

Colombo, PR / Setembro, 2024

Sorgo-biomassa como alternativa à madeira para geração de energia

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura e Pecuária***

ISSN 1517-526X / e-ISSN 1980-3958

Documentos 394

Setembro, 2024

**Sorgo-biomassa como alternativa à
madeira para geração de energia**

*Marina Moura Morales
Flavio Dessaune Tardin
Leticia Maria Pavesi Carvalho
Isabela Sampaio Ribeiro
Maria Lúcia Ferreira Simeone
Rafael Augusto da Costa Parrella*

***Embrapa Florestas
Colombo, PR
2024***

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-presidente

José Elidney Pinto Júnior

Secretária-executiva

Elisabete Marques Oaida

Membros

Annet Bonnet

Cristiane Aparecida Fiorante Reis

Elenice Fritzsens

Guilherme Schnell e Schühli

Marilice Cordeiro Garrastazú

Sandra Bos Mikich

Susete do Rocio Chiarello Penteado

Valderês Aparecida de Souza

Edição executiva e revisão de texto

José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica

Francisca Rasche

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Celso Alexandre de Oliveira Eduardo

Fotos da capa

Márcio Augusto Pereira do Nascimento

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Sorgo-biomassa como alternativa à madeira para geração de energia.

[recurso eletrônico] / Marina Moura Morales ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2024.

PDF (43 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-526x : e-ISSN 1980-3958 ; 394)

1. Bioenergia. 2. Biomassa florestal. 3. Sorgo-biomassa. 4. Energia renovável. I. Morales, Marina Moura. II. Tardin, Flavio Dessaurane. III. Carvalho, Leticia Maria Pavesi. IV. Ribeiro, Isabela Sampaio. V. Simeone, Maria Lúcia Ferreira. VI. Parrella, Rafael Augusto da Costa. VII. Série.

CDD (21. ed) 633.174

Francisca Rasche (CRB-9/1204)

© 2024 Embrapa

Autores

Marina Moura Morales

Bacharel em Química, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Flavio Dessaune Tardin

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Leticia Maria Pavesi Carvalho

Estudante de graduação da Universidade Federal do Paraná, bolsista de iniciação científica na Embrapa Florestas, Colombo, PR

Isabela Sampaio Ribeiro

Mestre em Engenharia de alimentos na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Maria Lúcia Ferreira Simeone

Química, doutora em Química, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Rafael Augusto da Costa Parrella

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Apresentação

A demanda crescente por biomassa para geração de energia no Brasil vem dando sinais de alerta pelo setor consumidor, visto o desequilíbrio entre oferta e demanda em algumas regiões do País. Entretanto, o Brasil possui condições edafoclimáticas, tecnologia de ponta e expertise do agronegócio capaz de contornar este cenário com boas práticas e organização. Neste sentido é estratégico destacar as contribuições que o sorgo-biomassa pode oferecer para o avanço tecnológico na solução deste cenário.

O sorgo-biomassa se destaca por sua fotossíntese eficiente, permitindo um crescimento rápido e com grande produção de biomassa. Adapta-se aos climas tropicais e temperados, possibilitando seu cultivo em todo o território nacional. Apresenta alta eficiência no uso da água, sendo tolerante à estiagem.

Em apenas 5 meses, o sorgo-biomassa produz grandes quantidades de biomassa, despontando como uma alternativa energética em momentos de crise, principalmente, quando a oferta de biomassa tradicional se torna escassa.

Seu cultivo é totalmente mecanizável, com propagação por sementes, gerando um custo operacional menor, quando comparado com outras biomassas alternativas propagadas por mudas, como é o caso do capim-elefante.

Esta publicação apresenta informações sobre a produção agrícola e os parâmetros de queima do sorgo-biomassa, buscando aprimorar ambas as áreas por meio de soluções inovadoras, como a densificação e proporções para queima de sorgo-biomassa com serragem, que privilegie a entrega de energia com menor teor de cinzas, apresentando um estudo piloto realizado para avaliar a viabilidade do uso do sorgo-biomassa como alternativa à lenha tradicional, com foco na logística, armazenamento, automação, processo de queima e menor geração de resíduo na produção de energia no Brasil.

Neste sentido, destaca-se o mérito social, econômico e ambiental em conformidade com a missão da Embrapa e aos Objetivos do

Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), abrangendo o uso eficiente de biomassas para geração de energia e a redução de resíduos (cinzas), visando o uso de tecnologias com “carbono biogênico” e consequente proteção ambiental, alcance da sustentabilidade e mitigação de impactos ambientais negativos. O alinhamento às metas dos ODS (especialmente os objetivos 7, 8, 9, 12, 15, 17) alavanca a segurança energética do País, estimula uma agricultura e industrialização inclusiva, com consequente crescimento econômico e geração de empregos dignos, incentivando o consumo de biomassa alternativa à madeira e fomentando a inovação tecnológica, além de promover o uso sustentável dos recursos naturais e fortalecer parcerias para o desenvolvimento sustentável.

Este documento foi produzido pela Embrapa Florestas e Embrapa Milho e Sorgo, com auxílio de duas bolsistas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), discentes da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a ortografia revisada por Ana Paula Duarte Malacrida e edição das figuras por Luciane Cristine Jaques. Muitos resultados de pesquisa aqui apresentados foram gerados pelo projeto “Seleção de cultivares de sorgo-biomassa e sacarino e estabelecimento de sistemas agrícolas visando produção de energia no estado de Mato Grosso” executado pela Embrapa Agrossilvipastoril e com aporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (Fapemat) - Edital 008/2014 Pronem Áreas Estratégicas, Processo Fapemat 0571329/2014.

O público-alvo são os produtores rurais e empresas consumidoras de biomassa para geração de energia, que tenham interesse em conhecer mais sobre o sorgo-biomassa como cultura bioenergética.

Marcelo Francia Arco Verde

Chefe-Geral interino da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução	9
Biomassa florestal	12
Parâmetros do processo de queima	13
Sorgo-biomassa	16
Biomassa florestal e sorgo-biomassa	20
Produtividade de energia	26
Poder calorífico líquido	27
Densidade energética	28
Estimativa do custo da energia gerada	29
Índice de qualidade do combustível	29
Resultados	30
Considerações finais	35
Referências	36

Introdução

A energia renovável está em ascensão no mundo (International Energy Agency, 2024), isso porque a energia gerada por combustíveis fósseis (carvão mineral, gás natural e petróleo), além de ser finita, tem alta volatilidade de preço e é poluente (Melodia; Karlsson, 2022). Isso causa instabilidade em assegurar energia e sustentabilidade ao mundo.

Num passado recente, os combustíveis fósseis fizeram com que o uso da biomassa, majoritariamente a lenha, fosse considerado retrocesso tecnológico e econômico. Assim, estas fontes de energia foram gradualmente substituídas, tornando-se opção somente em tempos de crise do petróleo.

Atualmente, com os efeitos das mudanças do clima acarretando no aquecimento global e suas consequências danosas, desdobram em insegurança hídrica, alimentar e energética (Benjamin et al., 2017). Portanto, dispor de energia limpa é estratégico e não só uma alternativa em tempos de crise.

A população mundial encontra-se em uma revolução conceitual, em que o uso da lenha para geração de energia volta a ser sinal de progresso, em substituição às fontes fósseis, em conjunto com outras biomassas sorgo-biomassa (*Sorghum bicolor* (L) Moench), bambu (*Bambusa vulgaris*), capim-elefante *Cenchrus purpureus* (Schumacher). Morrone etc e biocombustíveis (etanol, biodiesel etc.).

Neste contexto, vale lembrar que o planeta Terra levou milhares de anos estocando carbono da superfície nas camadas profundas do solo e dos oceanos para formar os combustíveis fósseis. Desde a sua industrialização, em meados de 1850, ele é extraído de forma mais intensa e lançado novamente para a atmosfera, pelo processo de queima (Environmental Protection Agency, 2014), aumentando o dióxido de carbono (CO₂) para níveis, hoje, acima do aceitável em muitas regiões do planeta Terra. É uma conta que não fecha! Isso vem sendo discutido desde a década de 1970 (Broecker, 1975), entretanto com mais afinco nos dias atuais.

Já a energia renovável advinda de plantas como o eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e o sorgo-biomassa otimizam o uso da radiação solar, ou seja, as plantas operam como usina transformadora de energia solar em matéria, estocando o carbono da atmosfera via fotossíntese. Em outras palavras, as plantas produzem a partir da energia solar, não só energia como também alimentos e fibras para uma população que não para de crescer.

No processo de queima de biomassa também é liberado para a atmosfera o CO_2 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). Entretanto, este carbono é cíclico, denominado de carbono biogênico, não aumentando a concentração de CO_2 na atmosfera, diferentemente da queima de combustíveis fósseis (Figura 1).

O carbono biogênico baseia-se no conceito da planta reabsorver o carbono emitido de sua queima por meio da fotossíntese em novos

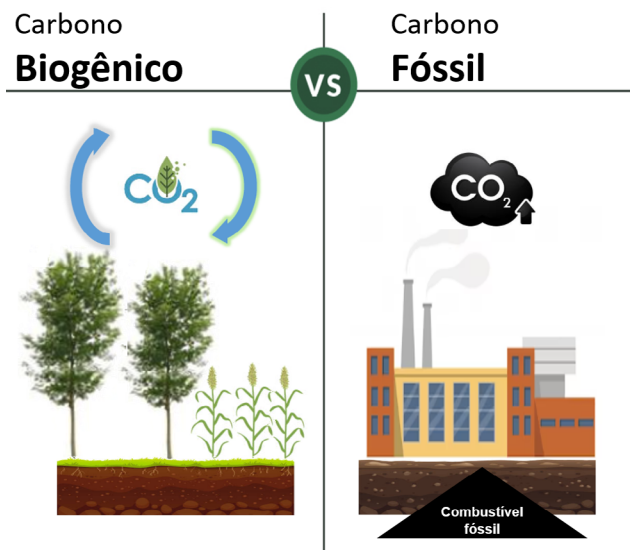


Figura 1. Emissão do carbono biogênico x carbono fóssil.

Ilustração: Marina Moura Morales.

plantios (Figura 1), mantendo o ciclo de carbono, sem incrementos da concentração de CO_2 na atmosfera, podendo ser considerado carbono neutro (Van Fan et al., 2021).

Vale lembrar que, no balanço geral, a produção agropecuária não é considerada como carbono neutro, visto o uso de combustíveis fósseis, emissores de carbono (C) não biogênico, em várias etapas do processo produtivo como: plantio, tratos culturais, colheita, transporte, pré-tratamento, entre outros (Booth, 2018).

No mundo, as fontes de energia renováveis representam apenas 17,7% do total da energia primária de abastecimento, dos quais a energia proveniente de biomassa corresponde a 67% (Empresa de Pesquisa Energética, 2022). No Brasil, este cenário é mais promissor, visto sua aptidão para agricultura com clima, solo e recursos hídricos favoráveis, além de tecnologia de ponta. A matriz energética brasileira conta com 44,8% de energia renovável (Figura 2). Entretanto, apenas 8,7% é oriunda de biomassa florestal (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

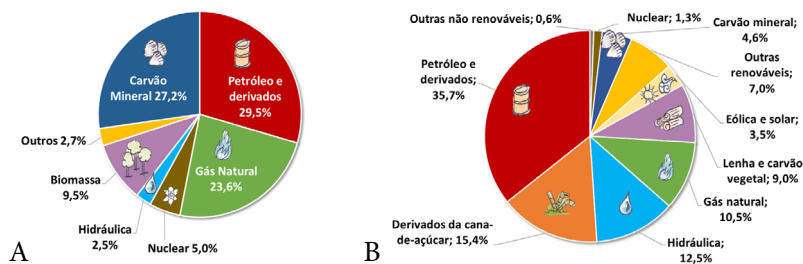


Figura 2. Matriz energética mundial (2020) (A) e brasileira (2021) (B).

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022).

Mesmo com o cenário promissor, o Brasil vem sofrendo com a insegurança energética batendo à porta de sua cadeia produtiva, apontando para um cenário preocupante. Ao longo dos últimos anos, os preços baixos oferecidos para a biomassa florestal desestimularam novos plantios

em boa parte do País, fazendo com que os produtores optassem pelo cultivo de commodities agrícolas, como a soja, o algodão e o milho.

Para que isso não ocorra novamente, é importante que haja ações que: (i) estimulem novos plantios florestais com a garantia de preços justos ao produtor, ou seja, de forma organizada entre as empresas e o setor produtivo. Para isso, é importante que o levantamento de informações de oferta e demanda por regiões do País e até por Estados sejam consideradas; e (ii) deem oportunidades aos plantios organizados de biomassas alternativas, como o do sorgo-biomassa, que possui Zoneamento Agrícola de Recomendação de Cultivares já conhecido (Embrapa, 2024), fortalecendo assim a segurança energética no País.

Biomassa florestal

Traduzindo em números, 33,8% dos 240,3 milhões de metros cúbicos de biomassa provenientes de florestas plantadas no Brasil são utilizados para energia na forma de carvão (35,1%) e lenha (64,9%) (IBGE, 2022a). Deste montante, 90,7% são provenientes do eucalipto, seguido do pinus com 4% e outras espécies com 5,3% (IBGE, 2022a).

Já, as florestas nativas manejadas contam com 21,6 milhões de metros cúbicos para fins energéticos. Destes 91,4% são destinados para lenha e 8,6% para carvão. Entretanto, este valor vem decrescendo ao longo dos anos, com as políticas de preservação destas florestas (IBGE, 2022b).

Contudo, o mercado da madeira para energia tem apresentado oscilações que preocupam seus consumidores, considerando que o raio com viabilidade econômica para a lenha é estimado em 150 km (FS Bioenergia, 2021), e que nem sempre a madeira ofertada situa-se a esta distância do consumidor final.

Um bom exemplo disso é o estudo realizado pelo Imea-MT em 2015, que mostra que a demanda por eucalipto plantado era maior que a produção em algumas regiões, ou seja, os locais de plantios não acompanharam a demanda da indústria consumidora (Tabela 1).

Cenários como estes mostram a importância de estudos/levantamentos para planejamentos e tomadas de decisões mais assertivas, como a de promover plantios de biomassa alternativa à madeira para geração de energia, como o sorgo-biomassa, em regiões com déficit e baixa produção de lenha.

Tabela 1. Desenvolvimento da cadeia do eucalipto e balanço entre oferta e demanda de biomassa em 2015.

Regiões	Área de plantio (ha)	Demanda estimada (ha)	Balanço (ha)
Centro-Sul	28.227	12.055	16.172
Médio-Norte	35.383	53.330	-17.947
Nordeste	9.410	12.496	-3.086
Noroeste	6.401	5.651	750
Norte	203	3.674	-3.471
Oeste	16.608	11.169	5.439
Sudeste	79.947	56.681	23.266
Mato Grosso	176.178	155.055	21.123

Fonte: Ozaki (2021).

Parâmetros do processo de queima

Na conversão da biomassa em energia deve-se levar em conta a umidade, não só pelo processo de queima em si, mas também pela logística e armazenamento. Quanto maior o teor de umidade na biomassa, maior o gasto com manuseio, transporte e estoque.

Vale lembrar que, na colheita, a árvore possui umidade de 50% a 60% (Quirino, 2005; Foelkel, 2016). Entretanto, logo que é abatida parte da água escorre pela ação da gravidade até estabilizar e parte é perdida por evaporação. Em geral, a partir dos 30 a 45 dias secando ao ar livre a umidade situa-se aproximadamente no intervalo de 35% a 40%, dependendo das condições do clima (chuva, umidade relativa do ar, ventos, incidência de sol), podendo chegar entre 22%

a 30%, que é a umidade de equilíbrio da madeira, próxima ao ponto de saturação das fibras (Lima et al., 2008). O ideal é que a madeira permaneça nessas condições por, no máximo, 120 dias, em função da degradação biológica (Foelkel, 2016) que promove a perda de carbono e, conseqüente, perda de energia.

Na indústria, é recomendado que a biomassa seja processada com umidade abaixo de 25%, para que seja possível alcançar eficiência do processo de queima próximo a 75% (Lima et al., 2008) e, ainda, diminuir a formação de crostas e fuligem na câmara de queima (Farinhaque, 1981).

Para exemplificar, em termos de poder calorífico líquido (PCL), a madeira com 40% de umidade gera $2.385 \text{ kcal kg}^{-1}$, enquanto que, com 25% de umidade, gera $3.132 \text{ kcal kg}^{-1}$ (Tabela 2). Vale lembrar que o poder calorífico superior (PCS) médio da madeira seca é $4.700 \text{ kcal kg}^{-1}$, com raras exceções maiores ou menores que a média (Quirino et al., 2004), não sendo o eucalipto uma delas (Moreira et al., 2012).

Tabela 2. Custo da energia da lenha posta no consumidor, cavaco sujo e cavaco limpo onde foram produzidos, em função da umidade.

Umidade (%)	PCL ⁽¹⁾ (kcal kg ⁻¹)	Custo da Energia ⁽²⁾		
		Lenha (R\$ Gcal ⁻¹)	Cavaco sujo (R\$ Gcal ⁻¹)	Cavaco limpo (R\$ Gcal ⁻¹)
50	1.888	126,38	129,72	210,96
40	2.385	100,02	102,66	166,95
30	2.883	82,76	84,94	138,14
20	3.381	70,58	72,44	117,81
10	3.878	61,52	63,15	102,69
0	4.346	54,53	55,97	91,02

⁽¹⁾ Poder calorífico líquido relativo a umidade da biomassa (PCL_u) = $[(PCS-324) \times ((100-umidade)/100)] - (6 \times umidade)$ (BRITO, 1993); Densidade energética (DE) = $(PCL_u \times \text{Densidade básica do Eucalipto})$, em que a densidade = 564 kg/m^3 e $PCS=4700 \text{ kcal/kg}$ (Moreira et al., 2012); ⁽²⁾ Custo da energia = $DE \times \text{Preço da madeira (R\$133,62)}$, (DERAL-PR, 2023).

Traduzindo este cenário em custo da energia gerada e considerando os valores médios praticados no Paraná de R\$ 133,62 por metros cúbicos para lenha posta no consumidor, R\$ 223,04 por metros cúbicos para o cavaco limpo onde foi produzido e R\$ 137,15 por

metros cúbicos para o cavaco sujo (com casca ou com resíduos, em geral) onde foi produzido (Paraná, 2023) (Figura 3), tem-se que:

- 1) Quanto maior a umidade maior o custo da energia gerada, visto que a água rouba calor do sistema (etapa endotérmica) até estar completamente seca e, assim, iniciar a geração de energia (etapa exotérmica). Além disso, maiores proporções de água não somente diminuem a entrega de energia, como também reduzem a temperatura da fornalha e aumentam a quantidade dos gases condensáveis liberados (materiais voláteis), compostos por alcatrões e vapores d'água ácidos que podem ser depositados nas paredes dos fornos causando obstruções, além de diminuir a vida útil pela corrosão ácida (Sharma et al., 2021).
- 2) A automação crescente dos processos de queima exige o uso de cavaco, briquetes ou pellets, impactando diretamente no custo da biomassa, notório pela diferença de preço entre a lenha e o cavaco limpo;
- 3) Há impacto no preço da biomassa pelos resíduos de queima que ela gera, haja vista a diferença no valor do cavaco limpo e do cavaco sujo. Como o cavaco sujo gera mais resíduos no forno, além de acelerar o desgaste por meio da incrustação/corrosão, ele aumenta

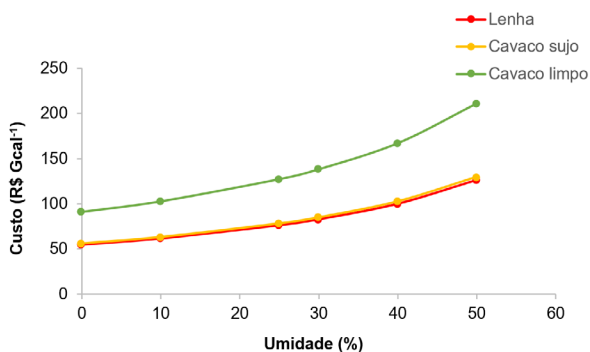


Figura 3. Custo da energia em função da umidade da biomassa, no processo de queima, para lenha posta no consumidor, cavaco sujo e cavaco limpo onde foram produzidos.

Fonte: adaptados de Paraná (2023).

o custo de queima com a operação de limpeza e posterior descarte das cinzas (disposição final).

Vale ressaltar que, na automação, o tamanho da biomassa tem importância na etapa de queima, otimizando o processo, conferindo maior controle de carga de biomassa, atendendo o tempo de permanência na queima (queima total) e também na logística nas etapas de manuseio, armazenagem e transporte.

Cada vez mais as empresas optam pela automação, tanto no transporte dentro das fábricas, como nas esteiras transportadoras e roscas alimentadoras, utilizando o cavaco (Informativo Setor Florestal, 2016). Isso porque há ganhos econômicos em função do controle de desempenho, rastreabilidade, agilidade operacional em função da integração das operações do processo e padronização destas operações.

Isso tudo é otimizado com a padronização da biomassa para queima, hoje predominantemente na forma de cavaco (com umidade variável) e no futuro próximo com biomassa densificada (briquetes e, ou pellets) com tamanho, densidade, umidade (ideal próxima a 10%), maior produção de energia e resíduos já padronizados, sem falar nos ganhos logísticos com menor transporte de água, maior quantidade de biomassa por volume transportado e armazenamento com menor riscos de incêndio e perda de energia por biodegradação.

Sorgo-biomassa

É importante utilizar o potencial que a natureza tem em produzir biomassa com alta produtividade de energia por hectare, no menor tempo, como é o caso do sorgo-biomassa, que produz em torno de 475 GJ ha^{-1} em, aproximadamente, 180 dias (Morales et al., 2022). Traduzindo isso em termos agrônômicos, o sorgo-biomassa tem alta produtividade de matéria verde (Figura 4) e de matéria seca, podendo superar 100 t ha^{-1} e 25 t ha^{-1} , respectivamente, e o poder calorífico superior desta biomassa em torno de $4.300 \text{ kcal kg}^{-1}$ (Batista et al., 2016; Costa et al., 2018).



Figura 4. Sorgo-biomassa, BRS 716.

Vale a ressalva que essa performance agrônômica ocorre em plantios de verão, uma vez que o sorgo-biomassa é sensível ao fotoperíodo, sendo considerado planta de dia curto, possui estímulo para florescer em dias cujas noites (horas de ausência de luz) superem 12:20h (Rooney; Aydin, 1999). Assim, para a planta de sorgo-biomassa demonstrar seu maior potencial produtivo, as lavouras obrigatoriamente devem ser cultivadas no verão (primeira safra), pois em épocas de segunda safra (plantios em fevereiro ou março) a planta floresce precocemente, encurtando seu ciclo vegetativo, reduzindo consideravelmente a produtividade. Para exemplificar esse fenômeno são apresentadas na Tabela 3 as produtividades de massa verde (PMV) e de massa seca (PMS) do híbrido de sorgo-biomassa BRS 716, cultivado em Sinop, MT, em diferentes anos agrícolas, compreendendo plantios de safras e de safrinhas.

Fica evidente, assim, que as produtividades médias alcançadas pelo cultivar em plantios de segunda safra/safrinha (PMV = 41,9 t ha⁻¹; PMS = 15,7 t ha⁻¹) são inferiores à metade das produtividades médias obtidas pelas lavouras de primeira safra (PMV = 87,1 t ha⁻¹; PMS = 33,6 t ha⁻¹), enquanto a menor produtividade observada entre os cultivos de safra foi PMV = 76,3 t ha⁻¹ e PMS = 25,5 t ha⁻¹ no ano agrícola 2014/2015. A maior produtividade entre cultivos de safrinha foi observada no ano agrícola de 2021, com PMV = 47,8 t ha⁻¹ e PMS = 16,9 t ha⁻¹. Os resultados comprovam a superioridade produtiva do cultivar de sorgo-biomassa em plantios de safra, em comparação com produtividades alcançadas em plantios de safrinha. Grande parte destas diferenças se deve à sensibilidade ao fotoperíodo apresentada por esse tipo de sorgo.

Tabela 3. Produtividades de massa verde (PMV) e seca (PMS), percentagem de massa seca na colheita e altura média de plantas do cultivar de sorgo-biomassa BRS 716 cultivados em diferentes épocas de cultivo (safras e safrinhas), no município de Sinop, MT.

Época de cultivo	PMV (t ha ⁻¹)	PMS (t ha ⁻¹)	Massa seca (%)	Altura da planta (m)
Safra 2013/2014	103,1	42,5	41,2	5,1
Safra 2014/2015	76,3	25,5	33,4	5,5
Safra 2015/2016	79,7	33,9	42,5	5,3
Safra 2016/2017	89,0	29,8	33,5	5,4
Safra 2017/2018	82,5	33,5	40,6	5,2
Safra 2018/2019	91,9	36,1	39,3	5,3
Safrinha 2019	36,1	14,5	40,2	3,4
Safra 2019/2020	90,5	37,1	41,0	5,2
Safrinha 2020	-	-	-	-
Safra 2020/2021	84,1	30,6	36,3	5,3
Safrinha 2021	47,8	16,9	35,4	3,7
Média safras	87,1	33,6	38,5	5,3
Média safrinhas	42,0	15,7	37,8	3,6

Fonte: Morales et al. (2022).

Além da alta produtividade do sorgo-biomassa, algumas de suas vantagens são: plantio por sementes, ampla adaptação edafoclimática, poder calorífico desejável, cultivo mecanizado do plantio até a colheita e sistema de produção (manejo) consolidado.

Adicionalmente, pode ser uma alternativa para arrendamentos de terras próximos à indústria consumidora com menores períodos de contrato quando comparado aos florestais, além de ser uma alternativa para compensação rápida ao déficit regional de madeira para energia (Tabela 3); também para plantios em regiões com perfil de solos rasos que inviabilizam o cultivo de espécies madeireiras, além de uso em regiões onde a madeira para energia não está consolidada.

Dentre as desvantagens, esse tipo de biomassa tem baixa densidade, em torno de 80 kg m^{-3} , considerando a granulometria de colheita $< 4\text{mm}$ e umidade em torno de 10% (Dados obtidos nesta pesquisa) e alta umidade na colheita, em média 67% (Mantovani et al., 2019). Pesquisas relacionadas a sistemas de produção por meio de dessecação da lavoura com herbicidas, por meio de drone, têm obtido melhores resultados, conseguindo reduzir a umidade do sorgo, no momento da colheita, para aproximadamente 40% (60% de MS)¹. Entretanto, esses valores estão aquém do almejado.

Outra alternativa estudada para a diminuição da umidade da biomassa, sem a necessidade do uso do secador, foi feita após a colheita, o armazenamento a céu aberto por 21 dias, em que o teor de umidade atingiu aproximadamente 21% (79% de MS) nas condições de clima e temperatura no momento do estudo (Mantovani et al., 2019). Entretanto, vale lembrar que esse manejo da biomassa, da forma em que é colhida, limita tanto a logística de transporte, manuseio e armazenamento no pátio das indústrias como no processo de queima, visto a baixa densidade e, ainda, alta umidade.

Diante disto, apesar do sorgo-biomassa ser uma das espécies vegetais com maior produtividade de biomassa por área, as características de baixa densidade e alta umidade no momento da colheita

¹ Mensagem obtida por WhatsApp do pesquisador Alexandre Ferreira da Silva, da Embrapa Milho e Sorgo, enviada para os autores em 02/08/2023.

dificultam a queima da forma que sai do campo. Assim, sua adequação às características de queima, logística e armazenamento, próximas as da madeira, são importantes para que esta biomassa seja realmente uma boa alternativa. Para isso, é importante aliar seu potencial agrônomo com o processo de densificação que, como já dito, traz ganhos adicionais como a automação dos processos de queima.

A tecnologia de densificação é consolidada e de domínio nacional, tanto para a produção de equipamentos (briquetadeiras e pelletizadoras) quanto para a produção de briquetes e pellets. Sendo feita atualmente em outros países diretamente no campo, entretanto com foco na densificação para alimentação animal.

Vale esclarecer que o que diferencia a densificação para a alimentação animal e para energia é somente a força empregada na prensagem. Pellets para energia são mais densos e, consequentemente, com maior energia para queima, enquanto pellets para ração animal são menos densos para facilitar a mastigação do animal.

Biomassa florestal e sorgo-biomassa

Assim como o cavaco, a biomassa densificada (briquetes e pellets) vem ao encontro com a automação crescente dos processos de queima nas indústrias, isso porque a padronização da biomassa melhora a eficiência do processo. No quesito padronização o cavaco apresenta desvantagens que devem ser levadas em conta, quando comparado com biomassas densificadas.

Dentre essas desvantagens, o cavaco comercial tem menor entrega de energia em função da maior umidade e da menor densidade, (Tabela 4). É importante ressaltar novamente que, se o cavaco não for seco antes da queima, será seco durante a queima, acarretando na diminuição da eficiência do processo, impactando diretamente nos custos da energia gerada (Figura 3).

Como já dito, tanto a densidade quanto a umidade da biomassa têm efeitos diretos nos custos e na logística de transporte, carregando mais água e menos biomassa, além de dificuldades no armazenamento, em que a umidade favorece a biodegradação e consequente perda de carbono/energia, acarretando em maior risco de incêndio.

Tabela 4. Variáveis energéticas, econômicas e agrônômicas do cavaco de madeira, sorgo-biomassa densificado e madeira densificada.

Variáveis	Cavaco de madeira	Sorgo-biomassa densificado ⁽¹⁾	Madeira densificada ⁽²⁾
Umidade (%)	~40 ⁽¹⁾	~ 10	~ 10
Densidade (kg m ⁻³)	~360 ⁽¹⁾	~1.000	~1.000
Cinzas (%)	~1,2	~3,9	~1,2
Teor de Hidrogênio (%)	~6	~6,8	~6
Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	~4.500	~ 4.300	~4.500
Poder calorífico inferior (kcal kg ⁻¹)	~4.200	~3.900	~4.200
Poder calorífico líquido (kcal kg ⁻¹)	~2.300	~3.200	~3.400
Densidade energética (Gcal m ⁻³)	~0,83	~3,2	~3,4
Produção de biomassa (t ha ⁻¹ massa seca) ⁽⁵⁾	~46	~25	~46
Tempo para corte (ano)	6	0,5	6
Produção de energia por corte (Gcal ha ⁻¹) ⁽⁵⁾	207,9	107,5	207,9
IQC (x1.000)	34,5	110,2	383,3

Fonte: ⁽¹⁾ Corradi (2021); ⁽²⁾ Paraná (2023); ⁽³⁾ Considerando floresta de eucalipto com idade de 6 anos e 1.600 árvores plantas por hectare e lavoura de sorgo-biomassa com idade de 6 meses e 110.000 plantas por hectare; IQC= índice de qualidade de combustível.

Por sua vez, as biomassas densificadas têm baixa umidade e alta densidade (Tabela 4) em função do próprio processo de adensamento, concentrando maior quantidade de massa por volume (Figura 5). Isso tudo privilegia a automação, com menor oscilação na geração de energia (Tabela 4), além de otimizar a logística de transporte e armazenamento e diminuir o impacto da biodegradação.

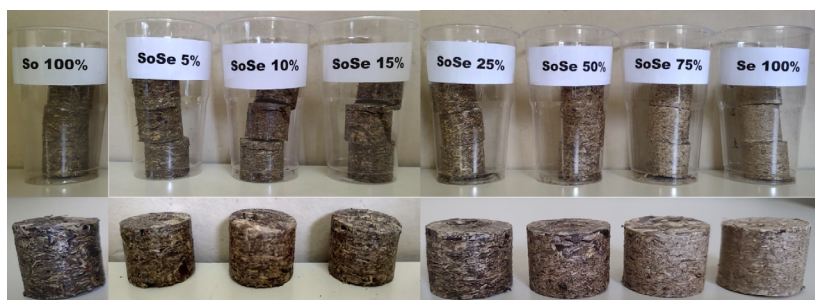
Ainda, em termos de comparação, a Figura 5 exemplifica a equivalência energética entre os biocombustíveis apresentados na Tabela 4, utilizando as mesmas variáveis para os cálculos. Pelo índice de qualidade de combustível (IQC), apresentado na Tabela 4, quanto maior este parâmetro melhor o combustível, visto que o IQC leva em conta as características desejáveis para a queima, ou seja, maior poder calorífico, maior densidade, menor teor de cinzas e menor umidade. Este índice é abordado de forma mais aprofundada no item 5.

Observa-se que o teor de cinzas gerado pelo sorgo-biomassa densificado é maior que o gerado pelo cavaco (Tabela 4). Assim, a alimentação do forno com misturas das duas biomassas (sorgo-biomassa densificado + cavaco) pode diminuir o teor de cinzas por tonelada de biomassa queimada e aumentar o poder calorífico superior, aproximando-se estes parâmetros (PCS e cinzas) dos obtidos na realidade das indústrias que utilizam o cavaco como matéria-prima para a queima.



Figura 5. Equivalência energética, em volume (m^3), entre os biocombustíveis cavaco de madeira, sorgo-biomassa densificado e madeira densificada.

Com o objetivo de confirmar tal hipótese, estudou-se proporções de sorgo-biomassa e serragem para queima conjunta, com foco na menor geração de cinzas e maior entrega de energia, por tonelada de biomassa queimada. Neste estudo, para fins práticos de laboratório, as biomassas foram densificadas juntas (Figura 6).



Fotos: Leticia Maria Pavese Carvalho

Figura 6. Briquetes/pellets produzidos com mesclas de sorgo-biomassa (So) e serragem de eucalipto (Se) nas seguintes proporções (So:Se): 100:0 (So 100%), 95:5 (So:Se 5%), 90:10 (So:Se 10%), 85:15 (So:Se 15%), 80:20 (So:Se 20%), 75:25 (So:Se 25%), 65:35 (So:Se 35%), 50:50 (So:Se 50%), 25:75 (So:Se 75%) e 0:100 (Se 100%).

Entretanto, na prática, para otimizar os custos operacionais na queima industrial, não se justifica a confecção de um briquete/pellet misto (sorgo-biomassa + serragem), mas sim a realização da alimentação conjunta do forno com as duas biomassas, em proporções adequadas da seguinte forma: (i) sorgo-biomassa densificado + cavaco; (ii) sorgo-biomassa densificado + serragem densificada; (iii) sorgo-biomassa + cavaco e (iv) sorgo-biomassa + serragem densificada, sendo essas duas últimas formas objeto de estudo técnico-econômico mais aprofundados, tendo em vista a alta umidade e baixa densidade do sorgo-biomassa in natura.

Para o estudo técnico, com foco em viabilizar o processo de queima do sorgo-biomassa e subsidiar testes na indústria, foram

produzidos briquetes/pellets no Laboratório de Biomassa da Embrapa Florestas, situada em Colombo, PR. As biomassas do híbrido de sorgo BRS716 foram produzidas pela Embrapa Milho e Sorgo, no campo experimental situado em Sete Lagoas, MG, colhidas com ensiladeira de forragem ajustada para corte ≤ 20 mm, obtendo 72% do total da biomassa com granulometria < 4 mm.

A serragem de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) foi coletada, com casca, em uma área de produtor situada em Colombo, PR. Para a produção dos briquetes/pellets, ajustaram-se as umidades das biomassas para aproximadamente 10%. Isso é facilmente obtido por gravimetria, medindo-se a umidade atual da biomassa e a massa que será seca, conforme a equação:

$$MUD = M \times \frac{(100 - U_i)}{(100 - U_d)}$$

Em que:

MUD = Massa na umidade desejada, em g;

M = Massa que se deseja secar, em g;

U_i = Umidade inicial, em %;

U_d = Umidade desejada, em %.

A umidade em torno de 10% é importante para assegurar a qualidade da densificação. Umidade superior a 10%, além de não garantir a qualidade exigida do briquete/pellet, também causa problemas no processo, como entupimento da densificadora (briquetadeira ou pelletizadora), ocasionando paradas para a desobstrução e possíveis danos ao equipamento.

No ensaio de laboratório o sorgo-biomassa, quando comparado à serragem, admitiu maior umidade para densificação, mantendo a qualidade física do briquete/pellet (Figura 7). Entretanto, mais testes em escala industrial devem ser feitos para confirmar esta observação.

A temperatura média de densificação e a pressão inicial utilizadas foram 120 °C e ~70 bar, respectivamente (Dias et al., 2012), mantida

por 7 minutos (dados obtidos nesta pesquisa). A pressão não foi ajustada ao longo do tempo, em função desse ajuste não ter sido efetivo nos pré-testes realizados, causando deformação no briquete/pellet, principalmente para a serragem.

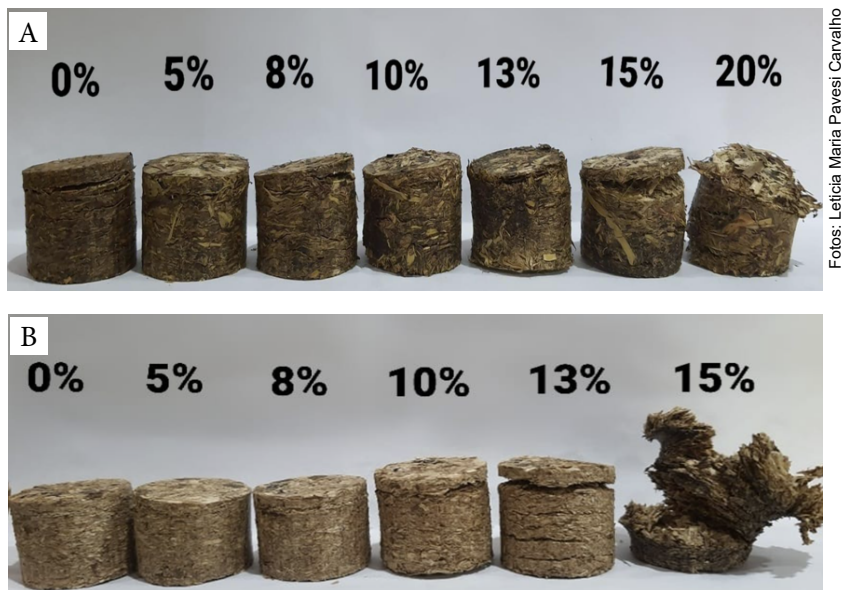


Figura 7. Briquetes/pellets produzidos com sorgo-biomassa (A) e serragem de eucalipto (B), ambos com granulometria de colheita < 4 mm, em diferentes umidades (0 até 20%).

Os briquetes/pellets produzidos foram analisados quanto a umidade e cinzas (Cz), descrito na norma NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986). O poder calorífico superior (PCS) baseou-se na norma da ASTM D5865 (American Society for Testing and Material, 2013). A densidade dos briquetes/pellets foi obtida pela razão entre sua massa e volume (cilindro). O teor de hidrogênio (H) obtido por cromatografia gasosa, via combustão completa, pelo analisador elementar (CHNS).

Este experimento foi elaborado visando mensurar a energia produzida pelos briquetes/pellets de sorgo-biomassa, em função da proporção de serragem (Figura 6), além de quantificar a variação dos resíduos (cinzas) gerados na queima. Para isso, foram realizadas análises estatísticas GLM (*General Linear Model* ou Modelos Lineares Gerais) e teste de comparação de médias de Tukey, a 5% de significância, com auxílio do software Jamovi, versão 2.2 (Jamovi, 2023).

O aproveitamento eficiente da energia térmica faz-se necessário cada vez mais. Portanto, é importante conhecer: (i) a produtividade energética (Gcal ha⁻¹); (ii) o poder calorífico líquido – PCL (kcal kg⁻¹); (iii) a densidade energética – DE (Gcal m⁻³); (iv) o custo da energia gerada (R\$ Gcal⁻¹) e (v) o índice de qualidade do combustível (IQC). Tais parâmetros são de grande valia para orientar as tomadas de decisões na indústria. Para isso, vale relembrar os seguintes conceitos e fórmulas de cálculo:

Produtividade de energia

É a quantidade de energia, em Gcal, produzida pela biomassa por área, em hectares. Este é um parâmetro importante para avaliações de produtividade no campo e decisão do que plantar e como plantar, levando em consideração os objetivos do produtor e a distância em

$$PE = \frac{PCS \times 238,85 \times Prod}{1.000}$$

que a biomassa será entregue.

Em que:

PE = produtividade de energia, em Gcal ha⁻¹;

PCS = poder calorífico superior, em MJ kg⁻¹;

238,85 = fator de conversão de unidade de MJ para kcal;

Prod = produtividade de massa seca por hectare, em t ha⁻¹.

Poder calorífico líquido

Para entender esse conceito, primeiro é preciso entender o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI).

O PCS expressa a quantidade de energia gerada por unidade de massa, considerando o calor de vaporização da água existente na biomassa durante o seu processo de queima, ou seja, considera a etapa endotérmica, que promove perda da energia para remoção da água molecular de constituição da biomassa (água que não é perdida no processo de secagem) até a etapa exotérmica, que efetivamente gera energia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984; Protásio et al., 2011).

Vale ressaltar que o PCS não apresenta diferença significativa entre a maioria das espécies madeireiras, tendo valor médio de 4.732 kcal kg⁻¹ (Quirino, 2005).

Já o poder calorífico inferior (PCI) considera a condensação da água de constituição da biomassa, ou seja, corresponde unicamente à energia libertada na forma de calor. O PCS é medido de forma direta no equipamento chamado calorímetro ou bomba calorimétrica e o PCI pode ser obtido por cálculo, em que o calor de vaporização da água molecular é descontado, regido pela quantidade de hidrogênio elementar da biomassa. A fórmula utilizada para a sua obtenção é:

$$PCI = PCS - 54H$$

Em que:

PCI = poder calorífico inferior, em kcal kg⁻¹;

PCS = poder calorífico superior, em kcal kg⁻¹;

H = teor de hidrogênio, em %.

O poder calorífico líquido (PCL) considera a umidade real da biomassa. Para traduzir o potencial de influência da umidade no processo de queima, vale destacar que, para evaporar 1 kg de água contida

na madeira, são necessários aproximadamente 556 kcal, as quais devem ser deduzidas do seu poder calorífico (Arola, 1976).

O PCL é calculado com base nos parâmetros indicados acima. Para melhor entendimento, as equações foram desmembradas (Brito, 1993):

$$PCL = \left[PCI \times \left(\frac{100 - U}{100} \right) \right] - (6xU)$$

Em que:

PCL = poder calorífico líquido com umidade “ U ”, em kcal kg⁻¹;

PCI = poder calorífico inferior, em kcal kg⁻¹;

U = teor de umidade, em %.

Densidade energética

A densidade energética (DE) é a quantidade de energia (Gcal) por unidade de volume (m³). Esse valor é um parâmetro importante para tomada de decisões, principalmente, quando se quer comparar quantidade de energia gerada entre biomassas. Ainda, no âmbito mais técnico, é possível estimar o volume de biomassa para injeção no forno a partir da energia que se quer obter. Neste caso é importante considerar o PCL e não o PCS ou PCI, levando em conta a umidade presente na biomassa (Souza; Vale, 2016).

$$DE = \frac{PCL \times Dens_U}{1.000.000}$$

Em que:

DE = densidade energética, em Gcal m⁻³;

PCL = poder calorífico líquido à umidade “ U ”, em kcal kg⁻¹;

$Dens_U$ = densidade da biomassa à umidade “ U ”, em kg m⁻³.

Estimativa do custo da energia gerada

É possível estimar o preço a ser pago pelas biomassas em função do seu potencial de gerar energia para o sistema (Moreira et al., 2012) pela fórmula:

$$CE = \frac{Preço}{DE}$$

Em que:

CE = custo da energia, em R\$ Gcal⁻¹;

$Preço$ = custo da energia, em R\$ m⁻³;

DE = densidade energética, em Gcal m⁻³.

Índice de qualidade do combustível

O índice de qualidade do combustível (IQC) também auxilia na comparação entre biomassas. Este considera as características desejadas nas biomassas como: alto teor de energia por unidade de massa (PCS e densidade), baixo teor de cinzas e baixo teor de umidade. Quanto maior o índice, melhor é a qualidade da biomassa para queima. Calculado por (Purohit; Nautiyal, 1987):

$$IQC = \frac{PCS \times Dens}{Cz \times U}$$

Em que:

IQC = índice de qualidade do combustível;

PCS = poder calorífico superior, em Kcal kg⁻¹;

Dens = densidade da biomassa, em kg m⁻³;

Cz = teor de cinzas, em %;

U = teor de umidade, %.

Para exemplificar, a Tabela 5 apresenta o IQC de algumas biomassas.

Tabela 5. Índice de qualidade do combustível (IQC x 1.000) do sorgo-biomassa densificado, do cavaco, da madeira densificada e da mescla sorgo-biomassa densificado:cavaco na proporção 65%:35%

Biomassa	IQC x 1.000
Sorgo-biomassa densificado	120,0 ⁽¹⁾
Madeira densificada	383,3
Cavaco	34,5
Sorgo-biomassa densificado (65%): cavaco (35%)	205,8

⁽¹⁾ Umidade = 10%.

Vale ressaltar que, apesar do IQC ser um índice importante para comparação entre biomassas, uma crítica importante a ser feita é que as características das biomassas utilizadas na equação possuem pesos iguais. Entretanto, dependendo da finalidade de uso da biomassa, estes pesos deveriam ser ponderados ou, até mesmo, eliminados da fórmula. Um exemplo prático disso se dá para a indústria de cal e calcário, onde as cinzas são eliminadas junto com o calcário, ou seja, a variável cinza poderia ser eliminada da fórmula, já que a sua manutenção pode reduzir significativamente o IQC de uma biomassa, quando isto não interfere no uso.

O IQC também pode ser calculado com outros parâmetros de interesse como, emissão de gases de efeito estufa (CO_2 , N_2O e CH_4) materiais particulados, entre outros.

Resultados

Ao comparar a produção de energia dos briquetes/pellets produzidos com proporções diferentes de sorgo-biomassa e serragem, observou-se aumento significativo do PCS naqueles com adição de serragem superior a 20%, sendo estes equivalentes ao PCS da serragem

pura ($p_{\text{Tukey}} < 0,05$) (Figura 8). Este resultado indica a viabilidade de substituição de até 80% do eucalipto por sorgo-biomassa, numa queima com a manutenção do mesmo conteúdo de energia por tonelada que a biomassa tradicional (madeira).

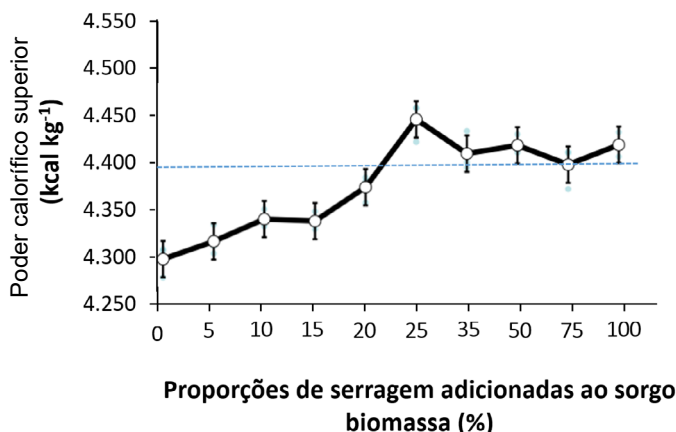


Figura 8. Poder calorífico superior de briquetes/pellets produzidos com serragem adicionada ao sorgo-biomassa nas proporções de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 75 e 100%. Os círculos brancos são as médias dos PCS, as barras são o intervalo de confiança da média ($p_{\text{Tukey}} < 0,05$), e os pontos azuis os PCS mensurados para cada repetição.

A adição de serragem ao sorgo-biomassa aumenta o PCS do briquete/pellet, não somente pelo poder calorífico maior da serragem, mas também pelo maior conteúdo de cinzas do sorgo-biomassa (igual a 3,92%) comparado ao da serragem (1,27%), visto que as cinzas não participam do processo de geração de energia, sendo somente resíduos deste processo, mas é contabilizada na massa do combustível submetido à queima (Brand, 2010).

Países europeus, grandes consumidores de biomassa densificada, principalmente na forma de pellets, criaram um padrão de qualidade

para pellets de madeira com diferentes classificações (ENplus-A1, ENplus-A2 e EN-B) em que o PCS deve ser $\geq 3.941 \text{ kcal kg}^{-1}$ (European Committee for Standardization, 2011; International Organization for Standard, 2021; ENplus, 2024). Assim, no quesito PCS, os briquetes/pellets 100% de sorgo-biomassa atendem os padrões internacionais com PCS médio de $4.303 \text{ kcal kg}^{-1}$, superior ao mínimo exigido.

As mesmas normas estabelecem o teor de cinzas $\leq 1\%$ para as classificações ENplus-A1 e ENplus-A2; e $\leq 3\%$ para EN-B. A adição de até 25% de serragem ao sorgo-biomassa diminui $\sim 12\%$ das cinzas, mas ainda mantém seu teor em 3,24%, acima dos 3% recomendados. Somente a partir da adição de 34% de serragem (calculado pela equação da Figura 9) é que o teor de cinzas da mescla fica abaixo do recomendado.

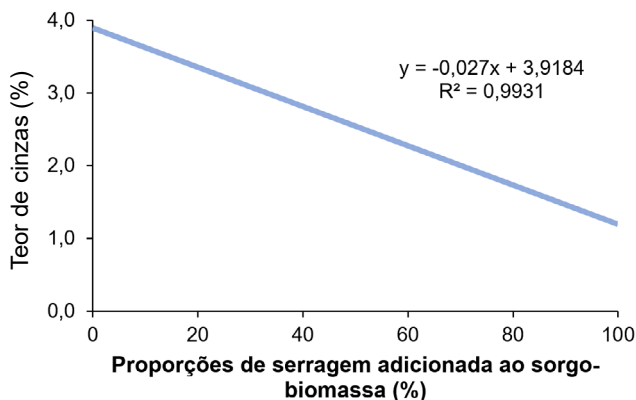


Figura 9. Linha de tendência do teor de cinzas de briquetes/pellets produzidos com serragem adicionada ao sorgo-biomassa nas proporções de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 75 e 100%.

Em resumo, pelo que já se foi discutido, é evidente a viabilidade de substituição de até 66% do eucalipto por sorgo-biomassa numa queima, com a manutenção do mesmo conteúdo de energia que a biomassa tradicional (100% madeira) e manutenção do teor de cinzas abaixo de 3%, garantindo padrões de qualidade.

Vale ressaltar que nem a serragem atendeu aos padrões ENplus-A1, ENplus-A2, com média igual a 1,27%. Isso ocorreu provavelmente em função da serragem estudada conter também a casca da árvore, que possui maior teor de cinzas (~3,5%) que a madeira sem casca (~0,4%) (Brito; Barrichelo, 1978).

Como dito anteriormente, o menor teor de cinzas é desejável tendo em vista a diminuição de paradas do processo de queima para limpeza, manutenção e disposição final. A disposição final das cinzas deve ser tratada com atenção, pois, apesar de poder ser usada como corretivo do solo e fonte de nutrientes prontamente disponíveis às plantas, há limites para esta prática, uma vez que, em grande quantidade, a cinza pode alterar os agregados do solo, deixando-o suscetível à erosão e, ainda, podendo causar a sua salinização (Guillemin, 2010; Szostek et al., 2023).

Logo, o desafio é usar as cinzas no solo de forma racional e economicamente viável. A disposição final em aterros sanitários também é onerosa. Sendo assim, o que normalmente ocorre é a sua doação para empresas de fertilizantes, entre outras que fazem a retirada deste material.

Ainda, é importante tratar os processos de queima de biomassa nas indústrias de forma individualizada, tendo em vista diferenças nos tipos de fornos e finalidades de uso do calor. Por exemplo, a queima para geração de vapor em caldeiras é sensível ao teor de cinzas, pois, apesar das elevadas temperaturas de fusão das cinzas, elas tendem a derreter nas partes mais quentes da câmara de combustão, solidificando quando saem dessas áreas para as mais frias.

Essa cinza sólida, chamada de “escória”, pode criar diversos problemas, inclusive afetando o processo de combustão reduzindo a eficiência de transferência de calor, bloqueando o equipamento por incrustação e aumentando os custos de manutenção por desgaste, não sendo só uma questão de parada do processo para limpezas (Vassilev et al., 2012). O mesmo acontece com fornos em bateladas, como os frequentemente usados em granjas.

Para processos de queima como os da indústria de calcário, as cinzas podem ser carregadas com o produto final, sem causar prejuízos à qualidade do calcário e ao forno, não sendo um problema a ser considerado.

Na queima industrial, não necessariamente precisam ser utilizados briquetes/pellets mistos. O forno poderá ser alimentado separadamente com a biomassa tradicional (cavaco) e sorgo-biomassa densificado (briquete/pellet) na proporção de interesse, de maneira a facilitar o processo.

Este cenário foi ilustrado na Figura 10, na qual são apresentados os índices de qualidade dos combustíveis (IQC), para o cavaco (umidade média de 40%), o sorgo-biomassa densificado (So) e proporções de serragem acrescidas ao sorgo-biomassa densificado (SoSe) e a serragem densificada (Se), esses com umidade média de 10%. Fica evidente que o cavaco apresenta menor qualidade em comparação ao demais, em função da menor densidade e, principalmente, da maior umidade.

Estes resultados são importantes para indicar a melhor proporção entre sorgo-biomassa densificado e cavaco nos futuros testes de queima em escala industrial. A partir dessa indicação, cabe cada indústria adequar a melhor proporção a ser utilizada no seu processo de queima, isso em função dos diferentes fornos e finalidade do uso da energia.

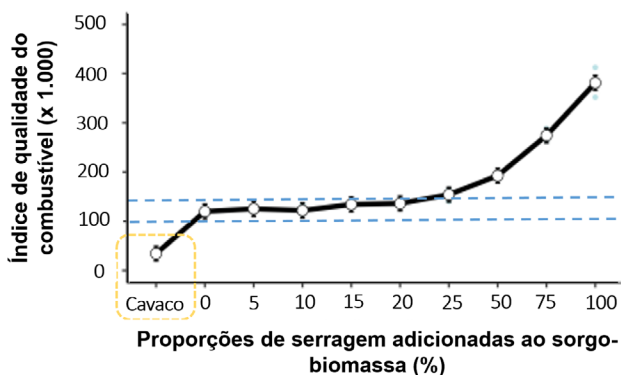


Figura 10. Índice de qualidade do combustível (IQC) x 1.000 para cavaco de madeira, briquetes/pellets produzidos com sorgo-biomassa puro (0%) e com serragem adicionadas ao sorgo-biomassa nas proporções de 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 75% e serragem pura (100%). Os círculos brancos são as médias dos IQCs, as barras são o intervalo de confiança da média ($p_{\text{Tukey}} < 0,05$), e os pontos azuis os IQCs mensurados para cada repetição.

Considerações finais

O sorgo-biomassa como substituto da madeira deve ser considerado no cenário atual como um aliado à segurança energética brasileira, principalmente, voltado à indústria que vem sentindo, em várias regiões do País, o impacto da oferta e demanda desequilibradas da biomassa florestal.

O sorgo-biomassa, além de ter alta produtividade num curto ciclo entre o plantio e a colheita (< 180 dias), também possui características desejáveis para a queima, sendo uma boa alternativa à biomassa florestal em épocas de escassez. Além de ser tolerante à seca, também é uma gramínea passível de plantios em solos rasos, permitindo sua utilização em regiões brasileiras inaptas ao plantio de florestas energéticas, por motivos físico-químicos do solo ou climáticos.

Vale ressaltar que o uso do sorgo-biomassa para geração de energia, por meio da queima, pode ser otimizado se misturado com a biomassa florestal. Para tanto, indica-se como ponto de partida para testes em escala industrial a possibilidade de substituição de até 66% da biomassa florestal (eucalipto) por sorgo-biomassa densificado, numa queima (uso de mescla de 66% sorgo-biomassa densificado + 34% eucalipto). Os dados experimentais mostraram que esta proporção conferirá o mesmo conteúdo de energia que a queima da biomassa tradicional (100% madeira) com manutenção de cinzas abaixo de 3%, garantindo padrões de qualidade. Cabe a cada indústria ajustar as proporções de sorgo-biomassa e madeira que atendam sua demanda energética e de resíduos.

Ainda, é importante ressaltar que o sorgo-biomassa tem apenas 14 anos de pesquisa e desenvolvimento e que, assim como o eucalipto no Brasil, que na década de 1970 apresentava produção média anual de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e hoje produz $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Indústria Brasileira de Árvores, 2022), ao longo dos próximos anos, com a manutenção de investimentos em pesquisa, o sorgo-biomassa tem muito para avançar.

Há também que se ponderar os avanços tecnológicos de processamento do sorgo-biomassa para queima, atrelados à secagem e densificação ainda no campo, logo após a colheita (antes do transporte para indústria), que tornarão esta biomassa ainda mais atrativa.

Ressalta-se que esse processo já existe, entretanto, voltado para a produção de pellets para ração animal. Neste sentido, vale uma ação de fomento para adequar esta tecnologia para a produção de pellets para energia e trazê-la para o Brasil.

A implementação da bioenergia advinda da biomassa, tradicional ou alternativa, depende do conjunto de tecnologias utilizadas na sua produção no campo (localização, escalas e velocidade de implementação) até o processo de queima, mas depende também de políticas públicas, modelos e práticas de negócios adotados pelas empresas consumidoras junto aos produtores de biomassas.

Portanto, importância deve ser dada às políticas públicas voltadas para a organização do comércio de biomassa para energia, por meio de modelos de negócios pré-estabelecidos, que assegurem o preço e mercado ao produtor, para que não ocorra com o sorgo-biomassa e tão pouco ocorra novamente com o eucalipto, cenários como aqueles já vistos anteriormente, com grande volatilidade de preços estabelecidos pela alta da oferta, frustrando os produtores que deixaram de plantar e que, hoje, causam a falta de biomassa e prejuízos para a indústria.

Referências

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D5868 2013**: standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken, 2013.

AROLA, R. A. **Wood fuels**: how do they stack up? Georgia: Forest Products Research Society, 1976. 12 p.

BATISTA, V. A. P. **Avaliação bioenergética de sorgos biomassa, sacarino e forrageiro**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/9283/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021

BENJAMIN, D.; POR, H.-H.; DUDESCU, D. Climate change versus global warming: who is susceptible to the framing of climate change? **Environment and Behaviour**, v. 49, n. 7, 2017. DOI: <https://doi-org.ez103.periodicos.capes.gov.br/10.1177/0013916516664382>.

BOOTH, M. S. Not carbon neutral: assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, 2018.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n.16, p. 63-70, 1978. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2024.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o Desenvolvimento: Política, Ambiente, Tecnologia e Mercado: anais**. São Paulo: SBS; [S.l.]: SBEF, 1993. v. 3, p. 280-282.

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

BROECKER, W. S. Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming? **Science**, v. 189, p. 460-463, 1975. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.460>.

CORRADI, G. M. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no Oeste Paranaense**. 2021. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

COSTA, G. H. G.; CIARAMELLO, S. ALCANTARA, G. U. Sorgo-biomassa e Eucalipto de 2 anos como biomassas para bioenergia. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 15., 2018, Poços de Caldas, MG. **Anais [...]**. Poços de Calda: Instituto Federal de Educação de

Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://www.meioambientepocos.com.br/Anais2018/Energias%20Renov%C3%A1veis/267.%20SORGO%20BIOMASSA%20E%20EUCALIPTO%20DE%2020ANOS%20COMO%20BIOMASSAS%20PARA%20BIOENERGIA.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 13). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>. Acesso em: 2 maio 2024.

EMBRAPA. **Zarc**: plantio certo. App. Disponível em: https://play.google.com/store/apps/details?id=embrapa.br.zonamento&hl=pt_BR&pli=1. Acesso em: 27 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 27 fev. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético interativo**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>. Acesso em: 15 maio 2024.

ENPLUS. **A quality scheme**. Disponível em: <https://pelletenplus.es/en-in/about-us-en-in/a-quality-scheme.html>. Acesso em: 27 mar. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (United States). **Emission factors for greenhouse gas inventories**. 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>. Acesso em: 27 fev. 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14961-2:2012**: solid biofuels: fuel specification and classes. Part 2: wood pellets for non-industrial use. Brussels, 2011.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. 14 p. (Série técnica).

FOELKEL, C. **Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, valor e eletricidade**: parte 2: geração de calor, vapor e eletricidade. 2016. E-book. Disponível em: http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44_Geracao_Calor_Vapor_Eletricidade.pdf. Acesso em: 27 mar. 2024.

FS BIOENERGIA. **Fomento florestal**: venha ser parceiro florestal da FS. [S. l.: FS Bioenergia, 2021?]. 1 folder. <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/34aeeec8a-d08e-440f-ad7f-324e1e1e7745/5172ac33-7807-ec38-1444-46d980913f7f?origin=2>.

GUILLEMIN, C. **Wood ashes change soil chemistry**. Contra Costa County: University of California, 2010. Disponível em: <https://ucanr.edu/sites/ccmg/files/103005.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2024.

IBGE. **PEVS**: Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura: Tabela 4: Quantidade produzida e valor da produção do Brasil, das Grandes Regiões e das Unidades da Federação, segundo os produtos da silvicultura. Rio de Janeiro, 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>. Acesso em: 27 mar. 2024.

IBGE. **PEVS**: Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura: Tabela 1: Quantidade produzida e valor da produção do Brasil, das Grandes Regiões e das Unidades da Federação, segundo os produtos da silvicultura. Rio de Janeiro, 2022b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>. Acesso em: 14 mai. 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2024.

INFORMATIVO SETOR FLORESTAL. São Paulo: CEPEA, n. 178, 2016. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/upload/revista/pdf/0623072001483638579.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. **ISO 17225-2**: solid biofuels: fuel specifications and classes. Part 2: g rated wood pellets 2. ed. Vernier, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Massive expansion of renewable power opens door to achieving global tripling goal set at COP28.** 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/news/massive-expansion-of-renewable-power-opens-door-to-achieving-global-tripling-goal-set-at-cop28>. Acesso em: 26 mar. 2024.

JAMOVI. **Open Statistical Software for the Desktop and Cloud.** 2023. Disponível online: <https://www.jamovi.org/>. Acesso em: 6 jul. 2023.

LIMA, E. A. de; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 3 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 220). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPQ-2009-09/44878/1/com_tec220.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

MANTOVANI, E. C.; SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. da C.; OLIVEIRA, A. C. de; PIMENTEL, M. A. G. **Alternativas preliminares de processamento do sorgo-biomassa , visando a redução do teor de umidade da massa colhida para obtenção da maior eficiência energética.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 30 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 195). ODS 7. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214396/1/Bol-195.pdf>. Acessado em 26 Jan. 2024.

MELODIA, L.; KARLSSON, K. **Energy price stability:** the peril of fossil fuels and the promise of renewables. New York: Roosevelt Institute, 2022. (All Economic Policy is Climate Policy series). Disponível em: https://rooseveltinstitute.org/wp-content/uploads/2022/05/RI_EnergyPriceStability_IssueBrief_202205.pdf. Acesso em: 26 mar. 2024.

MORALES, M. M.; TARDIN, F. D.; BEHLING, M.; ABREU, D. C.; MARTINS, A. R. R.; ANDRÉ, V. L. S.; PORTO, F. L. Eucalipto e sorgo-biomassa para geração de energia em Mato Grosso. In: ABREU, D. C. de; DIAS, M. P. de L.; BOSCOLI, D. Z.; SILVA, W. M. da; ALBERTO, F. de P.; MARTINS, A. R. R.; PINHEIRO, D. T. (ed.). **3ª Vitrine tecnológica agrícola:** atualidades na cultura do milho em sistema soja e milho-safrinha. Cuiabá, MT: Uniselva, 2022. p. 121-144.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A. de; GOULART, I. C. G. dos R. **Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha**. Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 5 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 293). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65182/1/CT293.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2024.

OZAKI, P. M. **Clusters de etanol de milho**. Disponível em: <https://appssenarmt.org.br/portal/arquivos/12092017054227.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. **Preços de produtos florestais**. Curitiba, 2023. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Precos-de-Produtos-Florestais>. Acesso em: 27 mar. 2024.

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**, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.

PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of Indian Mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, 4, n. 2-3, p. 177-182, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1080/01435698.1987.9752821>.

QUIRINO, W. F. Poder calorífico da madeira e materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p.100-106, 2005.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, p. 173-182, 2004.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 39, p. 397-400, 1999.

SHARMA, S.; SHARMA, M.; MUDGAL, D.; BHOWMICK, H. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers. **Corrosion Reviews**, v. 39, n. 5, p. 387-408, 2021.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879>.

SZOSTEK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; JANCZAK-PIENIAZEK, M.; ILEK, A. Short-term effect of fly ash from biomass combustion on spring rape plants growth, nutrient, and trace elements accumulation, and soil properties. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 1, 2023.

VAN FAN, Y.; KLEMES, J. J.; KO, C. H. Bioenergy carbon emissions footprint considering the biogenic carbon and secondary effects. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 1, p. 283-296, 2021.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G.; MORGAN, T. J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, v. 94, n. 1, p. 1-33, 2012.

