

PODER CALORÍFICO E ANÁLISE ECONÔMICA DO USO TOTAL OU PARCIAL DA BIOMASSA DE EUCALIPTOS

Tiago Luis Habitzreiter^{1*}, Paulo Fernando Adami², Eleandro José Brun²,
Vanderson Vieira Batista³, Michael Luiz Ferreira², Cleverson Luiz Giacomet²

SAP 21822 Data do envio: 25/02/2019 Data do aceite: 25/04/2019
Sci. Agrar. Parana., Marechal Cândido Rondon, v. 18, n. 3, jul./set., p. 282-288, 2019

RESUMO - A crescente demanda por fontes alternativas de energia tem se demonstrado uma tendência mundial. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o poder calorífico das diferentes frações de biomassa de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 60 meses de idade e analisar a viabilidade econômica do aproveitamento total ou parcial da biomassa, visando geração de energia. Para isso determinaram-se o poder calorífico superior, poder calorífico inferior, teor de cinzas e carbono orgânico dos compartimentos madeira, galhos, casca e folhas. Quanto ao poder calorífico (PC), a folha apresentou valores superiores as demais frações avaliadas, com 4.904 kcal kg⁻¹, seguidas dos galhos com 4.290 kcal kg⁻¹, madeira com 4.126 kcal kg⁻¹ e casca, com menor PC (3.641 kcal kg⁻¹). Em relação a eficiência de uso dos nutrientes (EUN), a madeira apresentou os maiores valores, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura. Nas folhas estão os menores valores do EUN, com exceção do Ca e Mg, cujos menores valores estão na casca, indicando a importância da manutenção destes componentes no solo após a colheita. Em relação ao custo para repor os nutrientes (NPK) exportados por tonelada de biomassa de madeira, o *E. grandis* apresentou valores de R\$ 14,05 e *E. urophylla* de R\$ 11,54, sendo a biomassa deste componente, a mais barata em termos de custo com reposição de nutrientes. Por outro lado, as folhas apresentaram o maior custo de reposição de NPK, enfatizando a baixa viabilidade econômica da exportação desta biomassa para geração de energia.

Palavras-chave: *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, carbono, bioenergia, madeira.

CALORIFIC VALUE AND ECONOMIC FEASIBILITY OF TOTAL OR PARTIAL USE OF THE *Eucalyptus* BIOMASS

ABSTRACT - Global demand for renewable energy has continued to increase with a strong global tendency. In this way, the objective of this study was to evaluate the calorific value of different tree biomass components of *E. grandis* and *E. urophylla* with 60 months old, to analyze the economic feasibility of the total or partial use of its biomass for energy generation. Higher and lower calorific value, ash content and organic carbon of the tree components (wood, branches, bark and leaves) were evaluated. Regarding to the calorific values, leaves showed higher values when compared to the other tree components with 4,904 kcal kg⁻¹, followed by branches with 4,290 kcal kg⁻¹, wood with 4,126 kcal kg⁻¹ and bark, with the lowest (3,641 kcal kg⁻¹) calorific value. In relation to the nutrient use efficiency (NUE), wood showed the highest values, which is something highly desirable and of great interest to forestry. In the other hand, leaves showed the lowest values of the NUE, with the exception of Ca and Mg that were lower in the bark, indicating the importance of maintaining these components in the soil after harvest. Regarding to the cost to replace the nutrients (NPK) exported by one ton of wood biomass, *E. grandis* and *E. urophylla* showed values of R\$ 14.05 and R\$ 11.54 respectively, being the biomass of this component the cheapest in terms of nutrients reposition. On the other hand, tree leaves component showed the higher cost of NPK replacement, emphasizing the low economic viability to export this biomass.

Keywords: *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, carbon, bioenergy, wood.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes alternativas de energia tem se demonstrado uma tendência mundial. Tudo isso motivado pela crescente preocupação sobre o esgotamento de fontes energéticas não renováveis como o carvão mineral e o petróleo (ABRAF, 2013). Ainda,

segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), o mercado mundial tem despertado interesse no desenvolvimento e adoção de fontes alternativas e renováveis de energia.

Do ponto de vista ambiental, a sustentabilidade do desenvolvimento depende, entre outras medidas, da

¹Mestre em Agroecossistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Estrada para Boa Esperança, km 04 - Zona Rural, CEP: 85660-000, Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. E-mail: tyagoluys@hotmail.com.br.

²Professor Doutor, Curso de Agronomia e Pós-graduação em Agroecossistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Estrada para Boa Esperança, km 04 - Zona Rural, CEP: 85660-000, Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. E-mail: pauloadami@utfpr.com.br, eleandrobrun@utfpr.edu.br, michaeltibagi@hotmail.com, cleverson_giacomet@hotmail.com. *Autor para correspondência.

³Doutorando, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Via do Conhecimento, s/n - km 01 - Fraron, CEP: 85503-390, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: vandersonvbatista@hotmail.com.

redução das emissões de gases poluentes, conservação do solo, não contaminação das águas, exploração racional dos recursos fósseis e recursos naturais renováveis. Além dos fatores relacionados ao meio ambiente, questões econômicas, como o aumento do preço do petróleo e o fato de sua produção estar concentrada em poucos países (FONTES, 1994), levaram diversos países a se preocupar com sua segurança energética (AZEVEDO et al., 2017).

Muitos países estabeleceram metas de redução na emissão de gases do efeito estufa, com intuito de reduzir o aquecimento global, e substituíram os combustíveis fósseis não renováveis por fontes energéticas renováveis em sua matriz energética (IBA, 2015).

No Brasil, a maior parte da energia elétrica vem de hidrelétricas ou eólicas, mas ainda um pequeno percentual vem de termoelétricas, sendo algumas destas fontes energéticas movidas à biomassa. A madeira para a região sudoeste do Paraná é de suma importância também para o uso em cerealistas, secadores de grãos, além de alimentar caldeiras nas agroindústrias e os aquecedores da avicultura, que estão presentes em grande número de produtores de aves (IBA, 2015).

Em 2012, a biomassa de base florestal representava 15,8% da geração de energia elétrica a partir de biomassa. Outras biomassas como o biogás, casca de arroz, capim elefante e óleo de palma, representam apenas 1,8%. Apesar de significativo, o potencial de geração de energia a partir de resíduos florestais de biomassa no Brasil é muito maior. Atualmente, são gerados anualmente cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos madeiros provindos da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal, capaz de gerar energia equivalente a 1,7 GW/ano (ABRAF, 2013).

O uso da madeira para energia é um componente de vital importância no suprimento de energia primária, especialmente no uso doméstico e industrial. A combustão da biomassa gera energia na forma de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível (kcal kg^{-1} ou kcal m^{-3}), que pode ser definido como poder calorífico (QUIRINO et al., 2004). Em termos de qualidade da biomassa para a produção de energia, quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o poder calorífico das diferentes frações de biomassa de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 60 meses de idade e analisar a viabilidade econômica do aproveitamento total ou parcial da biomassa, visando geração de energia.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental fica localizada no município de Salto do Lontra (PR), sob coordenadas geográficas de 25° 46' 38,24" latitude S, 53° 12' 26,8" longitude W e é pertencente a Cooperativa FlorCoop, com sede no município de Francisco Beltrão (PR). A área possui é composta de 25 ha¹ de eucaliptos de duas espécies, *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*, e apresenta altitude média de 510 m

A região possui clima *Cfa*, conforme classificação de Köppen, de transição subtropical úmido mesotérmico e verões quentes, com temperatura média de 22°C e inverno com geadas pouco frequentes. Possui temperatura média inferior a 18°C, com quatro estações do ano bem definidas, chuvas frequentes, acima de 60 mm por mês e com pluviosidade média anual de 1.800 a 2.200 mm, os quais são distribuídos ao longo do ano (INMET, 2019).

O solo da área experimental está classificado como NITOSSOLO Vermelho Distroférico, levemente ondulado e livres de pedras, profundo e com boa drenagem, baixa fertilidade e altos teores de ferro nos horizontes superficiais (BHERING; SILVIO, 2008). Historicamente, esta área foi utilizada para cultivo com plantas anuais, como milho, soja e aveia. Após aquisição da área pela cooperativa, em 2009, foi realizado o plantio da floresta de eucalipto, o qual teve início em setembro de 2010.

O plantio das mudas foi realizado com espaçamento 3 x 2 m entre plantas, com isso cada planta inicialmente tinha um espaçamento relativo de 6 m² cada, sendo a densidade inicial de 1.666 árvores ha⁻¹.

As mudas utilizadas foram oriundas de sementes, com boa sanidade e vigor e adubação a base de N-P₂O₅-K₂O (5-20-20), 0,5 kg por muda. Os materiais foram compostos por duas espécies de eucalipto, sendo *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden (Família: Myrtaceae, nome popular: Eucalipto *grandis*) e *Eucalyptus urophylla* s. t. Blake (Família: Myrtaceae, nome popular: Eucalipto *urophila*). As duas espécies foram plantadas no mesmo sítio florestal, alocado em uma área de plantio de 25 ha e dividida em duas áreas com tamanhos equivalentes.

O estudo foi realizado após 60 meses do plantio das mudas. Inicialmente realizou-se o inventário florestal da área experimental e com base nestes dados, avaliaram-se os diâmetros, agrupados em quatro classes diamétricas e em cada classe abatidas três árvores. À medida que as árvores foram abatidas, separaram-se as frações casca, folha, galhos e madeira, para futuras avaliações.

As avaliações para a obtenção do teor de cinzas dos materiais estudados foram realizadas em forno mufla. Primeiramente foram numerados os cadinhos com lápis preto e colocados os mesmos para secar a 105°C, por 1 h. Após este período, foram retirados da mufla e colocados para esfriar em dessecador. Depois de resfriados e secos, foram pesados em balança analítica e anotado os valores do peso inicial. Cada cadinho foi tarado na balança analítica e preenchido com 2 g de amostras. Na sequência foram levados à mufla, previamente aquecida e colocados a 710°C, por um período de 1 h (30' com a porta aberta e 30' com a porta fechada), seguindo Norma NBR 8112/86 (carvão vegetal - análise imediata) (ABNT, 1986).

Após tempo de mufla, nos cadinhos contendo as amostras, restaram somente cinzas, resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. Posteriormente, os cadinhos foram resfriados e pesados, para realização do cálculo do teor de cinzas, a saber:

$$T_{\text{cinzas}} = [(m_3 - m_4)/(m_3)] * 100$$

Onde:

Tcinzas = teor de cinzas (%),

m3 = massa da amostra antes da queima (g) e

m4 = massa da amostra após a queima (g).

Através do uso da bomba calorimétrica, pode-se determinar o poder calorífico superior (PCS) de um material combustível, dada pela evaporação e condensação da água durante a combustão do material (FONTES, 1994). Já poder calorífico inferior (PCI) representa o calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis.

De acordo com Souza (2010), o PCI pode ser obtido indiretamente pela equação:

$$PCI = PCS - [(600 * 9 * H) / 100],$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹),

PCS = poder calorífico superior (kcal kg⁻¹),

H = teor de hidrogênio (%),

600 = calor de condensação da água a 0 °C e,

9 = representa a quantidade de água (kg) que se formam ao oxidar um quilo de hidrogênio.

A determinação do poder calorífico superior (PCS) foi obtido de acordo com a Norma ABNT/NBR 8633/84 (carvão vegetal determinação do poder calorífico) (ABNT, 1984). Neste procedimento as amostras previamente secas, *in natura*, foram colocadas em uma bomba calorimétrica isotérmica (modelo E2K), para análise do PCS a ser liberado pela amostra. Para cada amostra, foram realizadas 4 repetições.

A determinação do carbono orgânico (CO) foi realizada, por meio de método adaptado de Walkley-Black

para tecido vegetal, onde o material é oxidado por íons Cr₂O₇²⁻ em meio ácido, sendo a reação acelerada pelo aquecimento gerado na adição de ácido sulfúrico concentrado. O excesso de Cr₂O₇²⁻ que não atuou como oxidante foi titulado com FeSO₄, para a quantificação do C na amostra.

Para determinar o custo de reposição de N-P₂O₅-K₂O, para cada compartimento analisado, calculou-se a exportação de cada nutriente. O cálculo foi realizado com base nos teores de nutrientes necessários para reposição e os custos de cada fonte mineral, sendo utilizados para este cálculo: ureia (45% de N) = R\$ 85,00 (saca de 50 kg), superfosfato triplo (41% de P₂O₅) = R\$ 98,00 (saca de 50 kg) e cloreto de potássio (60% K₂O) = R\$ 92,00 (saca de 50 kg).

A eficiência de utilização de nutrientes (EUN) foi obtida pela relação entre quantidade de biomassa de cada componente e os teores de nutrientes. O teor de cinzas (%), poder calorífico superior e inferior, PCS, percentagem de carbono orgânico e biomassa das frações das árvores dos eucaliptos foram submetidas à análise de variância e constatando efeito significativo, aplicou-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. A análise de dados foi realizada com auxílio do programa Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando os resultados da Tabela 1, podemos perceber que os teores de cinzas para a fração casca (7,28%), foi significativamente superior às demais frações, seguida da fração folha, com 4,74%. Na madeira foi encontrado o menor teor de cinzas com 0,56%. As cinzas são substâncias compostas de material inorgânico e tem relação inversa com o poder calorífico.

TABELA 1 - Teor de cinzas, poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico superior (PCS), carbono orgânico (CO), biomassa e energia média para as diferentes frações das duas espécies de eucalipto estudadas, aos 60 meses de idade.

Frações	Teor de cinzas (%)	PCI (kcal kg ⁻¹)	PCS (kcal kg ⁻¹)	CO (%)	Biomassa das frações das árvores (mg ha ⁻¹)	Energia média (Gcal)
Madeira	0,56 d*	4.126,00 c	4.396,00 c	46,13 b	65,54 a	270.418,04
Casca	7,28 a	3.641,00 d	3.880,00 d	37,57 c	9,52 b	34.662,32
Folhas	4,74 b	4.904,00 a	5.204,00 a	52,12 a	2,15 c	10.543,60
Galhos	2,93 c	4.280,00 b	4.534,00 b	45,91 b	7,39 b	31.629,20
Médias	3,88	4.237,75	4.503,50	45,43	21,18	86.813,29
CV (%)	16,32	8,44	9,57	10,11	23,35	-----

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. CV = coeficiente de variação. Gcal = giga calorias.

Uma característica comum entre espécies de eucalipto é o baixo teor de cinza da madeira, em geral abaixo de 1%. Botrel et al. (2010), trabalhando com oito clones de eucalipto, encontraram teores de cinzas que variaram de 0,11 a 0,25%. Neves et al. (2011), analisando características energéticas de dois clones, encontraram teores de cinzas da madeira entre 0,65 a 0,88%. Trugilho et al. (2003) trabalhando com dez clones de *Eucalyptus*

grandis e três clones de *Eucalyptus saligna*, relataram teores de cinzas de 0,10 a 0,25%.

Resultados assemelham-se aos observados por Juizo et al. (2017) e Brito e Barrichelo (1978), sendo que estes últimos analisando a madeira e a casca do eucalipto, encontraram teor de cinzas na ordem de 0,31% na madeira e 6,40% na casca, valores próximos ao encontrado no presente trabalho (Tabela 1). Segundo Morais (2008), os teores de cinzas apresentam tendência de queda com o

avanço da idade, saindo dos valores de 0,50% com um ano e atingindo mínimo de 0,12% com 8 anos de idade. Árvores mais jovens demandam maiores quantidades de minerais pois estão em uma fase onde o metabolismo é mais acelerado, justificando assim o maior teor de cinzas encontrado na casca.

Para os valores de PCI, PCS e CO, observaram-se que, os resultados estatísticos foram semelhantes para ambas as variáveis (Tabela 1). A folha apresentou valores superiores às demais frações avaliadas, seguidas dos galhos, madeira e casca, com o menor. Santiago e Rezende (2013) encontraram valores de PCS para a fração casca de eucalipto, na ordem de 4.405 kcal kg⁻¹ e PCI = 4.081 kcal kg⁻¹. Estes resultados são aproximadamente 20% superiores aqueles valores encontrados nas análises de casca do presente trabalho. No entanto, Pereira Júnior (2001) encontrou valores para poder calorífico em casca de eucalipto bem próximos, PCS = 3.657 kcal kg⁻¹ e PCI = 3.418 kcal kg⁻¹.

A madeira do eucalipto por apresentar elevada quantidade de biomassa, com elevado teor de energia (PCI = 4.126 kcal kg⁻¹), é amplamente utilizada como fonte de energia renovável. Muller et al. (2005) encontraram valores em uma floresta de eucalipto, com espaçamentos variados, com média de PCS = 4.146 kcal kg⁻¹.

Também Menezes (2013), avaliando maravalha de *Pinus* e Araucária, encontrou valores médios para o PCS = 4.136 kcal kg⁻¹ para *Araucaria angustifolia* e 4.115 kcal kg⁻¹ para *Pinus* sp., valores médios próximos

entre as coníferas. Hofler et al. (2010) encontraram PCS = 3.348, 4.528 e 4.378 kcal kg⁻¹ para clones de *Eucalyptus* sp. com 3, 5 e 7 anos de idade, respectivamente. Oliveira et al. (2010), trabalhando com parâmetros de qualidade da madeira de *Eucalyptus pellita*, encontraram PCS = 4.621 kcal kg⁻¹.

Pode-se observar também na Tabela 1, que o carbono orgânico (%) está diretamente ligado ao poder calorífico, ou seja, quanto maior sua porcentagem na fração, maior o poder calorífico. Desta forma, o que se espera é que, elevados teores de carbono resultem em maior poder calorífico (CHAVES et al., 2013). Além disso, quanto maior o percentual de carbono presente, mais lentamente o combustível queima (STURION et al., 1988).

Quanto a produção de biomassa após 60 meses de implantação da floresta, a fração madeira apresentou maior produção, seguida de casca, galho e folha. Da mesma forma, a produção geral de energia em relação ao poder calorífico pela produção de biomassa, tem-se a madeira com maior produção (270.418,04 Gcal).

Analisando os dados da Tabela 2, quanto ao custo de reposição dos nutrientes (NPK) alocados nas frações da biomassa do eucalipto, maiores custos foram verificados para o nitrogênio na forma de ureia. O fósforo obteve menor custo em reposição, devido à sua baixa exportação nas frações. No total, os valores médios entre as duas espécies de eucalipto analisadas foi R\$ 1.153,47 para o nitrogênio, R\$ 143,64 para o supertríplo e R\$ 621,30 para o cloreto de potássio.

TABELA 2 - Quantidade de NPK exportado e custo de reposição por meio de biomassa, para as diferentes frações das duas espécies de eucalipto estudadas, aos 60 meses de idade.

Frações	Espécies de eucalipto	Biomassa (mg ha ⁻¹)	Uréia (N)		Supertríplo (P ₂ O ₅)		Cloreto de potássio (K ₂ O)			
			kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹			
			kg	Total (R\$)	kg	Total (R\$)	kg	Total (R\$)	kg	Total (R\$)
Madeira	<i>E. grandis</i>	66,77	329	559,98	46	90,35	155	287,71		
	<i>E. urophylla</i>	64,30	246	417,82	32	63,00	140	261,11		
	Médias	65,54	288	488,88	39	76,67	148	274,41		
Casca	<i>E. grandis</i>	7,49	103	175,14	15	30,05	71	132,12		
	<i>E. urophylla</i>	11,55	145	245,67	24	47,41	100	186,56		
	Médias	9,52	124	210,38	20	38,73	86	159,34		
Galhos	<i>E. grandis</i>	7,22	139	236,22	7	13,81	71	132,06		
	<i>E. urophylla</i>	7,56	91	154,51	7	14,47	59	109,21		
	Médias	7,39	115	195,35	7	14,14	65	120,62		
Folhas	<i>E. grandis</i>	2,20	162	275,78	8	14,79	38	71,33		
	<i>E. urophylla</i>	2,10	142	241,97	7	13,44	34	62,50		
	Médias	2,15	152	258,85	7	14,09	36	66,93		
Total		84,60	679	1.153,47	73	143,64	334	621,30		

Quando analisado a eficiência de utilização de nutrientes (EUN), percebemos na Tabela 3, que os materiais genéticos diferiram quanto a produção de biomassa em todos os seus componentes. De modo geral, observou-se que a EUN decresceu na ordem: P > Mg > K > N > Ca, sendo esta a mesma tendência

observada por Santana et al. (2002). O coeficiente de utilização de macronutrientes da madeira diferiu do trabalho realizado em Eldorado do Sul (RS) por Viera et al. (2012), com o híbrido de *E. urophylla* x *E. globulus*, onde observaram a magnitude média de P > Mg > Ca > N > K.

TABELA 3 - Biomassa e eficiência de utilização de nutrientes (EUN), para as diferentes frações das duas espécies de eucalipto estudadas, aos 60 meses de idade.

Frações	Espécies de eucalipto	Biomassa (mg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg
			kg de biomassa/kg de nutriente				
Madeira	<i>E. grandis</i>	66,77 a*	450,45	3.448,86	719,43	197,24	781,21
	<i>E. urophylla</i>	64,30 b	581,37	4.762,96	763,39	326,79	943,37
	Médias	65,54	506,45	3.989,04	740,40	244,88	853,27
Casca	<i>E. grandis</i>	7,49 b	161,56	1.163,04	175,74	54,92	330,10
	<i>E. urophylla</i>	11,55 a	177,61	1.136,81	191,92	56,12	289,84
	Médias	9,52	170,95	1.146,99	185,21	55,64	304,45
Galhos	<i>E. grandis</i>	7,22 b	115,46	2.439,19	169,48	96,24	571,20
	<i>E. urophylla</i>	7,56 a	184,84	2.438,71	214,59	120,06	375,93
	Médias	7,39	142,91	2.438,94	189,93	107,10	451,44
Folhas	<i>E. grandis</i>	2,20 a	30,14	694,01	95,61	91,67	674,85
	<i>E. urophylla</i>	2,10 b	32,79	729,17	104,17	127,89	598,29
	Médias	2,15	31,38	711,92	99,58	106,38	636,09
	CV (%)	79,19	28,49	17,41	21,63	13,45	23,80
Total		84,60	851,69	8.286,89	1.215,12	514,00	2.245,25

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. CV = coeficiente de variação.

A madeira apresentou os maiores valores de EUN, algo bastante desejável e de grande interesse para a silvicultura. Nas folhas estão os menores valores do EUN, com exceção do Ca e Mg, que se encontram na casca, indicando a importância da manutenção destes componentes no solo após a colheita. Em relação ao custo de reposição de nutrientes (NPK), para se produzir uma

tonelada de biomassa da fração madeira, tem-se um custo de R\$ 14,05 para *E. grandis* e R\$ 11,54 para *E. urophylla* (Tabela 4). A fração madeira é a biomassa com menor custo para se repor os nutrientes exportados. Por outro lado, observou-se que, a fração folhas apresentou maior custo de reposição de NPK (Tabela 4).

TABELA 4 - Custo de reposição de NPK exportado (por tonelada) de biomassa, para as diferentes frações das duas espécies de eucalipto estudadas, aos 60 meses de idade.

Frações	Espécies de eucalipto	Biomassa (mg ha ⁻¹)	Custo total (R\$)	Custo de reposição de NPK (ton.)
Madeira	<i>E. grandis</i>	66,77	938,04	R\$ 14,05
	<i>E. urophylla</i>	64,30	741,93	R\$ 11,54
	Médias	65,54	839,96	R\$ 12,82
Casca	<i>E. grandis</i>	7,49	337,31	R\$ 45,03
	<i>E. urophylla</i>	11,55	479,64	R\$ 41,53
	Médias	9,52	408,45	R\$ 42,90
Galhos	<i>E. grandis</i>	7,22	382,09	R\$ 52,92
	<i>E. urophylla</i>	7,56	278,19	R\$ 36,80
	Médias	7,39	330,11	R\$ 44,67
Folhas	<i>E. grandis</i>	2,20	361,90	R\$ 164,50
	<i>E. urophylla</i>	2,10	317,91	R\$ 151,39
	Médias	2,15	339,87	R\$ 158,08
Total		84,60	1.918,41	R\$ 22,68

Na Tabela 5, ao comparar os valores de produção média de biomassa e energia para poder calorífico nas diferentes frações de eucalipto, pode-se constatar que a madeira obteve maior receita líquida, quanto sua reposição

de NPK, seguida da casca e galhos. No entanto, a fração folha demonstrou uma receita líquida negativa, sendo inviável economicamente para o aproveitamento de biomassa como fonte combustível.

TABELA 5 - Biomassa, energia e análise econômica para as diferentes frações das duas espécies de eucalipto estudadas, aos 60 meses de idade.

Frações	Biomassa (mg ha ⁻¹)	Energia (Gcal)	Receita bruta (R\$ ha ⁻¹)	Custo de reposição NPK (R\$)
Madeira	65,54	270.418,00	7.864,80	839,93
Casca	9,52	34.662,32	1.142,40	408,45
Folha	2,15	10.543,60	258,00	339,87
Galho	7,39	31.629,20	886,80	330,11
Total	84,60	347.253,2	10.152,00	

Frações	Receita líquida (R\$ ha ⁻¹)	Custo reposição NPK (mg de biomassa)	Acúmulo de energia (Gcal/R\$ repostado de NPK)
Madeira	7.024,87	R\$ 12,82	321,95
Casca	733,95	R\$ 42,90	84,86
Folha	- 81,87	R\$ 158,08	31,02
Galho	556,69	R\$ 44,67	95,81

Trabalhos futuros podem avaliar outros efeitos da exportação total e/ou parcial da biomassa sobre a ocorrência de plantas daninhas, erosão e efeito sobre a próxima espécie arbórea.

CONCLUSÕES

A fração folha apresenta o maior poder calorífico e a fração madeira tem a maior capacidade de produção de energia por hectare.

O teor de carbono orgânico está ligado diretamente ao poder calorífico.

A eficiência de utilização de nutrientes para *E. grandis* e *E. urophylla* decresceu na seguinte ordem: P > Mg > K > N > Ca.

A madeira é a fração mais viável para produção de energia sendo que os galhos e as cascas também podem ser utilizados com vantagens econômicas.

A fração folha, não apresentou viabilidade econômica para ser utilizada como fonte de energia.

REFERÊNCIAS

ABRAF. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF, 2013, ano base 2012.** Disponível em: <<http://www.reformaagrariaemdados.org.br/biblioteca/caderno-de-estudo/anu%C3%A1rio-estat%C3%ADstico-da-abraf-2011-ano-base-2010>>. Acesso em: 10 out. 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:** análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:** determinação do poder calorífico superior. Rio de Janeiro, 1984.

AZEVEDO, J.P.M.; NASCIMENTO, R.S.; SCHRAM, I.B. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. **Revista UNINGÁ**, v.51, n.1, [s.p.], 2017.

BHERING, S.B.; SILVIO, B. **Mapa de solos do estado do Paraná.** 1a. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Floresta: Embrapa Solos, 2008, 74p.

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; MOREIRA, J.R.S. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientias Forestales**, v.38, n.86, p.237-245, 2010.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, v.2, n.16, p.63-70, 1978.

CHAVES, A.M.; BRITO, D.V.; AILTON, T.; MELIDO, R.C.; ZOCH, V.P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.17, p.533, 2013.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**. v.6, n.2, p.36-41, 2008.

FONTES, P.J.P. **Auto-suficiência energética em serraria de Pinus e aproveitamento de resíduos.** 1994. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HOFER, J.; BIANCHI, M.L.; SOARES, V.C. Variação da composição química e poder calorífico da madeira de clones de *Eucalyptus* de diferentes idades. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 33., 2010. **Anais...Águas de Lindóia.** 2010.

IBA. **INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. O setor brasileiro de árvores plantadas.** 2015. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2019.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normas climatológicas.** Disponível em:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 23 out. 2019.

JUIZO, C.G.F.; LIMA, M.R.; SILVA, D.A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.3, p.386-390, 2017.

MENEZES, M.J.S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (*Pinus* sp.) e Araucária (*Araucaria angustifolia*) de reflorestamento como resíduos de madeira.** 2013. 65p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR.

- MORAIS, P.H.D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branquiabilidade e propriedades físicas da polpa.** 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MULLER, M.D.; COUTO, L.; NEVES, J.C.L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no Município de Itamarandiba - MG. **Biomassa & Energia**, v.2, n.2, p.91-101, 2005.
- NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T.P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; OLIVEIRA SELVA, V. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando a produção de carvão. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.68, p.319-330, 2011.
- OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M.T.C. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestales**, v.38, n.87, p.431-439, 2010.
- PEREIRA Jr, V.B. **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira.** 2001. 115p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.D.; NEVES, J.C.L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, v.26, n.4, p.447-457, 2002.
- SANTIAGO, F.L.S.; REZENDE, M.A. Aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus* spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica. **Energia na Agricultura**, v.29, n.4, p.241-253, 2014.
- SOUZA, M.M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de *Pinus taeda* L.** 2010. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- STURION, J.A.; PEREIRA, J.C.D.; CHEMIM, M.S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v.3, n.16, p.55-59, 1988.
- 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*. **Revista Cerne**, v.9, n.1, p.66-80, 2003.
- VIERA, M.; BONACINA, D.M.; SCHUMACHER, M.V.; CALIL, F.N.; CALDEIRA, M.V.W.; WATZLAWICK, L.F. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste, RS. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2481-2490, 2012.