	TCF	TMV	PCS
Convencional	Catuaí	2,77 aB	78,96 bA	18,26 aA	31,00 aA
	M.novo	2,45 bA	77,7 aA	19,84 aA	30,95 aA
Orgânico	Catuaí	3,89 cB	77,81 bA	18,28 aA	30,66 aA
	M.novo	2,19 aA	78,91 aA	19,84 aA	30,98 aA
Natural	Catuaí	3,19 bB	74,18 aA	22,62 bB	28,26 aA
	M.novo	2,97 cA	77,15 aB	19,86 aA	30,47 aA
Média		2,91	77,45	19,63	30,39
Cve(%)		4,84	1,84	7,37	5,81

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

O total de voláteis variou de 18,26% (ConvC) para 22,62% (NatC) para o carvão do cafeeiro, ficando a média em 19,63%. A concentração de materiais voláteis de 12% a 16% reduzem liberação de fumaça (DIBLASI, 2008).

Bustamante-Garcia et al. (2013) comentam em seu artigo que os mercados asiáticos e europeus permitem uma taxa máxima de 12% de materiais voláteis. Além do mais, compostos mais voláteis têm conteúdo energético relativamente baixo (são os primeiros a sofrer degradação térmica) e derivam, principalmente, do conteúdo hemicelulósico (AGAR; WIHERSAARI, 2012; PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006).

Um aumento da temperatura final de carbonização pode resultar em um carvão vegetal com baixo teor de volátil e que atenderia as

exigências internacionais. Isso poderia promover o carvão vegetal da madeira do cafeeiro no cenário internacional, não apenas pelo forte apelo ambiental envolvido já que se trata de um resíduo, mas, principalmente, pela sua qualidade química e energética.

Quanto ao carbono fixo, a variação foi de 74,19% (NatC) para 78,96% (ConvC) a média geral de 77,45%. Na Europa, um carvão para uso doméstico deve conter porcentagens de carbono fixo de 75%, 78% e 82% , de acordo com a NBN M11-001, Din 51749 e NF N 846, respectivamente (BUSTAMANTE-GARCIA et al., 2013). Portanto, a cultivar Catuaí sobre o sistema convencional (78,96%) e a cultivar Mundo Novo sobre sistema orgânico atenderiam as normas europeias, exceto a norma NF N 846 E, o que poderia ser facilmente atendido com o aumento da temperatura de pirólise. Mas nesta mesma temperatura usada neste estudo atenderia a norma PMQ 3 – 03 (SÃO PAULO, 2003), sugere um teor de carbono fixo acima de 75%.

Observaram-se diferenças significativa para o teor de carbono fixo entre as cultivares apenas para o sistema natural (Tabela 3), onde a variedade Mundo Novo apresentou valor superior em 40%. Porém, os sistemas convencional e orgânico apresentaram valores superiores ao sistema natural. O sistema natural influenciou, negativamente, com relação ao teor de carbono fixo nos cafeeiros analisados. Isto pode ser explicado pelas concentrações dos compostos produzidos na fotossíntese, que são influenciadas pelas condições de crescimento dos cafeeiros nas sombras (JENKINS et al., 1998).

#### 4 CONCLUSÕES

O uso do carvão do *Coffea arabica* para fins energéticos considerando a análise química imediata e elementar se mostrou de modo geral satisfatório.

O poder calorífico superior não foi influenciado pelos sistemas e nem pelas cultivares.

As variáveis teor de material volátil, teor de carbono fixo, teor de cinzas e nitrogênio foram fortemente influenciadas pelo efeito sistema e cultivar.

Os cafeeiros produzidos a pleno sol (convencional e orgânico) se destacaram para produção de energia, embora o sistema convencional tenha obtido maior teor em nitrogênio, e o orgânico, maior teor em cinzas.

Apesar de obter os maiores valores em cinzas, a cultivar Catuaí se destacou para uso do carvão vegetal pelo maior teor em carbono fixo, menor teor em voláteis e a menor relação H/C e O/C, principalmente, sobre os sistemas convencional e orgânico .

#### Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, Fapemig e Capes pelo auxílio financeiro, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas, campus Machado, pelo apoio financeiro e doação do material biológico utilizado ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais (Departamento de Ciências Florestais) da Universidade Federal de Lavras.

**ELEMENTARY AND IMMEDIATE CHEMICAL ANALYSIS  
OF *Coffea arabica* L. CHARCOAL IN DIFFERENT  
CULTIVATING SYSTEMS AND CULTIVARS**

**ABSTRACT**

Coffee has a prominent position in Brazilian economy, especially in southern Minas Gerais, the main producing state. Despite extensive research involving coffee plantation, there is a lack in literature about *Coffea arabica* wood charcoal. There are currently 5.6 billion coffee trees in a 2.3 million hectare area in Brazil, generating residue such as fruit peel and wood which present potential as renewable fuels. Thus, the objective of this study was to evaluate the energetic potential of *Coffea arabica* charcoal derived from three cultivating systems (organic, natural agroforestry and conventional) and two cultivars (Catuaí and Mundo Novo). Carbonizations were performed in an electric oven (muffle) with a final temperature of 450°C. We determined the elementary and immediate chemical composition of the charcoal. The systems in full sunlight stood out for energy purposes (conventional and organic). The Catuaí cultivar on the conventional system is highlighted for energetic use, especially for the higher concentrations of fixed and elemental carbon, higher calorific value and, therefore, the lowest volatile content and the lowest H/C ratio. This work will be useful to producers in the grain drying process, in the appreciation of the wood, in the quality of the charcoal, in addition to future studies for the production of biochar.

Keywords: Biomass. Bioenergy. Biochar. Coffee plantation residue.

## REFERÊNCIAS

AGAR, D.; WIHERSAARI, M. Bio-coal, torrefied lignocellulosic resources: key properties for its use in co-firing with fossil coal: their status. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 44, p. 107-111, Sept. 2012.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 327-363, June 2010.

AMARAL, J. A. T. do; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. do. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 377-384, mar. 2006.

AMARAL, J. F. T. et al. □Eficiência de utilização de nutriente por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 621-629, abr. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D-1762-64**: método padrão para análise química de carvão. Philadelphia, 1977. 1042 p.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**: ano base 2011. Brasília, 2012. 145 p.

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

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, p. 776-785, Mar. 2008.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, London, v. 42, p. 169-174, Mar. 2013.

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

CHUN, Y. et al. □ Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 38, n. 17, p. 4649-4655, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira: 1ª estimativa, janeiro/2012**. Brasília, 2012. 18 p. Disponível em:  
<<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>>. Acesso em: 10 nov. 2012.

DEMIRBAS, A. Effect of temperature on pyrolysis products from four nut shells. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 76, n. 1/2, p. 285-289, 2006.

\_\_\_\_\_. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 44, n. 9, p. 1481-1486, June 2003.

DIBLASI, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 34, n. 1, p. 47-90, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Wood energy: the way ahead**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/005/y4450e/y4450e02.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

GALINATO, S. P. et al. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. **Energy Policy**, Surrey, v. 39, n. 10, p. 6344-6350, Oct. 2011.

GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, Essex, v. 103, n. 1, p. 249-258, Jan. 2012.

GASKIN, J. W. et al. □Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **Transactions of The Asabe**, Saint Joseph, v. 51, n. 6, p. 2061-2069, 2008.

HUANG, C. et al. □Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009.

JEFFERY, S. et al. □Agriculture, ecosystems and environment a quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 144, n. 1, p. 175-187, Nov. 2011.

JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 54, n. 1/3, p. 17-46, Mar. 1998.

KARHU, K. et al. □Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity: results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 140, n. 1/2, p. 309-313, Jan. 2011.

KERN, S. et al. □ Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant: influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 97, p. 1-10, Sept. 2012.

KUMAR, R. et al. □ Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. **Journal of Forestry Research**, Washington, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.

MCHENRY, M. P. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: certainty, uncertainty and risk. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 129, n. 1/3, p. 1-7, Jan. 2009.

MORAIS, H.; MARUR, C. J.; CARAMORI, P. H. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, out. 2003.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. quality parameters of *Eucalyptus pellita*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 77, n. 1, p. 35-40, 2006.

PROTÁSIO, T. P. et al. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Agriambi**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, Nov. 2012.

REIS, A. A. dos et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; PINTO, A. N. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 569-575, abr. 2006.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA - 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, São Paulo, v. 113, n. 129, jul. 2003. Disponível em: <[http://www.crbio01.gov.br/cms/index.php?secao=30&subsecao=0&con\\_id=66&completo=1](http://www.crbio01.gov.br/cms/index.php?secao=30&subsecao=0&con_id=66&completo=1)>. Acesso em: 10 fev. 2013.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e física da madeira e carvão vegetal de *Eucalipto urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

VALE, A. T. et al. □ Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos vale, a. t. do et al. de café (*Coffea arabica*, L.) e de madeira (cedrelinga catenaeformis), duke. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416-420, out./dez. 2007.

VILLATORO, A.; ANTONIETA, M. **Produção de café em sistema Agroflorestal**. Seropédica: EMBRAPA Agrobiologia, 2004. 36 p. (Documentos, 187).

WANG, Y. Y.; HSU, P. K.; TSAY, Y. F. Uptake, allocation and signaling of nitrate. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 17, n. 8, p. 458-467, 2002.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura tem um papel duplo como um usuário de energia e como fornecedor de energia na forma de bioenergia.

Este trabalho alerta pesquisadores e produtores para desafios, oportunidades e avanço da tecnologia da bioenergia cafeeira. Sugere a madeira, conhecida como lenha, como um valioso subproduto da cafeicultura. Caracteriza o sistema convencional e a cultivar Catuaí, com potencial energético, para produção de energia direta e para produção de carvão vegetal.

A madeira que era um resíduo e agora passa a ser um subproduto valioso apresenta propriedades tecnológicas satisfatórias para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico e doméstico, além de outras formas de energia. Portanto, a produção de carvão vegetal pode ser uma maneira de diversificação da produção e uma nova forma de ganho financeiro para o agricultor.

Por meio desta pesquisa, foi possível verificar o alto teor de extrativos totais na cultivar Mundo novo, mais que o dobro em relação à cultivar Catuaí. Portanto, fica evidente a necessidade de futura pesquisa para verificar a qualidade energética de outras cultivares, assim como desenvolver tecnologia para que a biomassa cafeeira seja aproveitada, para produzir todas as formas de energia, eletricidade, gás, combustíveis líquidos e calor, e sua exploração pode proporcionar emprego rural, incentivar as pessoas a permanecer dentro de suas comunidades, aumentar a lucratividade no setor agrícola e ajudar a restaurar áreas degradadas.