

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO RENDIMENTO DOS PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO DE *Eucalyptus microcorys*

Renato da Silva Vieira¹, José Tarcísio Lima², Thiago Campos Monteiro³,
Thaís de Sousa Selvatti⁴, Edy Eime Pereira Baraúna¹, Alfredo Napoli⁵,

(recebido: 10 de novembro de 2009; aceito: 28 de setembro de 2012)

RESUMO: Durante a produção de carvão vegetal, diferentes produtos são formados. Esses produtos são resultantes, principalmente, da temperatura final de carbonização. Sendo o carvão vegetal um dos principais insumos na produção de ferro gusa no Brasil, no presente trabalho, objetivou-se avaliar a influência da temperatura final de carbonização no rendimento dos produtos gerados, e também verificar a influência da posição radial e longitudinal de amostragem nos rendimentos de cada produto. Para isso, foram retiradas amostras da posição interna e externa ao longo do raio e também de três diferentes alturas a partir de quatro árvores de *Eucalyptus microcorys*. As amostras foram carbonizadas em forno elétrico experimental adaptado, com condensador resfriado à água e frasco coletor de materiais voláteis condensáveis. As temperaturas finais de carbonização foram de 500, 600, 700, 800 e 900°C. Em seguida, foram calculados os rendimentos gravimétricos em carvão, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis. Os resultados mostram que não houve diferença de rendimento gravimétrico em carvão nas posições longitudinais e radiais estudadas; o rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis apresentaram variações nas temperaturas de 700°C e 800°C; a variação do rendimento gravimétrico em carvão, entre as temperaturas de 500°C a 900°C foi de 15%; a variação do rendimento em líquido pirolenhoso no sentido radial de amostragem foi, em média, de 8%; a variação do rendimento em gases não condensáveis no sentido radial de amostragem foi, em média, de 16%.

Palavras-chave: Rendimento gravimétrico, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis, variação radial, carvão vegetal.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON PRODUCTS YIELD OF *Eucalyptus microcorys* CARBONIZATION

ABSTRACT: During charcoal production different products are formed. These products are influenced primarily by the temperature of carbonization. Given that charcoal is the main input in the production of pig iron in Brazil, this study evaluated the influence of final temperature of carbonization of the products generated and also the influence of the radial and longitudinal sampling on the yield of each product. Samples were taken from internal and external position along the radius and also from three different heights from four *Eucalyptus microcorys* trees. The samples were carbonized in an electric furnace with an experimental water-cooled condenser and a collecting bottle of condensable volatile materials. The final temperatures of carbonization were 500, 600, 700, 800 and 900°C. The gravimetric yield, tar and non-condensable gases were calculated. The results showed no difference in the gravimetric yield in the longitudinal and radial positions studied, while the tar yield and non-condensable gases showed temperature variations of 700°C and 800°C and the variation of the gravimetric yield temperatures between 500°C to 900°C was 15%, the change of yield of tar from the radial direction of sampling was on average 8%, the variation of the yield of non-condensable gases in a radial sampling was on average 16%.

Key words: Gravimetric yield, tar, non condensable gases, radius variation, charcoal.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de ferro gusa a carvão vegetal do mundo. Segundo Milanez (2009), o

país ocupa a 11ª posição no mercado mundial na exportação de aço bruto que usa, geralmente, o coque nos altos-fornos. Além disso, existe uma política governamental no sentido de aumentar a produção de aço no país, tanto para atender

¹Engenheiro Florestal, Professor Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira – Universidade Federal do Tocantins/UFT – Departamento de Engenharia Florestal – 77402-970 – Gurupi, TO, Brasil – rsvieira@uft.edu.br, ebarauna@uft.edu.br

²Engenheiro Florestal, Professor Doutor em Ciências Florestais – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Departamento de Ciências Florestais – Cx. P. 3037 – 37200-00 – Lavras, MG, Brasil – jtlima@ufla.br

³Engenheiro Florestal, Professor Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul/UFMS – Cx. P. 112 – 79560-000 – Chapadão do Sul, MS, Brasil – tcmforest@yahoo.com

⁴Engenheira Florestal – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Departamento de Ciências Florestais – Cx. P. 3037 – 37200-00 – Lavras, MG, Brasil – thausaselvatti@gmail.com

⁵Graduado em Ciências dos Materiais, Pesquisador Doutor em Sistemas Energéticos – CIRAD – Département “PERSYST” Performance des Systèmes de production et de transformation tropicaux – TA B-40/16 73 – Rue Jean-François Breton 34398 – Montpellier, France – alfredo.napoli@cirad.fr

demandas domésticas como o mercado externo (ALENCAR; SOFIA, 2009).

Para a produção adequada de ferro gusa é necessário, além de outros fatores, minério de ferro e carvão de qualidade. O carvão vegetal representa cerca de 40% dos custos de produção na indústria siderúrgica (SANTOS, 2008). Um dos problemas enfrentados pela indústria siderúrgica brasileira é a heterogeneidade do carvão vegetal utilizado na fabricação do aço em termos de suas características físicas, químicas e mecânicas e o baixo rendimento nos processos de carbonização utilizados atualmente. Os rendimentos e a heterogeneidade do carvão vegetal são decorrentes das variações do lenho e do processo de carbonização.

Quanto à matéria-prima utilizada para a produção de carvão vegetal no Brasil, a madeira de *Eucalyptus* apresenta destaque. O setor florestal brasileiro conta com, aproximadamente, 4,8 milhões de hectares com plantios desse gênero (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2012). Deste total, segundo a mesma fonte, o segmento de siderurgia a carvão vegetal, em 2011, consumiu quase 17 milhões de m³ de toras de *Eucalyptus*.

A maior parte da madeira utilizada para a carbonização é cortada em plantios com seis ou sete anos, idade determinada de acordo com aspectos econômicos. Apesar das propriedades da madeira exercerem influência sobre a qualidade do carvão vegetal em aspectos como porosidade, composição química, densidade, poder calorífico, entre outros (OLIVEIRA et al., 1982; SANTOS, 2008; VITAL et al., 1989), muitas vezes elas não são consideradas na determinação da idade de corte.

Outro fator que contribui no rendimento da carbonização e na heterogeneidade química do carvão vegetal são as características do processo de carbonização como a temperatura de aquecimento e a temperatura final da carbonização. A variação da temperatura dentro dos fornos produz uma matéria-prima com teor de carbono fixo, próximo de 98% e uma madeira torrificada, em que o processo de carbonização não se completou (PINHEIRO et al., 2005). A temperatura final de carbonização afeta as propriedades do carvão e os rendimentos, tendo alguns estudos avaliado esse parâmetro. Trugilho e Silva (2001) avaliaram as influências de temperaturas entre 300 - 900°C no carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril*) e obtiveram diferenças no rendimento em carbono fixo, material volátil, teor de cinzas e outros em função da

temperatura final de carbonização; Pinheiro et al. (2005) estudaram as influências de temperaturas entre 200 - 650°C e taxa de aquecimento nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus microcorys* e obtiveram a temperatura ótima do processo entre 300 - 450°C para os rendimentos gravimétricos em carvão e teor de carbono fixo.

A variação da temperatura final de carbonização pode ser decorrente das características geométricas dos fornos e do leito da madeira (FÁVERO et al., 2007), assim como à velocidade de carbonização, campo de escoamento dos gases, além das características da biomassa como umidade, diâmetro, comprimento e posição (PINHEIRO et al., 2005).

O presente trabalho pertence a um estudo sobre a influência da madeira obtida com árvores de idade acima da utilizada no setor florestal brasileiro para os plantios de *Eucalyptus* e com parâmetros de carbonização similares à produção de coque com carvão fóssil, ou seja, até altas temperaturas (>900°C). Dessa forma, no presente trabalho, objetivou-se avaliar a influência da temperatura final de carbonização no balanço de massa da carbonização, ou seja, no rendimento dos produtos gerados nesse processo, e também verificar a influência da posição radial e longitudinal de amostragem nos rendimentos dos produtos da carbonização.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas quatro árvores de *Eucalyptus microcorys* oriundas de um plantio de procedência implantado na Universidade Federal de Lavras (UFLA). As árvores abatidas apresentavam idade média de 35 anos. A altura média das árvores foi de 30 metros e o diâmetro médio de 450 mm, obtidos na altura de 1,3 metros de solo. A densidade básica média do lenho foi de 0,880 g/cm³.

Depois de abatidas, as árvores foram seccionadas no campo em três toras de 5 metros de comprimento. Estas foram transportadas para a Unidade Experimento de Desdobro e Secagem da Madeira da UFLA, onde foram desdobradas em pranchas centrais de 10 cm de espessura.

A partir das pranchas centrais foram confeccionados corpos-de-prova de dimensões de 5 x 5 x 21 cm, considerando as posições radiais como externa e interna.

As carbonizações foram realizadas no Laboratório de Energia da Biomassa da UFLA, utilizando um forno elétrico (mufla) adaptado com condensador resfriado à água e frasco coletor (kitasato) de materiais voláteis condensáveis, apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Forno elétrico adaptado com condensador resfriado à água e frasco coletor de materiais voláteis condensáveis, juntamente com o regulador de temperatura informatizado.

Figure 1 – Electric furnace fitted with water cooled condenser and bottle collector of volatile condensable materials along with computerized temperature control.

Os parâmetros de carbonização utilizados foram taxa de aquecimento de 0,5 °C/min e as temperaturas finais de carbonização de 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Esses parâmetros eram enviados ao forno elétrico por um regulador de temperatura informatizado (PID) de modo que, ao atingir a temperatura desejada, o fornecimento de energia era imediatamente desligado. Essas temperaturas consideram a faixa real de temperaturas em fornos de alvenaria, que apresentam o gradiente térmico gerado pelo uso de sistema de combustão parcial, e para iniciar os estudos sobre a coqueificação do carvão vegetal, processo que ocorre em temperatura elevada (900°C).

Tabela 1 – Rendimentos dos produtos da carbonização obtidos nas diferentes temperaturas.

Table 1 – Yields of products obtained at different carbonization temperatures.

Temperatura °C	Rendimento Gravimétrico					
	Carvão vegetal		Líquido pirolenhoso		Gases não condensáveis	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV
500	34	6	43	13	23	26
600	31	10	40	22	29	31
700	28	8	49	4	22	9
800	27	7	48	7	24	17
900	29	6	42	25	29	36

M % – média dos rendimentos em porcentagem; CV %- Coeficiente de variação em porcentagem.

Para os cálculos de rendimento, a madeira foi seca, pesada e colocada no interior do reator para proceder a carbonização e, em seguida, o carvão produzido e o líquido pirolenhoso resultante da condensação dos gases da carbonização eram pesados. A quantificação dos gases que não se condensavam foi feita por diferença. Os cálculos dos rendimentos foram feitos por meio das seguintes equações:

$$RC = \frac{Ps \text{ carvão}}{Ps \text{ madeira}} \times 100$$

em que:

RC- Rendimento gravimétrico do carvão (%);

Ps carvão- peso seco do carvão (g);

Ps madeira- peso seco da madeira (g).

$$RL = \frac{P \text{ líquido}}{Ps \text{ madeira}} \times 100$$

em que:

RL- Rendimento em líquido pirolenhoso (%);

P líquido- peso líquido condensado (g);

Ps madeira- peso seco da madeira (g).

$$RG = 100 - (RC + RL)$$

em que:

RG- Rendimento em gás não condensável (%);

RC- Rendimento gravimétrico do carvão (%);

RL- Rendimento em líquido pirolenhoso (%).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos rendimentos gravimétrico em carvão, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, para cada uma das temperaturas finais de carbonização.

Observa-se, na Tabela 1, o rendimento da carbonização entre 500°C e 900°C. Os rendimentos em carvão estão na faixa de 29 e 34%. Os resultados indicam que a idade das árvores possui pouca influência no rendimento médio em carvão. Por outro lado, observa-se que a queda do rendimento gravimétrico em carvão da temperatura final de carbonização de 500°C para 900°C foi de 5% e que de 700°C até 900°C ocorreu uma tendência de estabilização do rendimento gravimétrico. Esse resultado indica que a transformação da madeira em carvão vegetal ocorre durante a primeira etapa da carbonização, até 500°C. E que entre 500°C e 900°C a transformação do carvão vegetal ocorre, principalmente, com o rearranjo da estrutura do carvão vegetal. O mesmo fenômeno acontece com o coque.

Resultados semelhantes foram os obtidos por Oliveira et al. (1982), que avaliaram os rendimentos gravimétricos em diferentes temperaturas de carbonização, utilizando *Eucalyptus grandis* com 5,5 anos e Trugilho e Silva (2001), que também avaliaram os rendimentos gravimétricos em diferentes temperaturas de carbonização, utilizando Jatobá (*Himenea courbaril* L.) na mesma faixa de 500°C. Ambos os autores observaram a diminuição do rendimento gravimétrico em carvão com o aumento da temperatura final de carbonização, sendo que Trugilho e Silva (2001) ainda observaram estabilização desses rendimentos nas temperaturas mais elevadas.

É importante ressaltar que o estudo com temperaturas que não são aplicadas no mercado vem ao encontro de novas tecnologias que estão sendo estudadas para a produção de carvão com, as quais, os fornos mantêm as temperaturas acima de 500°C. Esse parâmetro, produz carvão com rendimento satisfatório e com resistência mecânica desejável para a aplicação siderúrgica.

O rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis inicialmente tenderam a aumentar, porém, em seguida, não seguiram uma tendência, diferindo de Valente et al. (1985), que avaliaram os rendimentos desses produtos na carbonização de *Eucalyptus* desses produtos entre 300°C e 600°C e observaram uma estabilização após 450°C. Entretanto, Oliveira et al. (1982), de uma maneira geral, encontraram maiores rendimentos de líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, à medida que a temperatura aumentava.

Na Figura 2, verifica-se que os rendimentos entre as posições, interna e externa tendem a não se diferenciarem para o rendimento gravimétrico em carvão, exceto nas temperaturas de 700°C e 800°C, resultado diferente do encontrado por Trugilho e Silva (2001) que obtiveram comportamento distinto entre cerne e alborno, de acordo com a temperatura final. Observando o rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis há uma tendência de diferenciação a partir de 600°C, igualando novamente em 900°C. A diferença entre a posição interna e externa para o rendimento em líquido pirolenhoso à 700°C foi de 6% e para 800°C foi de 10%, sendo que a posição que apresentou maior rendimento foi a externa. Houve também uma diferença no rendimento de gases não condensáveis e essa diferença foi de 16% na temperatura de 700°C e de 15% para a temperatura de 800°C. A posição que apresentou maior rendimento em gases não condensáveis foi a posição interna. Pode se observar também que nas temperaturas onde houve diferenças nos rendimentos de líquido e gás, sendo que esses rendimentos são inversamente proporcionais, embora a diferença entre as posições não apresentem a mesma proporção dentre as posições. Os resultados encontrados para o líquido pirolenhoso e gases não condensáveis nas diferentes posições diferiram dos obtidos por Trugilho et al. (2005) que encontraram diferenças não significativas na posição radial.

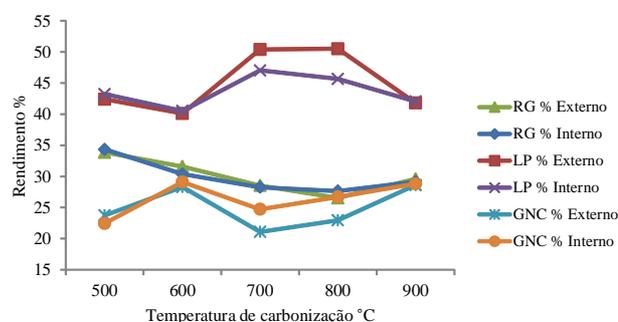


Figura 2 – Rendimentos dos produtos da carbonização obtidos nas posições interna e externa em diferentes temperaturas.

Figure 2 – Yields of products obtained from carbonization on internal and external positions at different temperatures.

Na Figura 3, apresenta-se a variação longitudinal para o rendimento gravimétrico, rendimento em líquido pirolenhoso e rendimento em gases não condensáveis obtidos nas três toras do fuste.

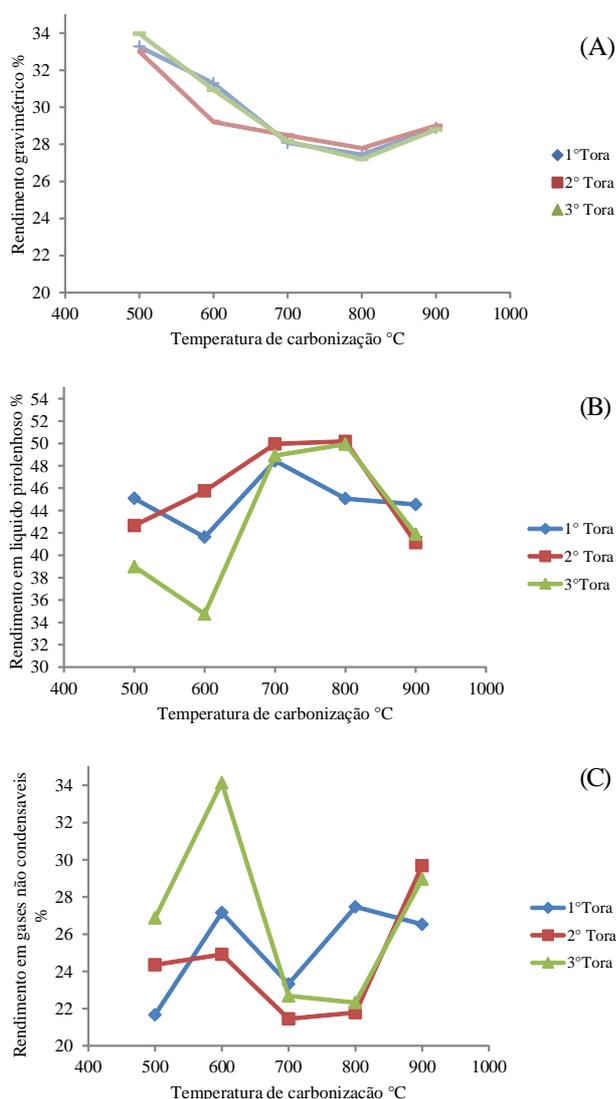


Figura 3 – A – Variação longitudinal do rendimento gravimétrico em diferentes temperaturas; B – Variação longitudinal do rendimento em líquido pirolenhoso em diferentes temperaturas; C – Variação longitudinal do rendimento em gases não condensáveis em diferentes temperaturas.

Figure 3 – A - Longitudinal variation of the gravimetric yield in different temperatures; B - Longitudinal variation of the pyrolytic liquid yield in different temperatures; C - Longitudinal variation of the non-condensable gases yield in different temperatures.

Na Figura 3A, observa-se que o rendimento gravimétrico em carvão não se altera com a diferença da

posição longitudinal, no entanto, observa-se na temperatura de 600°C que há um decréscimo acentuado na 2° tora. A 1° e a 3° tora apresentaram tendências semelhantes.

Nas tendências do rendimento em líquido pirolenhoso (Figura 3B), em função da variação longitudinal, a 1° e a 3° tora apresentaram menores rendimentos em líquido pirolenhoso, embora as variações apresentem magnitudes diferentes. Já, a 2° tora apresentou uma tendência de aumento do rendimento até 800°C e, a partir de então, apresentou um decréscimo até 900°C.

Na Figura 3C, seguindo a tendência dos outros rendimentos estudados a 1° e a 3° tora, apresentaram a mesma tendência para o rendimento em gases não condensáveis. Embora a 1° tora, para rendimento em líquido pirolenhoso, tenha apresentado comportamento crescente, no rendimento em gases não condensáveis esse comportamento segue as 2° e 3° toras até 800°C e quando chega a 900°C ocorre uma inversão decrescendo o rendimento dos gases não condensáveis. A 3° tora, retirada da posição mais alta do fuste, apresentou, em média, um maior rendimento em gases não condensáveis e um menor rendimento em líquido pirolenhoso. A 2° tora apresentou, em média, o menor rendimento em gases não condensáveis e um maior rendimento de líquido pirolenhoso.

4 CONCLUSÕES

Com base nas interpretações dos resultados pode-se concluir que:

- não houve diferença entre os rendimentos gravimétricos em carvão nas posições longitudinais e radiais estudadas;
- os rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis apresentaram variações nas temperaturas de 700°C e 800°C;
- a variação do rendimento gravimétrico em carvão entre as temperaturas de 500°C a 900°C foi de 15%;
- a variação do rendimento em líquido pirolenhoso no sentido radial de amostragem foi, em média, de 8%;
- a variação do rendimento em gases não condensáveis no sentido radial de amostragem foi, em média, de 16%.

5 REFERÊNCIAS

ALENCAR, K.; SOFIA, J. **Após pressão, Lula e Agnelli selam acordo**. Disponível em: <<http://www.plataformabndes.org.br/index.php/en/noticias/38-materias/358-apos-pressao-lula-e-agnelli-selam-acordo>>. Acesso em: 3 out. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2011. Brasília, 2012. 130 p.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA, 8., 2007, Cusco. **Anais...** Cusco, 2007. 1 CD-ROM.

MILANEZ, B. **Siderurgia, sociedade e meio ambiente**. Disponível em: <<http://www.riosvivos.org.br/canal.php?c=34&mat=12591>>. Acesso em: 3 out. 2009.

OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 62-73.

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

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008. 1 CD-ROM.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

VALENTE, O. F.; ALMEIDA, J. M.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 28-39, jan./fev. 1985.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M.; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e na qualidade do Carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 41/42, n. 5, p. 44-49, 1989.