

THAÍS PATRÍCIA MOREIRA TEIXEIRA

**ESTUDO DA MATURAÇÃO E PONTO DE COLHEITA EM MATERIAIS  
DE SORGO DESTINADOS À BIOENERGIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T266e  
2017  
Teixeira, Thaís Patrícia Moreira, 1990-  
Estudo da maturação e ponto de colheita em materiais de  
sorgo destinados à bioenergia / Thaís Patrícia Moreira Teixeira.  
– Viçosa, MG, 2017.  
x,73f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. *Sorghum bicolor*. 2. Sorgo. 3. Biomassa. I. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de  
Pós-graduação em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22 ed. 633.62

THAÍS PATRÍCIA MOREIRA TEIXEIRA

**ESTUDO DA MATURAÇÃO E PONTO DE COLHEITA EM MATERIAIS DE  
SORGO DESTINADOS À BIOENERGIA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 de agosto de 2017.

  
Sebastián Giraldo Montoya

  
Rafael Augusto da Costa Parrella  
(Coorientador)

  
Kacilda Naomi Kuki

  
Leonardo Duarte Pimentel  
(Orientador)

*A Deus,  
À Maria,  
Aos meus pais e irmãs,  
À “vó Maria”.*

***Dedico.***

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pelo sustento e incontáveis graças recebidas. Obrigada por tudo, no significado denotativo mais completo da palavra.

À Maria, pela intercessão constante, pela ternura e por ser a presença que acalma. “*Totus Tuus*”.

Aos meus pais, Maria da Conceição e José Zacarias, pelo amor e apoio incomensuráveis. Obrigada pela educação e por não medirem esforços para que eu concretizasse meus sonhos (e como sonho, não é?! E ainda há muitos!).

Às minhas irmãs, Kelly e Magda, pelo carinho e incentivo. Obrigada pelos “puxões de orelha”, pela solidariedade e pelas inúmeras qualidades que me fizeram/fazem pensar “quero ser assim quando crescer”. Obrigada ao meu cunhado-irmão Fábio, por todo zelo e compreensão. Obrigada por me motivar até mesmo nos sonhos mais desafiadores.

À vó Maria, pelas orações e ensinamentos. Obrigada por compartilhar com doçura sua experiência, sempre reforçando que tudo é possível quando temos fé.

Ao Matheus, pela paciência (muita), carinho, respeito e companheirismo. Obrigada pelo empenho em me alegrar principalmente quando os contratempos pareciam “infinitos”.

Às famílias Moreira e Teixeira que, mesmo de longe, fizeram-se presentes por meio de ligações, mensagens e recados, trazendo sorrisos e amor.

À “Rep. 1001” e aos velhos e novos amigos pelos momentos alegres ao longo desta etapa.

Ao professor Leonardo Pimentel, pelos ensinamentos, motivação e por me mostrar que é possível e vale a pena “fazer a diferença”. Obrigada por ser exemplo de um profissional brilhante e humilde. Obrigada por me ensinar, de fato, o que é ciência e as grandes contribuições que podemos trazer por meio dela.

Ao professor Luiz Antônio pela disponibilidade e ajuda, principalmente, com as análises estatísticas. Obrigada pelo constante incentivo e palavras de apoio.

Ao professor Reinaldo Teófilo e à Jussara Roque pela ajuda e orientação na condução das análises.

Aos queridos colegas do Grupo Sorgo-UFV, sem os quais este trabalho não teria sido possível. Obrigada pela ajuda na condução e avaliação dos experimentos

(fizesse sol ou chuva, fosse segunda ou domingo). Obrigada pelas sugestões e, sobretudo, pelo companheirismo e momentos de alegria. Angélica, Elisângela, Evandro, Francisco, Jadson, José Roberto, Juan, Lindemberg, Mateus Queiroz, Matheus Pereira, Melina, Otto, Paulo, Thiago's e Vanessa, obrigada.

Aos amigos do Ministério das Universidades Renovadas (MUR) pelo companheirismo, partilhas, orações e amparo. Obrigada por me mostrarem a grande alegria em servir a Deus e levar seus ensinamentos ao outro. Nós temos um sonho!

À toda equipe do Vale do Agronomia da UFV. Obrigada pela ajuda do plantio à colheita, pelos momentos de descontração que renderam boas risadas e pela disponibilidade em me ajudar (mesmo nos trabalhos mais “árduos”).

À professora Angélica Cássia Carneiro pela ajuda e importantes sugestões ao trabalho e à Fernanda Jorge pela solicitude e auxílio com as análises de poder calorífico.

Ao Rafael Parrella pelas sugestões e contribuições com os materiais a serem estudados.

Ao Centro de Pesquisa e Melhoramento da Cana-de-Açúcar (CECA) e aos funcionários pela ajuda nas avaliações.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Fitotecnia pela estrutura e oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

Muito obrigada!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1- Biomassa Energética .....	3
2.1.1- Características Interessantes de Biomassa para Bioenergia: Poder Calorífico Superior, Poder Calorífico Inferior e Energia Potencial da Biomassa.	4
2.2- Setor Sucreenergético .....	5
2.3- A Cultura do Sorgo .....	6
<b>3. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO I: DEFINIÇÃO DO PONTO DE COLHEITA EM SORGO SACARINO: NOVA ABORDAGEM PARA AMOSTRAGEM E TOMADA DE DECISÃO NAS UNIDADES INDUSTRIAIS .....</b>	<b>15</b>
RESUMO .....	15
ABSTRACT .....	17
1. INTRODUÇÃO .....	19
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
2.1- Local e condições climáticas.....	22
2.2- Delineamento experimental .....	23
2.3- Implantação e manejo da cultura.....	23
2.4- Características avaliadas .....	24
2.5- Análise estatística.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
3.1- Descrição fenológica da cultura .....	28
3.2- Evolução da maturação da cultura .....	33
3.3- Análise do Brix dos entrenós versus o Brix do colmo inteiro para validar estratégias de amostragem e subsidiar tomada de decisão para colheita.....	40
4. CONCLUSÕES .....	44
5. REFERÊNCIAS .....	45
<b>CAPÍTULO II: CARACTERIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE SORGO BIOMASSA VISANDO A DEFINIÇÃO DO PONTO DE COLHEITA .....</b>	<b>47</b>
RESUMO .....	47

ABSTRACT .....	49
1. INTRODUÇÃO .....	51
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	53
2.1- Local e condições climáticas .....	53
2.2- Delineamento experimental .....	54
2.3- Implantação e manejo da cultura .....	54
2.4- Características avaliadas .....	55
2.5- Análise estatística .....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
3.1- Descrição fenológica da cultura .....	58
3.2- Caracterização do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e energia potencial (EP) da biomassa .....	63
4. CONCLUSÕES .....	69
5. REFERÊNCIAS .....	70
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>

## RESUMO

TEIXEIRA, Thaís Patrícia Moreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2017. **Estudo da maturação e ponto de colheita em materiais de sorgo destinados à bioenergia.** Orientador: Leonardo Duarte Pimentel. Coorientadores: Luiz Antônio dos Santos Dias e Rafael Augusto da Costa Parrella.

Apesar do notório desenvolvimento do setor sucroenergético brasileiro, observa-se a ociosidade das usinas na entressafra da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) devido à falta de matéria-prima para o processamento. Neste contexto, os sorgos sacarino e biomassa [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] têm sido apontados como alternativas promissoras. O sorgo sacarino destaca-se pelos colmos suculentos ricos em açúcares diretamente fermentáveis e, o sorgo biomassa, destaca-se pela elevada produção de biomassa com altos teores de lignina. Contudo, os rendimentos de etanol do sorgo sacarino têm sido abaixo do esperado e atribui-se tal fato à definição incorreta da época de colheita. Ressalta-se que o acúmulo de açúcares no colmo ocorre principalmente a partir do florescimento, o que desencadeia a competição entre colmo e grãos (drenos preferenciais) pelos fotoassimilados. Para o sorgo biomassa, é desejável que a umidade da biomassa seja próxima a 50% quando levada à caldeira. Porém, não existem estudos que caracterizem o acúmulo de matéria seca *versus* a desidratação da planta. Acredita-se que, caso a planta de sorgo seja mantida à campo, além de certo estágio, para favorecer a desidratação natural, ocorrerá o consumo de matéria seca devido à redução da fotossíntese líquida decorrente do processo de senescência. Neste sentido, realizou-se um trabalho inovador e detalhado para caracterização de materiais de sorgo bioenergia visando o aproveitamento de seus potenciais produtivos. Desenvolveram-se dois experimentos independentes, cuja descrição é apresentada em dois capítulos. No primeiro capítulo, aborda-se o estudo relativo ao sorgo sacarino (cultivar BRS 511), em que se objetivou determinar o ponto de colheita do sorgo sacarino e identificar qual entrenó ou segmento de entrenós são representativos do Brix total do colmo, para auxiliar na tomada de decisão quanto à colheita. Os tratamentos constituíram-se nas diferentes épocas de amostragem da cultura conforme seu estágio fenológico, sendo os estádios de emborrachamento, florescimento, grão leitoso, grão pastoso, grão farináceo, grão duro e senescência. Quantificou-se as produtividades de massa fresca e seca e a umidade. Avaliou-se o Brix e fez-se a quantificação dos açúcares presentes no caldo. As máximas produtividades de massa fresca e seca foram

registradas no estágio de grão farináceo, sendo de 124 t ha<sup>-1</sup> e 33 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O maior Brix do caldo do colmo foi registrado entre os estádios de grão pastoso e grão farináceo, com 15 °Brix. Considerando-se os estádios correspondentes à previsão de colheita (grão pastoso ao grão duro), o Brix dos entrenós 2 e 3 não diferiram significativamente do Brix real. Conclui-se que o ponto ideal de colheita para sorgo sacarino (BRS 511) é compreendido entre os estádios de grão pastoso ao duro e os entrenós 2 e 3 devem ser a seção amostrada para avaliação do Brix. No capítulo 2, apresenta-se o estudo relativo ao sorgo biomassa, cujo objetivo foi caracterizar o comportamento da biomassa, umidade e poder calorífico superior ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento do sorgo biomassa (híbrido BRS 716), visando à definição do ponto ideal de colheita. As condições experimentais (tratamentos e variáveis analisadas) foram similares às previamente descritas para o sorgo sacarino. Adicionalmente, realizou-se a análise de poder calorífico superior (PCS) e energia potencial da biomassa, ao invés da análise de Brix e açúcares realizadas no experimento anterior. A produtividade de massa seca total (PMS) aumentou a partir dos estádios iniciais e atingiu o máximo de 75,5 t ha<sup>-1</sup> no estágio de grão farináceo, coincidindo com a menor umidade registrada e com o maior PCS. Considerando-se a PMS, umidade e o PCS, infere-se que o estágio de grão farináceo corresponde ao ponto ideal de colheita para o sorgo biomassa BRS 716. O período de colheita poderia ser escalonado entre os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, ocorrendo ligeira redução na PMS e no PCS, permanecendo a umidade inalterada.

## ABSTRACT

TEIXEIRA, Thaís Patrícia Moreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2017. **Maturation and harvest time study of sorghum materials designated to bioenergy.** Advisor: Leonardo Duarte Pimentel. Co-advisors: Luiz Antônio dos Santos Dias and Rafael Augusto da Costa Parrella.

Despite the notorious Brazilian sugarcane chain development, industrial units have been idle during the sugarcane (*Saccharum* spp.) off-season due to the lack of raw material for milling. In this context, sweet and biomass sorghums [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] have been considered as a promising alternative. Sweet sorghum stands out due to its juicy stems with high fermentable sugars concentration, and biomass sorghum stands out and because of its high biomass production, which exhibits large amount of lignin. However, sweet sorghum ethanol yields have been lower than expected by sugarcane industries, what can be attributed to the incorrect determination of the ideal harvest time. It is worth noting that the stem sugar accumulation occurs, mainly, after the plant flowering, what unleashes the competition between stem and grains (preferential sinks) for photosynthates. For biomass sorghum, it is desirable a biomass humidity close to 50% when it is taken to the boiler. However, there are not researches that characterize dry matter accumulation *versus* plant dehydration. It is assumed that if the plant remains at the field, after certain time, intending to favor the natural dehydration, it can result in dry matter consumption because of net photosynthesis decrease due to senescence process. In this regard, it was carried out an innovative and detailed work to characterize bioenergy sorghum materials aiming to harness their productive potential. It was developed two independent experiments, whose description is presented in two chapters. In the first chapter, it is studied the sweet sorghum (cultivar BRS 511), aiming to determine the ideal harvest time for sweet sorghum and identify which internode or segment of internodes better represents Brix of the stem juice. The treatments consisted in the sweet sorghum phenological stages, which were pre-flowering, flowering, milk dough, soft dough, mealy dough, hard dough and senescence. Were evaluated fresh (FBY) and dry biomass (DBY) yields and humidity. Brix was evaluated and sugar content in the stem juice was quantified. The greater fresh and dry matter yields were recorded in the mealy dough stage, which were 124 t ha<sup>-1</sup> e 33 t ha<sup>-1</sup>, respectively. The highest Brix of stem juice was registered between the soft and mealy dough stages, with 15 °Brix. Analyzing

only the soft, mealy and hard dough stages (harvest prediction), Brix of the internodes 2 and 3 had not significantly differed from the stem real Brix. The sweet sorghum BRS 511 harvest time is comprehended between the soft to hard dough stages and the in field-Brix sampling should be done at the internodes 2 and 3. In the chapter 2, it is presented a study related to biomass sorghum, which intended to characterize biomass, humidity, higher heating value and potential biomass energy during the growing and developing cycles of biomass sorghum (hybrid BRS 716). The aim was to define the ideal harvest time that maximizes the industrial yield at the bioelectricity cogeneration. The experimental conditions (treatments and analyzed variables) were similar to the ones described for sweet sorghum. Additionally, higher heating value (HHV) and potential biomass energy were quantified instead of Brix and sugar analysis. Dry biomass yield (DBY) had increased from the early stages, reaching the maximum of  $75.5 \text{ t ha}^{-1}$  at the mealy dough stage, coinciding with the lowest humidity content (67%) and the higher heating value. After the mealy dough stage, dry matter had decreased. Considering the DBY, HHV and humidity, it is inferred that mealy dough stage corresponds to the ideal harvest time for biomass sorghum BRS 716. The harvest gap could be staggered between the soft dough, mealy dough and hard dough stages, leading to slightly decreases in the DBY and HHV, with no changes in humidity percentage.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente observa-se o crescente incentivo ao uso de fontes de energia mais limpas para o suprimento da demanda energética mundial. De acordo com o Conselho Mundial de Energia (2017), as energias renováveis são áreas chave com potencial para ditar o ritmo e a escala da transição de energia.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira corresponde à cerca de 44% do total ofertado. Deste total, a biomassa é responsável por 9%, tendo a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) a participação mais expressiva (41%), sob a forma de etanol e bioeletricidade.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, etanol de cana e açúcar (Conab, 2017) posição que reflete o desenvolvimento e importância do setor sucroenergético do país. Entretanto, no período de entressafra da cana, depara-se com o problema de escassez de matéria-prima para moagem e, neste contexto, o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma alternativa promissora.

O sorgo é uma cultura C4, com maior tolerância ao déficit hídrico e menor custo de produção em comparação a outras culturas anuais, tais como o milho e soja. Dentre os tipos de sorgo existentes, ressalta-se os materiais de sorgo bioenergia, os sorgos sacarino e biomassa, cujas características viabilizam seu uso nas usinas sucroenergéticas. O sorgo sacarino apresenta um ciclo de cerca de 115 dias e possui colmos suculentos contendo açúcares diretamente fermentáveis, o que possibilita a produção de etanol (Parrella et al., 2014). Salienta-se que a mesma estrutura utilizada para a produção canavieira pode ser utilizada para o sorgo sacarino sem requerer modificações adicionais. O sorgo biomassa apresenta elevada produtividade de massa seca, com colmos fibrosos e ricos em lignina, o que confere elevado poder calorífico à biomassa viabilizando seu uso nas caldeiras para cogeração de energia (May et al., 2013). Logo, os sorgos sacarino e biomassa são alternativas complementares às usinas sucroenergéticas na entressafra da cana, permitindo seu funcionamento em períodos marcados pela ociosidade do parque produtivo já instalado.

Entretanto, o uso dos materiais de sorgo bioenergia ainda não está consolidado no mercado. Tal fato é reflexo de uma conjuntura de fatores nos âmbitos político-econômico, tecnológico e principalmente fitotécnico.

Segundo Freitas (2017), a conjuntura política e econômica do país criou um cenário de insegurança aos investimentos por parte das usinas, resultando em suspensão de grande parte das atividades de pesquisa e desenvolvimento, prejudicando indiretamente a cadeia produtiva do sorgo. A crise do setor canavieiro, partir de 2008, foi um dos fatores que comprometeu a expansão uso do sorgo sacarino para geração de etanol. Por outro lado, a crise energética favoreceu a expansão do sorgo biomassa. Com o preço da energia chegando a R\$200 mW/h para energia contratada e acima de R\$600 no mercado spot (Franco, 2014), o sorgo foi uma alternativa às usinas para cogeração de energia.

Apesar das potencialidades do sorgo, poucas informações técnico-científicas estão disponíveis sobre a cultura em diversas áreas, incluindo as questões relativas ao manejo (Albuquerque et al., 2011). A falta de conhecimento conciso sobre o cultivo do sorgo (adubação, espaçamento, época de colheita, etc), repercute na baixa produtividade da cultura, sendo este um dos principais entraves para a adoção dos materiais de sorgo bioenergia.

Tem-se registrado, para sorgo sacarino, rendimentos de etanol inferiores ao esperado, o que pode ser atribuído, dentre outras questões (problemas fitotécnicos, condições edafoclimáticas, baixo rendimento de colmos, etc.) à imprecisão do ponto de colheita. Quanto ao sorgo biomassa, é desejável que a umidade da biomassa seja em torno de 50% visando maior rendimento energético da biomassa nas caldeiras. Entretanto, não há na literatura estudos que caracterizem o ganho de massa seca e da umidade ao longo do ciclo da cultura, que possibilitem a tomada de decisão quanto ao ponto ideal de colheita.

Neste sentido, objetivou-se no presente trabalho caracterizar o processo de desenvolvimento e determinar o ponto ideal de colheita dos sorgos sacarino e biomassa visando maximizar o aproveitamento industrial para a produção de etanol e bioeletricidade, respectivamente.

Este é um estudo inovador e acredita-se que os resultados obtidos contribuirão para a melhor consolidação dos sorgos sacarino e biomassa no setor agroenergético.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1- Biomassa Energética

De acordo com o Conselho Mundial de Energia (2016), atualmente a biomassa é a maior fonte de energia renovável, correspondendo a 14% do percentual de 18% representado pelas fontes renováveis na matriz energética mundial.

É considerada um dos principais recursos energéticos renováveis devido ao seu grande potencial energético, viabilidade econômica e benefícios socioambientais (Johansson et al., 1992). Segundo Hall (1997), a utilização da biomassa como fonte energética é imprescindível para o desenvolvimento sustentável tanto nos países em desenvolvimento quanto nos países industrializados. Vale et al. (2002) afirmam que a biomassa tem se destacado entre as alternativas estudadas para suprir a demanda energética, despertando o maior interesse entre os combustíveis renováveis.

Biomassa é toda a massa de matéria viva, animal ou vegetal, que vive em equilíbrio numa determinada área da superfície terrestre. Do ponto de vista da produção de energia é toda a massa orgânica que pode ser usada como combustível ou para a sua produção. Apesar dos combustíveis fósseis como o petróleo, carvão ou gás natural também derivarem de matéria orgânica, eles requerem milhares de anos para serem gerados. Logo, por não serem renováveis a curto prazo, eles não são considerados como biomassa (Nogueira e Rendeiro, 2008 *apud* Eckert, 2013).

A biomassa pode ser classificada em dois grandes grupos: (1) biomassa tradicional, composta essencialmente pela lenha e resíduos naturais e (2) biomassa moderna, produzida a partir de processos tecnológicos avançados e eficientes, tais como biocombustíveis líquidos, briquetes e pellets, cogeração (bagaço de cana) e os cultivos dedicados de espécies como o das florestas plantadas e o da cana-de-açúcar (Marafon et al., 2016).

Hall (1997) afirma que, de maneira equivocada, a biomassa é geralmente considerada como um combustível de pouca importância quando, na verdade, deveria ser mais valorizada dada sua expressiva complementariedade aos combustíveis fósseis. A versatilidade é uma de suas características marcantes dada a variedade de combustíveis que podem ser produzidos a partir dela. O aproveitamento da biomassa para geração de energia pode ser feito por meio de combustão direta, cogeração (produção combinada de energia térmica e mecânica), processos termoquímicos

específicos (gaseificação, hidrólise, pirólise, craqueamento, liquefação e transesterificação) e/ou processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (Marafon et al., 2016).

No Brasil, as biomassas mais usadas são a cana-de-açúcar e lenha. Segundo a Resenha Energética Brasileira (MME, 2016), em 2015 a oferta de energia interna no Brasil teve participação de 41,2% das fontes renováveis. Deste percentual, 41,1% correspondeu à contribuição da cana-de-açúcar, sob a forma de etanol ou bagaço. A produção de energia a partir da cana representa cerca de 80% das usinas termelétricas à biomassa, tanto em termos do número de usinas quanto à potência instalada (Funchal, 2015). Estima-se que a produção de etanol (anidro e hidratado) será na ordem de 26,45 bilhões de litros para a safra 2017/2018 (Conab, 2017), ratificando-se a importância da cana-de-açúcar como biomassa energética.

### **2.1.1- Características Interessantes de Biomassa para Bioenergia: Poder Calorífico Superior, Poder Calorífico Inferior e Energia Potencial da Biomassa**

O poder calorífico é uma característica da biomassa vegetal que indica a quantidade de energia liberada na queima completa de uma unidade de massa do material combustível (Protásio et al., 2011). Pode-se classificá-lo em poder calorífico superior ou poder calorífico.

Segundo Silva e Moraes (2008), o poder calorífico superior (PCS) corresponde ao poder calorífico em base seca, onde não se leva em consideração o calor associado à condensação da água formada em reação com o hidrogênio contido na biomassa. Já o poder calorífico inferior (PCI) é obtido subtraindo-se do PCS o calor associado à condensação do vapor de água formado pela reação do hidrogênio contido na biomassa. Durante a determinação do PCI leva-se em consideração o teor de umidade presente. Miranda (2011) sumariza que o poder calorífico superior é a soma da energia liberada na forma de calor e a energia gasta na vaporização, enquanto o poder calorífico inferior é a energia liberada na forma de calor.

A energia potencial da biomassa (EP), por sua vez, resulta da multiplicação entre a produtividade de massa seca e o poder calorífico superior (PCS). Essa variável, como se infere a com base em sua denominação, representa a energia que pode ser potencialmente gerada a partir da biomassa.

## 2.2- Setor Sucroenergético

O setor sucroenergético no Brasil compreende todas as atividades agrícolas e industriais relacionadas à produção de açúcar, etanol e bioeletricidade (Nastari, 2012).

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil ainda no período colonial, no século XVI. Entretanto, o modelo da agroindústria canavieira conhecido atualmente é bem mais recente, assumindo maior importância a partir do final da década de 1970 com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool).

Criado em 1975, o Proálcool tinha como objetivo reduzir a dependência do Brasil em relação ao petróleo, cujo preço disparou subitamente em 1973 quando ocorreu o primeiro choque do petróleo (Biodieselbr, 2006). O programa possibilitou, dentre diversos aspectos, a expansão do setor sucroenergético com a modernização de destilarias e criação de novas usinas. A criação do Proálcool e as medidas adotadas nesse período introduziram definitivamente o biocombustível na matriz de transportes do País, não apenas como complemento da gasolina (etanol anidro como aditivo), mas principalmente como substituto ao combustível fóssil por meio do etanol hidratado (Farina e Rodrigues, 2014).

O Brasil é um dos poucos países em que se pode fazer observações acerca do uso da biomassa em larga escala. Ressalta-se que o país é o maior produtor e exportador mundial de etanol proveniente de cana-de-açúcar. Uma grande vantagem observada no uso do etanol de cana está relacionada à menor emissão de gases que provocam o efeito estufa. O contínuo desenvolvimento tecnológico obtido com a implantação desta tecnologia no Brasil fez com que o etanol extraído da cana fosse menos poluente em relação a outros processos (Biomassa e Bioenergia, 2011). Além de apresentar significativa redução de emissões quando comparado a outros combustíveis, o etanol de cana-de-açúcar apresenta um balanço energético extremamente favorável: são mais de nove unidades de energia renovável geradas para cada unidade de energia fóssil consumida no processo (Seabra e Macedo, 2008b).

Entretanto, em decorrência da queda do preço do petróleo, da grave crise econômica mundial em 2008 e da política de precificação da gasolina, o endividamento do setor sucroenergético elevou-se acarretando fechamento de algumas unidades. Pontua-se que tal cenário é agravado pela ociosidade das usinas no período de entressafra da cana-de-açúcar, em que há falta de matéria-prima para processamento (Freitas, 2017).

Porém, as demandas por etanol, bioeletricidade e açúcar, nos mercados interno e externo, continuam em crescimento. Segundo a Fiesp (2013), em 2023/2024 haverá a necessidade de o Brasil atingir uma área plantada de 10,5 milhões de hectares e um esmagamento de cana-de-açúcar da ordem de 862 milhões de toneladas para atender o crescimento do consumo e das exportações de açúcar e etanol. Logo, é alta a dependência de uma matéria-prima de qualidade e da garantia de seu fornecimento, principalmente nos períodos de entressafra de cana-de-açúcar (atualmente a principal fonte de matéria-prima), garantindo-se o abastecimento durante o ano todo (Virmond, 2011).

Neste contexto, os materiais de sorgo bioenergia, os sorgo sacarino e biomassa, apresentam-se como alternativas promissoras.

### **2.3- A Cultura do Sorgo**

Originária do continente africano, a planta de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, Família: Poaceae] conhecida e utilizada atualmente é um produto da intervenção do homem que, ao longo dos anos, domesticou a espécie e vem transformando-a para satisfazer às necessidades humanas (Ribas, 2014).

O sorgo é uma planta C4 anual, com elevada eficiência fotossintética e tolerância a estresses hídricos, adaptando-se à vasta gama de ambientes sob condições de deficiência hídrica que são desfavoráveis à maioria dos outros cereais. Esta característica possibilita à cultura desenvolver-se e expandir-se em regiões de cultivo com distribuição irregular de chuvas e em sucessão a culturas de verão. Ressalta-se, contudo, que apesar da rusticidade o sorgo é bastante responsivo às boas práticas agrícolas e de manejo (Durães et al., 2012). É uma cultura de O sorgo apresenta alto potencial de rendimento, facilidade de cultivo e reprodução por sementes, tornando-se uma espécie muito atraente para exploração de energia (Magalhães, 2003). É considerado uma “*smart crop*” em função de produzir combustível através da biomassa e açúcares fermentáveis que, após submetidos a processos industriais, transformam-se em etanol e/ou em alimento (Filho et al., 2013).

Agronomicamente, os sorgos são classificados em cinco grupos, sendo: granífero, forrageiro, vassoura, sacarino e biomassa. O sorgo granífero apresenta porte baixo e panículas com grande quantidade de grãos, os quais destinam-se principalmente à produção de ração animal. O sorgo forrageiro inclui tipos de porte

médio, apropriados para silagem e/ou pastejo direto. Suas características bromatológicas que, à semelhança do milho, possibilitam fermentação adequada e consequente conservação deste alimento sob a forma de silagem (Gomes et al., 2006). O sorgo vassoura inclui tipos com panículas mais abertas, a partir das quais são confeccionadas vassouras. O sorgo sacarino possui colmos suculentos e ricos em açúcares, sendo utilizado principalmente para a produção de etanol. O sorgo biomassa apresenta elevada produção de massa seca e é utilizado para cogeração de energia por meio da queima da biomassa em caldeiras (Ribas, 2003).

O sorgo apresentou expressiva expansão nos últimos anos agrícolas. Do ponto de vista agrônomo, este crescimento é explicado, principalmente, pelo alto potencial de produção de grãos e matéria seca da cultura, além da boa capacidade de suportar estresses ambientais (Rodrigues, 2015). Estima-se que na safra 2016/2017 serão produzidas 1,87 milhões de toneladas de sorgo granífero ocupando-se uma área plantada de 641,8 mil hectares (Conab, 2017). Apesar da expansão observada nas últimas safras, a participação do sorgo no agronegócio nacional ainda é pequena quando comparada a outros produtos como milho e soja.

Além do sorgo granífero, cuja produção destina-se principalmente à alimentação animal, dois outros tipos de sorgo vêm ganhando espaço na agricultura. No cenário energético atual, em que se almeja suprir a demanda de energia por meio de fontes renováveis e com menor emissão de gases estufa, os sorgos sacarino e biomassa têm sido vistos como materiais interessantes para composição da matriz bioenergética.

### **2.3.1- Sorgo Sacarino**

Segundo Parrella et al. (2014) o sorgo sacarino vem se destacando como cultura promissora para a produção de etanol no Brasil, tanto do ponto de vista agrônomo quanto industrial. Seu ciclo tem duração aproximada de 115 dias, sendo uma cultura mecanizável do plantio à colheita.

Trata-se de uma planta de porte alto, superior a 3m, com produtividade de massa fresca em torno de 80 t ha<sup>-1</sup> (Durães, 2012). Os colmos apresentam elevado conteúdo de caldo com açúcares diretamente fermentáveis, a partir dos quais pode-se produzir etanol (Murray et al., 2009). Estudos econômicos mostram viabilidade do sorgo sacarino com produtividade de etanol em torno de 3000 L ha<sup>-1</sup> (May et al., 2012).

De acordo com Parrella (2011), a produtividade de etanol das cultivares de sorgo sacarino está associada a suas características agroindustriais como rendimento de colmos por hectare, umidade da biomassa, Brix do caldo, porcentagens de extração de caldo, fibra dos colmos, açúcares redutores totais, as quais irão refletir em litros de etanol por tonelada de colmos.

O sorgo sacarino é recomendado para plantios de primavera/verão, com semeadura no início do período chuvoso, que vai de outubro a dezembro, e colheita nos meses de fevereiro a abril para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Esta época de colheita coincide com a entressafra da cana-de-açúcar, quando as usinas estão paradas, devido à ausência de matéria-prima para moagem. Dessa forma, o sorgo sacarino tem encontrado grande demanda no setor sucroalcooleiro do Brasil, por possibilitar ampliação do número de dias trabalhados por ano nas destilarias, principalmente com fornecimento de matéria-prima nos meses de março e abril, otimizando a operacionalização e amortizando os custos fixos. Adicionalmente o bagaço pode ser utilizado como fonte de energia para industrialização, cogeração de eletricidade, etanol de segunda geração ou forragem para animais, contribuindo para um balanço energético favorável (Parrella et al., 2014).

Apesar das características do sorgo sacarino apresentarem-no como uma matéria-prima interessante à geração de etanol, sua utilização não se expandiu conforme o esperado. Segundo Zegada-Lizarazu e Monti (2012), as pesquisas sobre a produção e manejo do sorgo sacarino para geração de etanol têm enfrentado períodos alternados. O nível de interesse é dependente tanto das flutuações de preço dos combustíveis fósseis quanto de sua disponibilidade no mercado internacional. Os autores ainda mencionam que é evidente que informações importantes foram geradas no passado, mas de maneira pouco consistente e por vezes com aplicabilidade restrita a determinada situação. Dessa forma, ainda existem diversas lacunas de informação que precisam ser preenchidas e/ou atualizadas, como é o caso das técnicas adequadas de manejo.

Um dos fatores que tem inviabilizado a adoção em larga escala do sorgo sacarino nas unidades sucroenergéticas são os rendimentos de etanol inferiores ao esperado. Acredita-se que este problema possa estar relacionado, dentre diversos fatores, à imprecisão do ponto de colheita, ratificando-se a necessidade de desenvolvimento de estudos inovadores e concisos apontada por Zegada-Lizarazu e Monti (2012).

### 2.3.2- Sorgo Biomassa

Assim como o sorgo sacarino, o sorgo biomassa tem sido apontado como matéria-prima potencial para expansão da bioenergia.

Os híbridos de sorgo biomassa geralmente apresentam porte elevado atingindo, em alguns casos, 6 metros de altura. É um tipo de sorgo mais sensível ao fotoperíodo, pois floresce apenas quando os dias possuem menos de 12 horas e 20 minutos (Rooney e Aydin, 1999), ou seja, período entre 21 de março e 22 de setembro na maior parte do Brasil. Seu ciclo tem duração média de 150 dias. Os colmos são fibrosos, cuja composição varia de 5 a 10% de lignina, 15 a 25% de hemicelulose e 35 a 45% de celulose. Considerando-se o potencial da biomassa para cogeração de energia através da queima da biomassa, maiores valores de lignina são desejáveis. Resultados obtidos do poder calorífico superior e inferior da biomassa deste sorgo, em base seca, têm sido verificados em torno de 4300 Kcal kg<sup>-1</sup> de massa seca (MS) e 3800 Kcal kg<sup>-1</sup> de MS, respectivamente (Parrella et al., 2014).

Encontra-se em desenvolvimento a tecnologia para produção de etanol lignocelulósico, também denominada tecnologia de segunda geração de biocombustíveis. Nesse caso, a matéria-prima (biomassa vegetal) precisa passar por hidrólises para tornar os açúcares fermentáveis, com vista à produção de biocombustível. Entretanto, o principal destino para o sorgo biomassa ainda tem sido a cogeração de energia através da queima da biomassa seca.

Atualmente, cerca de 5,8% da matriz brasileira de geração de energia elétrica é originária da queima do bagaço da cana-de-açúcar (MME, 2016). Em muitas usinas, o excedente de energia produzida é comercializado, sendo a agroeletricidade o mais recente e promissor produto do agronegócio brasileiro (Parrella et al., 2014). Considerando-se os altos níveis de produtividade e a qualidade da biomassa, bem como os aspectos fitotécnicos da cultura como ciclo curto, plantio, manejo e colheita mecanizados, o sorgo biomassa vem se apresentando como uma cultura interessante para o fornecimento de matéria-prima para cogeração de energia. Segundo Gonsalves (2015) o setor sucroenergético foi responsável por 40% da área cultivada com o sorgo biomassa da companhia NextSteppe no ano de 2015. Marafon et al. (2016) apontam a importância da proximidade entre o local de produção da biomassa e as unidades geradoras de energia para não elevar os custos de transporte.

Ressalta-se que, além da composição química, a umidade é um fator determinante para o aproveitamento do potencial energético do sorgo biomassa. Valores elevados de umidade requerem que o material seja submetido a processos visando à desidratação, o que pode onerar os custos produtivos. Por outro lado, caso mantenha-se a planta à campo após determinado estágio, com o intuito de favorecer a desidratação natural, acredita-se que poderá ocorrer consumo de massa seca (carboidratos solúveis, principalmente) em função da senescência. Logo, por se tratar de uma cultura nova para cogeração energética, há necessidade de desenvolvimento de trabalhos fitotécnicos e de caracterização da cultura, visando o estabelecimento do sistema de produção do sorgo biomassa (Parrella et al., 2014).

### 3. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, C. J. B.; Pinho, R. G. V.; Rodrigues, J. A. S.; Brant, R. S.; Mendes, M. C.; 2011. Espaçamento e densidade de semeadura para cultivares de sorgo granífero no semiárido. *Bragantia* 70, 2, 278-285.
- BiodieselBR, 2006. Proálcool- Programa Brasileiro de Álcool. Revista BiodieselBR online. Disponível em <https://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool/programa-etanol.htm>. Acessado em 06 de junho de 2017.
- Biomassa e Bioenergia, 2011. O que é biomassa? Revista digital Biomassa e Bioenergia. Disponível em <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/o-que-e-biomassa-/20110811-103208-u704>. Acessado em 05 de maio de 2017.
- Conab- Companhia Nacional de Abastecimento, 2017. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar- abril de 2017. Disponível em [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_04\\_20\\_14\\_04\\_31\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_17-18.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf). Acessado em 06 de junho de 2017.
- Conab- Companhia Nacional de Abastecimento, 2017. Acompanhamento da safra brasileira de grãos- julho de 2017. Disponível em [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_07\\_11\\_09\\_00\\_42\\_boletim\\_graos\\_julho\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_07_11_09_00_42_boletim_graos_julho_2017.pdf). Acessado em 03 de julho de 2017.
- Conselho Mundial de Energia (World Energy Council), 2017. World energy issues monitor 2017- Exposing the new realities.
- Conselho Mundial de Energia (World Energy Council), 2016. World Energy Resources- 2016.
- Durães, F. O. M., Parrella, R. A. C., 2012. Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público-privada: oportunidades, perspectivas e desafios. Documentos 138- Embrapa Milho e Sorgo.
- Eckert, C. T., Frigo, E. P., Bastos, R. K., Júnior, A. M., Mari, A. G., Cabral, A. C., 2013. Biomassa residual vegetal. *Rev. Bras. de Energias Renováveis*, 4, 32-44.
- Farina, E., Rodrigues, L., 2014. Capítulo XIV: Cana-de-açúcar: fonte de energia limpa para o futuro. In: *Global Agribusiness fórum GAF*, 1 ed., 2014, São Paulo, SP. Anais eletrônicos, São Paulo, SP: Datagro Publicações Ltda., 157-166.
- Fiesp, 2013. Outlook Fiesp 2023: projeções para o agronegócio brasileiro. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. 115.
- Filho, I. A. P., Parrella, R. A. C., Moreira, J. A. A., May, A., Souza, V. F., Cruz, J. C., 2013. Avaliação de cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) em diferentes densidades de semeadura visando a características importantes na produção de etanol. *Rev. Bras. de Milho e Sorgo*, 12 (2), 118-127.

- Franco, A., 2014. Crise no setor sucroenergético impacta no sorgo sacarino. *Jornal O Popular- Economia*. Disponível em <http://www.opopular.com.br/editorias/economia/crise-no-setor-sucroenerg%C3%A9tico-impacta-no-sorgo-sacarino-1.562850>. Acessado em 05 de maio de 2017.
- Freitas, E. C., 2017. Diagnóstico da cadeia produtiva do sorgo dentro do setor sucroenergético brasileiro. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- Funchal, M., 2015. Geração de bioenergia no Brasil— panorama atual e perspectivas. *Revista Ambiente Energia*. Disponível em <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/03/geracao-de-bioenergia-brasil-panorama-atual-e-perscpetivas/25772>. Acessado em 07 de junho de 2017.
- Gomes, S. O., Pitombeira, J. B., Neiva, J. N. M., Cândido, M. J. D., 2006. Comportamento agrônomico e composição químico-bromatológico de cultivares de sorgo forrageiro no Estado do Ceará. *Rev. Ciência Agronômica*, 37 (2), 221-227.
- Gonsalves, T. Seis grupos se interessam e NexSteppe amplia 10 vezes cultivo do sorgo biomassa. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/alternativas/nexsteppe-cultivo-sorgo-biomassa-300415/>. Acessado em 10 de maio de 2017.
- Hall, D.O., 1997. Biomass energy in industrialised countries—a view of the future. *Forest Ecology and Management*, 91, 17-45. DOI: [doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03883-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03883-2).
- Johansson, T.B.J., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (Eds), 1992. Renewable fuels and electricity for a growing world economy: defining and achieving the potential. *Energy Studies Reviews*, 4(3), 201-212.
- Magalhães, P. C., Durães, F. O. M., Rodrigues, J. A. S., 2003. Fisiologia da planta de sorgo. Comunicado técnico 86- Embrapa Milho e Sorgo, 4p.
- Marafon, A. C., Santiago, A. D., Amaral, A. F. C., Bierhals, A. N., Paiva, H. L., Guimarães, V. S., 2016. Uso da biomassa para a geração de energia. Documentos 211- Embrapa Tabuleiros Costeiros.
- May, A., Durães, F. O. M., Vasconcellos, J. H., Parrella, R. A. C., Miranda, R. A., 2012. In: Seminário Temático Sobre Sorgo Sacarino, 1., 2012. Sete Lagoas, MG. Anais. Documentos 137, Embrapa Milho e Sorgo, 83p.
- May, A., Silva, D. D., Santos, F. C., 2013. Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica. Documentos 152, Embrapa Milho e Sorgo.
- Miranda, M. R. S., 2011. Bagaço do sorgo: estimativa de parâmetros cinéticos e pirólise enzimática. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia.
- MME- Ministério de Minas e Energia, 2016. Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2015. Edição de maio de 2016. Ministério de Minas e Energia.

- MME- Ministério de Minas e Energia, 2017. Renováveis devem manter participação de 43% na matriz energética em 2017. Disponível em [http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017). Acessado em 10 de maio de 2017.
- Murray, S.C., Sharm, A., Rooney, W. L., Klein, P. E., Mullet, J. E., Mitchell, S. E., Kresovich, S., 2008. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I.QTL for stem sugar and grain non-structural carbohydrates. *Crop Sci.*, 48, 2165-2179. Doi: 10.2135/cropsci2008.01.0016.
- Nastari, P. M., 2012. Produção sustentável - A importância do setor sucroenergético no Brasil, 2012. *Revista Agroanalysis*. Disponível em: <http://www.agroanalysis.com.br/3/2012/mercado-negocios/producao-sustentavel-a-importancia-do-setor-sucroenergetico-no-brasil>. Acessado em 10 de maio de 2017.
- Parrella, R. A. C., 2011. Melhoramento genético do sorgo sacarino. *Agroenergia em Revista*, Brasília, 2(3), 8-9.
- Parrella, R. A. C., Menezes, C. B., Rodrigues, J. A. S., Tardin, F. D., Parrella, N. N. L. D., Schaffert, R. E. Cultivares. In: Borém, A., Pimentel, L. D., Parrella, R. A. C. (ed.). *Sorgo: do plantio à colheita*. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap. 7, p. 169-187.
- Ribas, P. M., 2003. *Sorgo: introdução e importância econômica*. Documentos 26, Embrapa Milho e Sorgo.
- Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Couto, A. M., Trugilho, P. F., Guimarães Júnior, M., 2011. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 113- 122. Doi: 10.4336/2011.pfb.31.66.113.
- Ribas, P. M., 2014. *Origem e importância econômica do sorgo. Sorgo do plantio à colheita*. Viçosa: Editora UFV, 2014, 9-36. .
- Rodrigues, J. A. S., 2015. *Cultivo do sorgo*. Disponível em [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemadesdeproducaolf6\\_1galceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=8301&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=9201](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemadesdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=8301&p_r_p_-996514994_topicoId=9201). Acessado em 10 de maio de 2017.
- Rooney, W. L., Aydin, S., 1999. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* L. Moench. *Crop Science*, 39,397-400. DOI:10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200016x.
- Rooney, W. L., Blumenthal, J., Bean B, Mullet, J. E., 2007. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*,1, 147- 57. DOI: 10.1002/bbb.15.

- Seabra, J. E. A., Macedo, I. C., 2008. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: P Zuurbier e J. van de Vooren (eds). Sugarcane Ethanol, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 95-111.
- Silva, E., 2012. Biomassa cultivada para produção de energia: estudo comparativo entre capim-elefante e eucalipto com a incorporação da energia solar na secagem. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá.
- Silva, E., 2012. Biomassa cultivada para produção de energia: estudo comparativo entre capim-elefante e eucalipto com a incorporação da energia solar na secagem. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá.
- Vale, A. T., Brasil, M. A. M., Leão, A. L., 2002. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. *Ciência Florestal*, 12(1), 71-80.
- Virmond, E., 2011. Potencial de cogeração de energia elétrica a partir de resíduos do processamento de sorgo sacarino. *Agroenergia em Revista*. Edição 3. Agosto, 2011.
- Zegada-Lizarazu, W., Monti, A., 2012. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices. *Biomass Bioenergy* 40, 1–12. Doi: 10.1016/j.biombioe.2012.01.048.

## CAPÍTULO I:

### **DEFINIÇÃO DO PONTO DE COLHEITA EM SORGO SACARINO: NOVA ABORDAGEM PARA AMOSTRAGEM E TOMADA DE DECISÃO NAS UNIDADES INDUSTRIAIS**

#### **RESUMO**

O sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tem sido estudado como alternativa à geração de biomassa destinada à produção de etanol. Um gargalo da cultura é a determinação do ponto de colheita no campo. Atualmente, baseia-se no Brix (teor de sólidos solúveis) dos entrenós medianos e na identificação da maturação dos grãos como referenciais de colheita. Entretanto, acredita-se que esta metodologia não seja a mais adequada, visto que estes parâmetros têm resultado em rendimentos industriais insatisfatórios. Objetivou-se neste trabalho determinar o ponto de colheita de sorgo sacarino e identificar qual entrenó ou segmento de entrenós são representativos do Brix total do colmo. O experimento foi realizado em condições de campo, utilizando-se a cultivar de sorgo sacarino BRS 511. O delineamento experimental adotado foi blocos casualizados, com cinco repetições e sete tratamentos. Os tratamentos constituíram-se nas épocas de amostragem da cultura conforme o estágio de desenvolvimento fenológico: emborrachamento, florescimento, grão leitoso, grão pastoso, grão farináceo, grão duro e senescência. Em cada estágio fenológico avaliou-se as produtividades de massa fresca (PMF) e massa seca (PMS), total e das partes, percentual de umidade, altura de planta, diâmetro do colmo e número de folhas. Quantificou-se também a taxa de extração de caldo (TE), produtividade de caldo (PCH), toneladas de Brix por hectare (TBH) e açúcares totais. Avaliou-se o Brix do caldo extraído de cada entrenó (BE) e o Brix do caldo extraído do colmo inteiro (sem individualização dos entrenós = Brix controle- BC). Observou-se a maior produtividade de massa fresca do colmo (PMF colmo) no estágio de grão leitoso com 104 t ha<sup>-1</sup>, embora não tenha diferido estatisticamente da PMF colmo dos outros estádios. A maior taxa de extração de caldo foi de 69% no estágio de grão pastoso, não diferindo estatisticamente das TE's dos estádios de emborrachamento, florescimento e grão leitoso. O maior Brix do caldo do colmo foi registrado entre os estádios de grão pastoso e grão farináceo, com 15 °Brix. O índice multiplicativo TBH, que associa os valores de PMF colmo, TE e BC e permite estimar do rendimento industrial, foi maior

entre os estádios de grão pastoso ao grão duro. Nos entrenós encontrou-se maiores valores de Brix naqueles situados no terço mediano do colmo. Porém, o Brix medido no terço mediano do colmo não representou o Brix obtido do colmo inteiro. Considerando-se todos os estádios fenológicos da cultura, o único entrenó cujo Brix não diferiu do Brix real da planta inteira foi o entrenó 2. Quando considerado apenas os estádios de grão pastoso ao duro (previsão de colheita), o Brix dos entrenós 2 e 3 não diferiram significativamente do Brix real da planta. Conclui-se que o ponto de colheita do sorgo sacarino BRS 511 é compreendido entre os estádios de grão pastoso ao grão duro, nos quais se obtém o máximo rendimento industrial da cultura. A medição do Brix do entrenó para fins de amostragem para colheita deve ser feita no segmento composto pelos entrenós 2 e 3, os quais melhor representam o Brix real obtido do colmo inteiro.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*; entrenó; Brix; produtividade.

**REDEFINITION OF SWEET SORGHUM HARVEST TIME:  
NEW APPROACH FOR SAMPLING AND DECISION-MAKING AT THE  
INDUSTRIAL UNITS**

**ABSTRACT**

Sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] has been studied as an alternative raw material for ethanol production. A bottleneck of the crop is the determination of its harvest time in the field. Currently, stem maturation, measured through the Brix (soluble solids content) of intermediary internodes and the identification of grain maturity are used as harvest indicators. However, it is believed that this methodology is not suitable for this purpose, since these strategies have resulted in unsatisfactory industrial yields. The present work aimed to determine the ideal harvest time for sweet sorghum and identify which internode or segment of internodes better represents Brix of the stem juice. The experiment was conducted under field conditions, using the sweet sorghum cultivar BRS 511. It was set in a randomized block design with five replications and seven treatments. The treatments consisted in the sweet sorghum phenological stages, which were pre-flowering, flowering, milk dough, soft dough, mealy dough, hard dough and senescence. Were evaluated fresh (FBY) and dry biomass (DBY) yields (from each part and from the whole plant), humidity, plant height, stem diameter and leaves number. It was quantified juice extraction (JE), juice yield (JY), tons of Brix per hectare (TBH) and total sugars in the juice (TS). Brix of the juice from each internode and from the whole stem (without segmenting the internodes= 'real' Brix) were evaluated. The largest stem fresh biomass yield (SFBY) was registered at the milk dough stage, with 104 t ha<sup>-1</sup>. The maximum JE rate was 69% at the soft dough stage, although it was not statistically different of JE's in the pre-flowering, flowering and milk dough stages. The highest Brix of stem juice (SB) was registered between the soft and mealy dough stages, with 15 °Brix. The multiplicative index TBH, which combines SFBY, JE, SB and allows the estimation of sweet sorghum industrial yield, exhibited the highest value between the soft to hard dough stages, with an average of 9.40 t °Brix ha<sup>-1</sup>. Regarding the internodes, the highest Brix values were observed at the ones located at the stem middle-third. However, Brix measured in this section was not representative of Brix obtained from the whole stem. Regardless of the phenological stages, the internode number 2 was the only one whose Brix had not differed from the whole stem Brix ('real' Brix). Analyzing only the soft,

mealy and hard dough stages (harvest prediction), Brix of the internodes 2 and 3 had not significantly differed from the stem real Brix. The sweet sorghum BRS 511 harvest time is comprehended between the soft to hard dough stages, in which were found the highest industrial yields parameters. For cultivar BRS 511, in field-Brix sampling could be used as a harvest indicator and it must be done at the internodes 2 and 3, which better represents the real Brix obtained from the whole stem.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*; yield; internode; Brix.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração e o consumo de energias renováveis respondem por 41% da matriz energética brasileira (MME, 2016). A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) destaca-se entre as biomassas energéticas, sendo utilizada na forma de etanol e bioeletricidade, o que a torna a segunda maior fonte de energia primária do País, precedida apenas pela energia advinda do petróleo.

Embora o Brasil apresente o setor sucroenergético desenvolvido e consolidado, por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o segundo maior produtor de etanol e o maior produtor e exportador de açúcar de cana, há um impasse logístico enfrentado pelas usinas na entressafra da cana-de-açúcar. Em geral, as usinas ficam paradas de dezembro a março, devido à ausência de matéria-prima para moagem, no caso a cana “madura”. Dessa forma, o sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] se apresenta como ótima opção para ampliar a produção de bioenergia e reduzir a ociosidade do parque industrial instalado, na entressafra da cana.

O sorgo sacarino é uma planta C4 e apresenta elevada produção de biomassa, o que viabiliza seu uso em bioenergia. Possui ciclo curto (aproximadamente 115 dias) e seus colmos são suculentos e com açúcares diretamente fermentáveis, possibilitando a produção de etanol (Regassa e Wortmann, 2014). A mesma estrutura de colheita, moagem e processamento da cana pode ser utilizada nos processos análogos para o sorgo sacarino. O bagaço, tido como um subproduto, pode ser usado para cogeração de eletricidade, etanol de 2ª geração e forragem para animais, contribuindo para um balanço energético favorável. Ou seja, o sorgo sacarino é uma alternativa complementar ao setor sucroenergético canavieiro, pois possibilita o fornecimento de matéria-prima na entressafra da cana e com isso há ampliação do número de dias trabalhados nas destilarias, otimizando a sua operacionalização e amortizando os seus custos fixos (Parrella et al., 2014).

Entretanto, o rendimento industrial ( $L\ ha^{-1}$ ) do sorgo sacarino nas usinas sucroalcooleiras tem sido abaixo do esperado. Cogita-se que tais rendimentos inferiores podem ser atribuídos ao desconhecimento de questões agronômicas importantes como, por exemplo, técnicas de cultivo inadequadas, e especialmente definição incorreta do ponto de colheita ideal. Uma característica associada à produtividade do sorgo sacarino e bastante influenciada pelo ponto de colheita é o

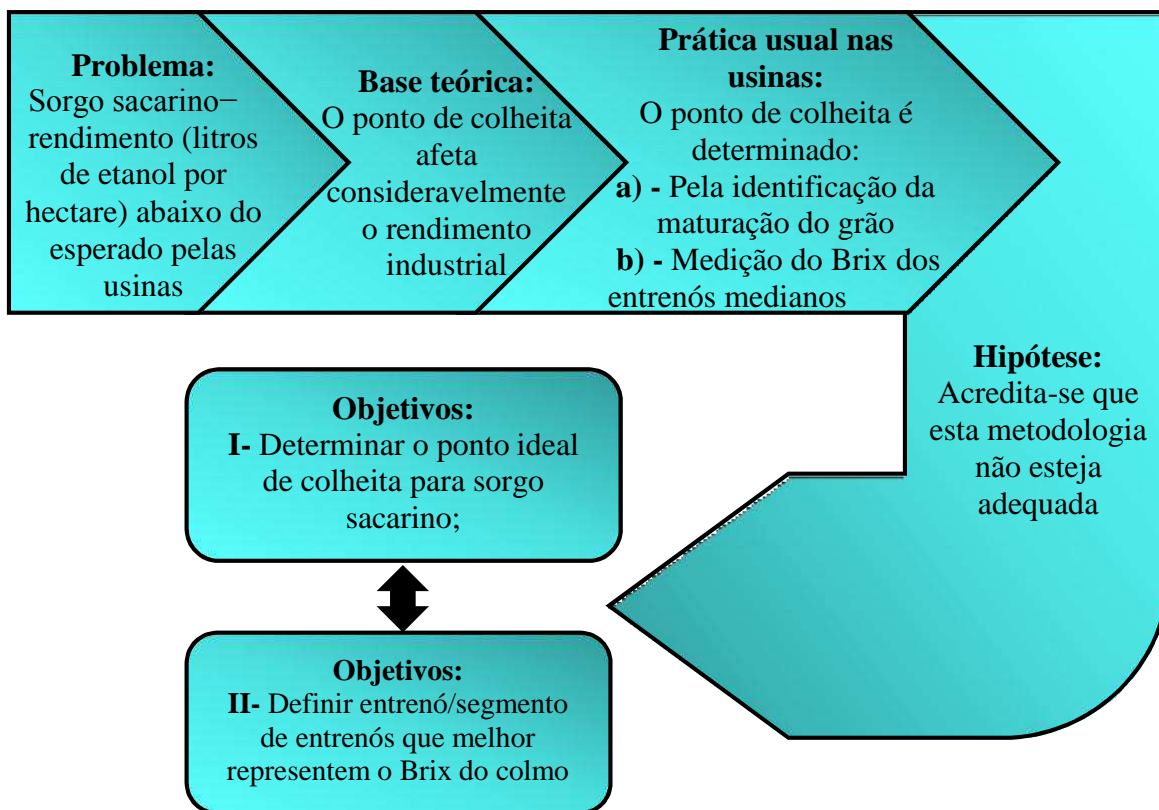
período de utilização industrial (PUI). PUI compreende o período em que a planta está apta à colheita no campo, mantendo os padrões mínimos de produtividade e qualidade da matéria-prima, que reflita em rendimento de etanol economicamente viável. Caso a planta fique no campo além do seu PUI, provavelmente iniciará o processo de perfilhamento, resultando no consumo das reservas de açúcares do colmo, com redução do Brix e aumento dos teores de amido. Logo, a definição errônea do ponto de colheita e o uso de métodos de amostragem imprecisos podem comprometer consideravelmente os rendimentos industriais, devido à qualidade da matéria-prima (colmos) que entra na usina.

Atualmente a definição do ponto de colheita é feita de duas maneiras.

Determina-se o estágio de maturação do grão pressionando-o entre os dedos (juntamente à análise visual de sua coloração) e identifica-se os estádios pastoso/grão farináceo, que com base nas curvas de maturação para sorgo sacarino, são aqueles em que há maior acúmulo de açúcares no colmo. Outra maneira é por meio da medição do teor de sólidos solúveis totais (Brix) no terço médio do colmo da planta. O Brix correlaciona-se diretamente com o teor de açúcares totais no caldo (Murray et al., 2008), sendo que estes açúcares são utilizados pelas leveduras na produção de etanol.

Contudo, acredita-se que essa determinação do ponto de colheita de sorgo sacarino ainda é imprecisa e as metodologias adotadas para tomada de decisão não são apropriadas, em virtude dos rendimentos insatisfatórios nas usinas. Pressupõe-se que a associação entre o rendimento da matéria fresca de colmos, a taxa de extração de caldo e o Brix seja mais adequada para determinação do ponto de colheita de sorgo sacarino. Presume-se também que exista um entrenó ou segmento de entrenós, situado no terço médio do colmo ou fora dele, que possa ser amostrado e que seja melhor representativo do Brix do colmo inteiro, ou seja, do Brix real da planta.

Nesse sentido, objetivou-se neste trabalho determinar o ponto de colheita para sorgo sacarino com base em seu desenvolvimento fenológico e propor uma metodologia mais precisa para se estimar o Brix do colmo inteiro. Em associação com as informações já conhecidas, acredita-se que os resultados desta pesquisa contribuirão para o aumento dos rendimentos industriais de sorgo sacarino, com melhor aproveitamento de seu potencial produtivo (Figura 1).

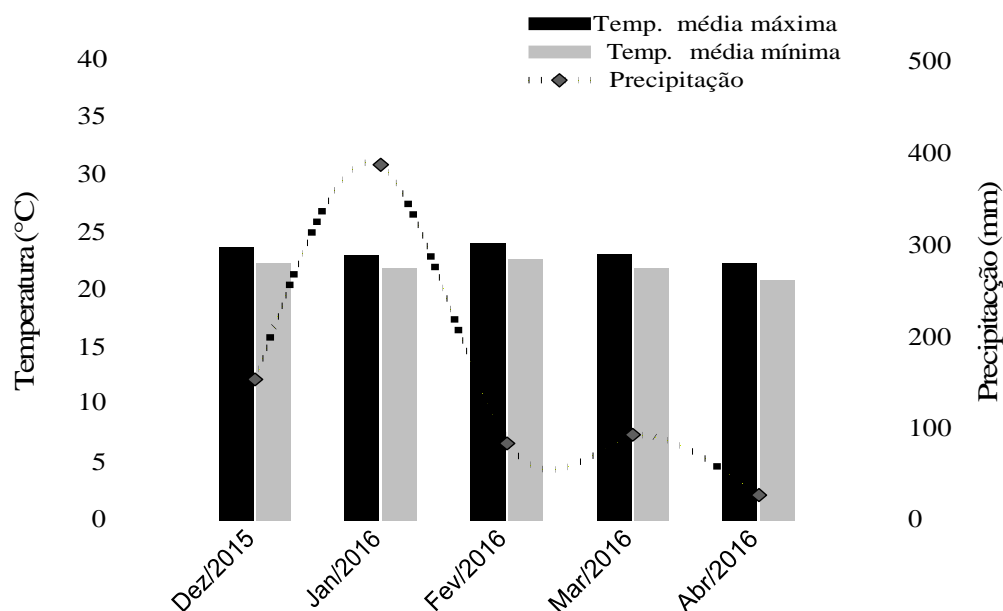


**Figura 1.** Esquematização da pesquisa considerando-se o problema central, hipótese e objetivos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1- Local e condições climáticas

O experimento foi instalado no Campo Experimental “Diogo Alves de Mello” (lat 20° 45' 14" S, long 42° 52' 55" O e alt 648 m), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil. O trabalho foi conduzido de dezembro de 2015 a abril de 2016. O resumo das condições climáticas da época de realização do experimento é apresentado na Figura 2.

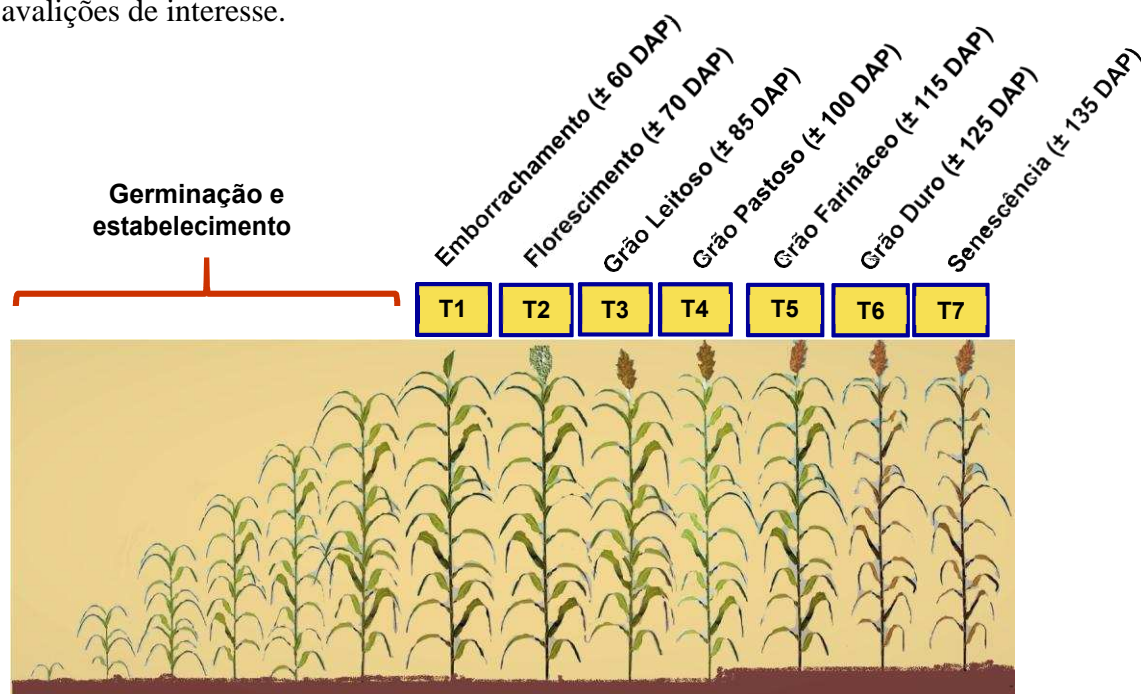


**Figura 2.** Precipitação acumulada (mm) e temperaturas (°C) médias mensais durante o período de condução do experimento, no município de Viçosa-MG. Dados da Estação Meteorológica Automática de Viçosa A-510.

O solo do local é classificado, conforme Embrapa (2011), como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura argilosa. Os resultados da análise química do solo referentes à camada de 0 a 20 cm de profundidade apresentaram as seguintes características: pH (H<sub>2</sub>O) = 5,87; P = 14,7 mg dm<sup>-3</sup>; K = 45 mg dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 3,44 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 1,25 mg dm<sup>-3</sup>; Al<sup>3+</sup> = 0,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al = 3,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB = 4,81 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC(t) = 4,81 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC (T) = 8,41 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, V = 57,2% e MO = 2,79 dag kg<sup>-1</sup>.

## 2.2- Delineamento experimental

O experimento foi conduzido no Delineamento em Blocos Casualizados, com cinco repetições e sete tratamentos. Os tratamentos constituíram-se nas diferentes épocas de amostragem da cultura, conforme seu estágio de desenvolvimento fenológico (Figura 3), com intervalos médios de dez a quinze dias entre as avaliações. Iniciou-se no emborrachamento (tratamento 1- T1), seguido pelo florescimento (T2), grão leitoso (T3), grão pastoso (T4), grão farináceo (T5), grão duro (T6), e senescência (T7). A parcela total foi composta por quatro linhas de 4 m de comprimento, espaçadas em 0,7 m, sendo a parcela útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5m em cada extremidade. Desta parcela útil coletaram-se, aleatoriamente, dez plantas para as avaliações de interesse.



**Figura 3.** Ciclo de crescimento e desenvolvimento do sorgo sacarino BRS 511, no município de Viçosa-MG. Tratamentos experimentais (T). Dias após o plantio (DAP).

## 2.3- Implantação e manejo da cultura

O preparo da área experimental foi feito realizando-se uma aração e duas gradagens. Previamente realizou-se a dessecação da área utilizando a mistura de herbicidas glyphosate com 2,4-D ( $1500 \text{ g ha}^{-1} \text{ i. a.}$  e  $800 \text{ g ha}^{-1} \text{ i. a.}$ , respectivamente). Os sulcos de plantio foram abertos manualmente com auxílio de enxada e espaçados 0,70 m entre si. Distribuiu-se, de forma manual, 12 sementes por metro

linear, em uma área de 630 m<sup>2</sup>. Aos quinze dias após a semeadura fez-se o desbaste, estabelecendo-se a população de 120 000 plantas por hectare. Utilizou-se a cultivar de sorgo sacarino BRS 511 produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade Milho e Sorgo (Embrapa Milho e Sorgo). Justifica-se a escolha desta cultivar por se tratar de um dos materiais mais promissores, em termos de produtividade de etanol, para as condições edafoclimáticas brasileiras.

As adubações de plantio e cobertura foram feitas com base na análise de solo e referenciadas pela circular técnica Cultivo de Sorgo Sacarino em Áreas de Reforma de Canaviais (May, 2013). Para o plantio aplicou-se diretamente no sulco 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação NPK 08:28:16. Vinte dias após a emergência (DAE) fez-se a adubação de cobertura com 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação NPK 20:05:20 e aplicação de 50 g ha<sup>-1</sup> i. a. de deltametrina para controle de pragas da parte aérea (lagartas). Para o controle de plantas daninhas fez-se a capina manual aos 30 DAE.

#### 2.4- Características avaliadas

Para cada tratamento, a partir de dez plantas aleatoriamente coletadas na parcela útil, realizaram-se as seguintes avaliações:

- **Altura de planta (AP):** considerou-se a média, em metros (m), das alturas da amostra coletada medindo-se as plantas por meio de uma trena graduada, partindo-se da base do colmo até o ápice da panícula;
- **Diâmetro do colmo (DC):** medido, em milímetros (mm), no terço médio dos colmos (considerando-se o 5º nó após descartar o primeiro nó da base) com o auxílio do paquímetro digital (Starrett®, 6 POL 799A-6/150);
- **Número de folhas (NF):** contagem direta das folhas do colmo;
- **Produtividade de massa fresca total (PMF):** massa referente à cada seção da planta separadamente (folhas, colmos e panículas), sendo o somatório dos valores a massa fresca total. A pesagem foi realizada em balança digital, obtendo-se os valores em quilograma (kg) e convertidos em toneladas por hectare (t ha<sup>-1</sup>);
- **Produtividade de massa seca total (PMS):** diferença das massas (kg) da amostra do material recém colhido e após secá-la em estufa; sendo os valores obtidos em quilograma (kg) e convertidos em toneladas por hectare (t ha<sup>-1</sup>);

- **Umidade (U):** após determinação da PMF, alíquotas úmidas correspondentes a 1 kg de folhas; 0,5 kg de colmos e todas as panículas foram levadas à secagem em estufa com sistema de ventilação forçada a 70 °C ( $\pm 5$ ), até atingirem massa constante. As massas obtidas após secagem dos materiais na estufa foram inseridas na equação (I) e determinou-se a umidade:

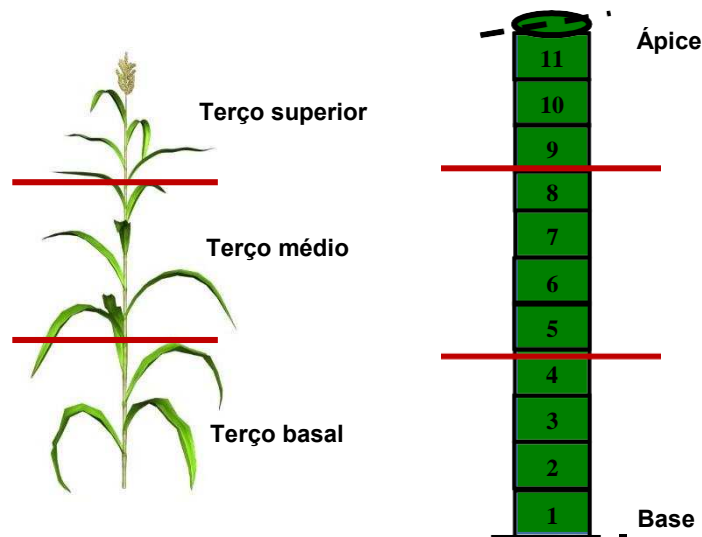
$$(I) \quad U = \left[ \frac{M1-M2}{M1} \right] \times 100;$$

Em que U é a umidade determinada em percentagem (%); M1 é a massa inicial da alíquota, em kg; e M2 é a massa (kg) da alíquota após secagem na estufa;

- **Sólidos solúveis dos entrenós - Brix dos entrenós (BE):** da amostra de dez plantas selecionou-se aleatoriamente quatro; seccionou-se os colmos individualizando cada entrenó (Figura 4). Extraíu-se o caldo de cada entrenó com o auxílio de um alicate universal (8'', Gedore®), e com o auxílio de um refratômetro portátil (Instrutherm, RT-30ATC) mediu-se o teor de sólidos solúveis (Brix) de cada segmento, sendo os valores obtidos em graus Brix (°Brix);
- **Sólidos solúveis totais- Brix do colmo (BC):** os colmos utilizados anteriormente foram passados por ensiladeira e retirou-se uma amostra de 0,5 kg de colmos picados. A amostra foi levada à prensa hidráulica e submetida à pressão mínima e constante de 250 kgf cm<sup>-2</sup> por um minuto para extração do caldo. Com auxílio de refratômetro portátil (Instrutherm, RT-30ATC), mediu-se o Brix (°Brix) do caldo proveniente do colmo inteiro (Figura 4);
- **Taxa de extração de caldo (TE):** após extração do caldo, pesou-se o volume de caldo extraído. A TE foi calculada por meio da equação (II):

$$(II) \quad TE = \left( \frac{M2}{M1} \right) \times 100;$$

Em que TE corresponde à taxa de extração do caldo (%), M2 corresponde à massa (g) do volume de caldo extraído e M1 corresponde à massa da amostra de colmos picados levados à prensa hidráulica (500 g);



**Figura 4.** Representação da segmentação do colmo de sorgo sacarino conforme a posição dos entrenós. Terço basal (mais próximo às raízes), terço médio e terço superior (mais próximo à panícula).

- **Produtividade de caldo por hectare (PCH):** o volume de caldo extraído da amostra de 0,5 kg de colmos foi quantificado com o auxílio de uma proveta graduada. Em seguida calculou-se a PCH por meio da equação (III):

$$(III) \quad PCH = \frac{(PMF \text{ colmo} \times VC)}{0,500} ;$$

Em que *PCH* é a produtividade de caldo por hectare ( $L \text{ ha}^{-1}$ ); *PMF colmo* é a produtividade de massa fresca do colmo ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ); *VC* é o volume de caldo extraído (L) da alíquota e 0,5 corresponde à massa (kg) da alíquota de colmos utilizada para extração do caldo;

- **Toneladas de Brix por hectare (TBH):** obtida pela multiplicação entre a produtividade de massa fresca de colmos por hectare (PMF colmo), a taxa de extração de caldo (TE) e o Brix do colmo (BC). Expressa em toneladas grau Brix por hectare ( $t \text{ }^\circ\text{Brix ha}^{-1}$ );
- **Açúcares totais (AT):** determinou-se os teores de sacarose, glicose e frutose, no equipamento High Performance Liquid Chromatography (HPLC). A partir do caldo extraído na prensagem as amostras foram preparadas por meio da centrifugação (4000 rpm durante 4 minutos), diluição em água deionizada (1:10) e filtração em filtro quantitativo e filtro seringa (0,45  $\mu\text{m}$ ). A solução obtida após a última filtração foi injetada no HPLC. A concentração de cada açúcar no caldo foi determinada usando as áreas de pico dos cromatogramas e expressa em termos de gramas de açúcares totais por litro de suco ( $g \text{ L}^{-1}$ ). Por

meio da soma das quantidades obtidas para cada açúcar individualmente calculou-se a concentração total.

## **2.5- Análise estatística**

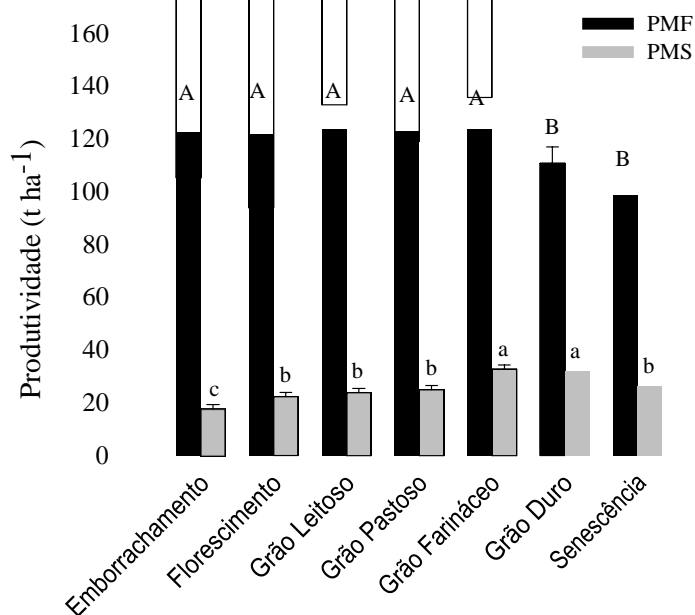
Os dados das características avaliadas foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilks e uma vez que houve apenas ligeiros desvios de normalidade, foram processados sem transformação. Realizou-se então a análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade. As médias dos tratamentos para a variável Brix foram comparadas pelo teste Dunnet, ao nível de 5% de probabilidade. Para as demais variáveis, as médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste Scott-Knott (1974) ao nível de 5% de probabilidade. Realizou-se a análise de regressão para verificar o comportamento das variáveis ao longo do tempo. Para as análises mencionadas utilizaram-se os softwares SAS e SISVAR 5.6.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1- Descrição fenológica da cultura

##### 3.1.1-Produtividade de massa fresca total (PMF) e produtividade de massa seca total (PMS)

Observaram-se maiores produtividades de massa fresca total (PMF) entre os estádios de emborrachamento (69 dias após o plantio-DAP) ao grão farináceo (112 DAP). A máxima PMF foi registrada no estágio de grão farináceo sendo  $124 \text{ t ha}^{-1}$ , embora esse valor não difira estatisticamente dos obtidos nos estádios fenológicos anteriores (Figura 5).



**Figura 5.** Produtividade de massa fresca total (PMF) e produtividade de massa seca total (PMS), nos estádios fenológicos do sorgo sacarino BRS 511. Médias (em barras) seguidas pela mesma letra maiúscula na PMF e pela mesma letra minúscula na PMS não diferem significativamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Os valores da produtividade de massa fresca total foram consideravelmente superiores à média de  $80 \text{ t ha}^{-1}$  (Embrapa, 2012) registrada para o sorgo sacarino BRS 511. Tal fato pode ser atribuído à metodologia para estimativa da produtividade. Coletaram-se plantas aleatoriamente nas parcelas experimentais nos diferentes blocos e, a partir das mesmas, estimou-se a PMF por hectare. Pontua-se, entretanto, que ao

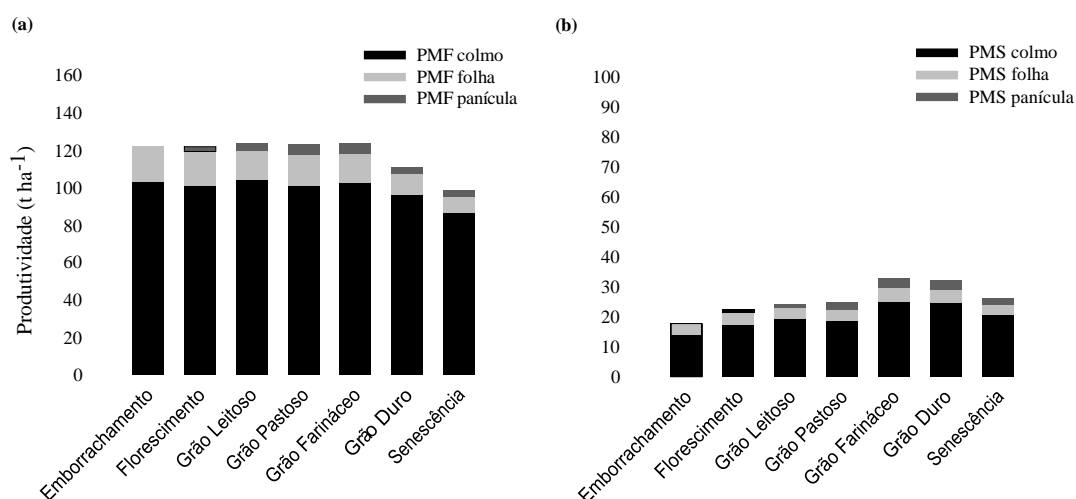
adotar a produtividade das plantas amostradas como um padrão para todas as demais plantas da população experimental, excluiu-se as variações existentes entre as mesmas. Logo, a elevada PMF obtida no presente trabalho é justificada partindo-se da premissa de uma população de plantas homogênea. Ressalta-se que o crescimento e desenvolvimento de cada planta é influenciado por fatores diversos, tais como a competição intra/interespecífica e microclima às quais estão submetidas. Tais fatores podem resultar, por exemplo, em plantas com diferentes alturas, com diferentes diâmetros de colmo, etc. Essas diferenças possivelmente refletiriam em menor produtividade de massa fresca, obtendo-se valores mais próximos à média conhecida ( $80 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Nos estádios de grão duro (122 DAP) e senescência (130 DAP) registraram-se menores produtividades de massa fresca, no caso  $111 \text{ t ha}^{-1}$  e  $99 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente. A menor PMF registrada ainda foi consideravelmente superior ao padrão mínimo de produtividade de  $60 \text{ t ha}^{-1}$  determinado para sorgo sacarino (Schaffert et al., 2011). Observou-se que caso a cultivar de sorgo sacarino BRS 511 permaneça no campo após o estádio de grão farináceo, ocorrerá redução da massa fresca (Figura 5) em função da desidratação natural da cultura e consumo de massa seca, podendo comprometer o rendimento em termos de volume de caldo produzido por hectare e teor de açúcares.

A produtividade de massa fresca tende a variar ao longo do ciclo cultural. Logo é importante sua caracterização ao longo dos estádios fenológicos para definição adequada da época de corte de sorgo sacarino. Desse modo, tende-se a minimizar as perdas no rendimento obtendo-se melhores produtividades de massa fresca e, provavelmente, maior volume de etanol.

A produtividade de massa seca total (PMS) foi crescente entre os estádios de emborrachamento (69 DAP) ao grão duro (122 DAP). Observaram-se incrementos mais acentuados a partir do florescimento da cultura (75 DAP) atingindo o máximo de  $33 \text{ t ha}^{-1}$  no estádio de grão farináceo (112 DAP), sendo este valor estatisticamente semelhante ao obtido no estádio de grão duro ( $32 \text{ t ha}^{-1}$ ). Observou-se que na maturidade fisiológica, além da máxima produtividade de massa fresca total, atingiu-se a máxima produtividade de massa seca total. Houve diminuição da PMS no período da senescência (130 DAP) (Figura 5) provavelmente devido à redução da fotossíntese líquida e consumo das reservas, em detrimento da produção de fotoassimilados (Hidema et al., 1991).

A produtividade de massa fresca do colmo (PMF colmo) correspondeu à aproximadamente 85% da produtividade de massa fresca total (PMF), estando próxima ao intervalo de 70 a 80% encontrado por May et al. (2013). Registrou-se a maior PMF colmo no estágio de grão leitoso (87 DAP), sendo  $104 \text{ t ha}^{-1}$  (Figura 6.a), embora tal valor não tenha diferido estatisticamente dos demais nos outros estádios fenológicos. Acredita-se que a redução da umidade do colmo entre o estágio de emborrachamento (69 DAP) e o de grão farináceo (112 DAP) (Figura 7.b) foi compensada por ligeiros incrementos na massa seca de colmo, fazendo com que a produtividade de massa fresca do colmo não exibisse grandes variações nestes estádios.



**Figura 6.** (a) Participação da produtividade da massa fresca do colmo (PMF colmo), da folha (PMF folha) e da panícula (PMF panícula) na produtividade de massa fresca total (PMF) e (b) participação da produtividade da massa seca do colmo (PMS colmo), da folha (PMS folha) e da panícula (PMS panícula) na produtividade de massa seca total (PMS) nos estádios fenológicos do sorgo sacarino BRS 511.

Entretanto, ressalta-se que as PMF's colmo de cada estágio, mesmo que sejam estatisticamente semelhantes, resultam em rendimentos de açúcar (e consequentemente etanol) diferentes, quando associadas a outras características industriais (taxa de extração de caldo e Brix) utilizadas para predição de produtividade. Nos estádios de grão duro (122 DAP) e senescência (130 DAP) observaram-se menores PMF's colmo ( $96 \text{ t ha}^{-1}$  e  $87 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente) em função da menor umidade do colmo (Figura 7.b). Embora não difiram estatisticamente da produtividade de massa fresca de colmo registrada nos demais estádios fenológicos, observa-se uma

redução expressiva da produtividade em termos de toneladas de colmo produzidas por hectare, sendo de 17 t ha<sup>-1</sup> a diferença entre a maior e a menor PMF's colmo registradas. Ressalta-se que a maior produtividade de massa fresca do colmo está diretamente relacionada à maior produção de caldo. É fundamental identificar o(s) estágio(s) em que há maior PMF colmo para que se determine adequadamente o ponto de colheita para sorgo sacarino, explorando o potencial produtivo da cultura.

A produtividade de massa fresca de folha (PMF folha) e produtividade de massa fresca de panícula (PMF panícula) corresponderam à 13% e 3% da produtividade de massa fresca total, respectivamente. A PMF folha manteve-se constante entre os estádios de emborrachamento (67 DAP) e grão farináceo (112 DAP), com média de 17 t ha<sup>-1</sup>, reduzindo apenas nos estádios de grão duro (122 DAP) e senescência (130 DAP). Tal redução deve-se à desidratação das folhas e abscisão das mesmas, decorrente do processo de senescência natural da planta (Figura 6.a).

As maiores PMF's panícula ocorreram nos estádios de grão pastoso (101 DAP) e grão farináceo (112 DAP), com média de 5,5 t ha<sup>-1</sup>, coincidindo com a maturidade fisiológica. Nos estádios seguintes (grão duro- 122 DAP e senescência- 130 DAP) houve redução das PMF's panícula decorrente da desidratação, uma vez que a massa seca dos grãos não foi alterada. No processo de maturação, o grão atua como um dreno preferencial e com isso há consumo de reservas do colmo e translocação de assimilados para ele. Logo é interessante que a panícula apresente menor massa de grãos minimizando uma possível redução da concentração de açúcares presentes no colmo. Essa redução refletiria em menor rendimento de etanol por tonelada de colmo processada, visto que o etanol é proveniente da fermentação dos açúcares.

A menor produtividade de massa seca do colmo (PMS colmo) foi observada no emborrachamento (69 DAP), com 14 t ha<sup>-1</sup>. Do florescimento (75 DAP) ao estágio de grão duro (122 DAP) ocorreram as maiores PMS, sendo a máxima registrada de 25 t ha<sup>-1</sup> no estágio de grão farináceo (112 DAP) (Figura 6.b). A maior produtividade de massa seca do colmo observada no estágio de grão farináceo pode ser atribuída à maturidade fisiológica, período no qual a planta exibe a massa seca máxima. Tal valor foi estatisticamente semelhante a 24 t ha<sup>-1</sup> registrado no estágio de grão duro, evidenciando que cessaram-se os ganhos de massa seca e indicando tendência da redução da PMS na senescência (130 DAP).

As maiores produtividades de massa seca de folha (PMS folha) e massa seca de panícula (PMS panícula) foram pouco expressivas quando comparadas à máxima

produtividade de massa seca de colmo (PMS colmo). Registrou-se o valor de 5 t ha<sup>-1</sup> para a PMS folha e 3 t ha<sup>-1</sup> para a PMS panícula (Figura 6.b). A maior participação da massa seca de colmos na produtividade de massa seca total (PMS) permite maior aproveitamento dos colmos, uma vez que após a extração do caldo, o “resíduo” (bagaço) pode ser empregado para queima nas caldeiras das usinas (geração de vapor/cogeração de energia); alimentação de animais (silagem) ou geração de etanol lignocelulósico.

### **3.1.2- Número de folhas (NF), altura de planta (AP) e diâmetro do colmo (DC)**

Avaliaram-se NF, AP e DC para melhor caracterização do crescimento vegetativo da cultura (Tabela 1). Observou-se o número médio de 12 folhas a partir do estágio de emborrachamento (69 DAP), sendo que este valor não variou significativamente nos estádios fenológicos seguintes, evidenciando que o número de folhas já havia sido definido neste estágio. O sorgo é uma planta C4 com alta eficiência fotossintética (Almodares e Hadi, 2009) e o processo fotossintético, responsável pela produção de açúcares presentes no caldo, ocorre majoritariamente nas folhas. Quanto maior a concentração de açúcares no caldo maior será a quantidade de etanol obtida a partir da conversão destes açúcares. Logo, a quantidade de folhas presente no colmo influencia indiretamente o rendimento de etanol obtido a partir do caldo.

Observou-se a média de altura de planta de 3,25m entre os estádios fenológicos. Segundo Murray et al. (2008), a altura da planta de sorgo está altamente correlacionada ao rendimento da biomassa. Ritter et al. (2008) afirmam que plantas mais altas possuem maior biomassa nos colmos, nos quais acumulam os açúcares. Em um estudo avaliando a relação entre a altura de planta e o acúmulo de açúcar em colmos de sorgo sacarino, Shukla et al. (2017) observaram que plantas que exibem maturação tardia tendem a ser mais altas e a conter maior concentração de açúcares solúveis em seus colmos. Os autores mencionam que estudos anteriores descrevem uma relação positiva entre altura e acúmulo de açúcar, o que reflete na produtividade de etanol. Shukla et al. (2017) constataram ainda que a altura de planta influencia no volume de caldo, uma vez que este volume é dependente da biomassa de colmo que, por sua vez, é dependente da altura.

**Tabela 1.** Médias do número de folhas (NF), altura de planta (AP) e diâmetro do colmo (DC) em sete estádios fenológicos em sorgo sacarino (BRS 511). Viçosa, MG.

<b>Tratamento</b>	<b>NF</b>	<b>AP (m)</b>	<b>DC (mm)</b>
1- Emborrachamento	12,07 a	3,18 b	19,62 b
2- Florescimento	13,26 a	3,45 a	21,67 a
3- Grão Leitoso	12,76 a	3,20 b	22,48 a
4- Grão Pastoso	12,92 a	3,32 a	22,15 a
5- Grão Farináceo	12,80 a	3,32 a	21,79 a
6- Grão Duro	12,98 a	3,13 b	21,38 a
7- Senescência	12,58 a	3,10 b	19,24 b
Média	12,77	3,25	21,19

\*Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

A média para o diâmetro do colmo foi de 21,20 mm (Tabela 1). O DC apresentou pequena variação nos estádios iniciais da cultura, mas permaneceu similar a partir do florescimento (75 DAP). Houve ligeira redução no estágio de senescência (130 DAP) atribuída à perda de água. Colmos que apresentam diâmetros maiores provavelmente apresentam maior massa fresca e possivelmente maior quantidade de caldo, o que pode refletir em maior rendimento de etanol.

### **3.2- Evolução da maturação da cultura**

#### **3.2.1- Taxa de extração de caldo do colmo (TE)**

A taxa de extração de caldo do colmo (TE) é uma das variáveis que exibe grande influência na exploração do potencial produtivo do sorgo sacarino. Indica, em termos percentuais, quanto do caldo presente no colmo pode ser extraído. TE variou de 62 a 69% ao longo dos estádios fenológicos (Figura 7.a). Obtiveram-se as maiores taxas de extração entre o estágio de emborrachamento (69 DAP) e o de grão pastoso (101 DAP), sendo de 69% a TE deste último estágio. Observaram-se menores TE's nos estádios seguintes (grão farináceo- 112 DAP, grão duro- 122 DAP e senescência- 130 DAP), sendo o menor valor registrado no estágio de grão duro com 62%.

Esperava-se que quanto maior fosse a umidade do colmo maior volume de caldo seria potencialmente extraído. Entretanto, observou-se que os estádios de

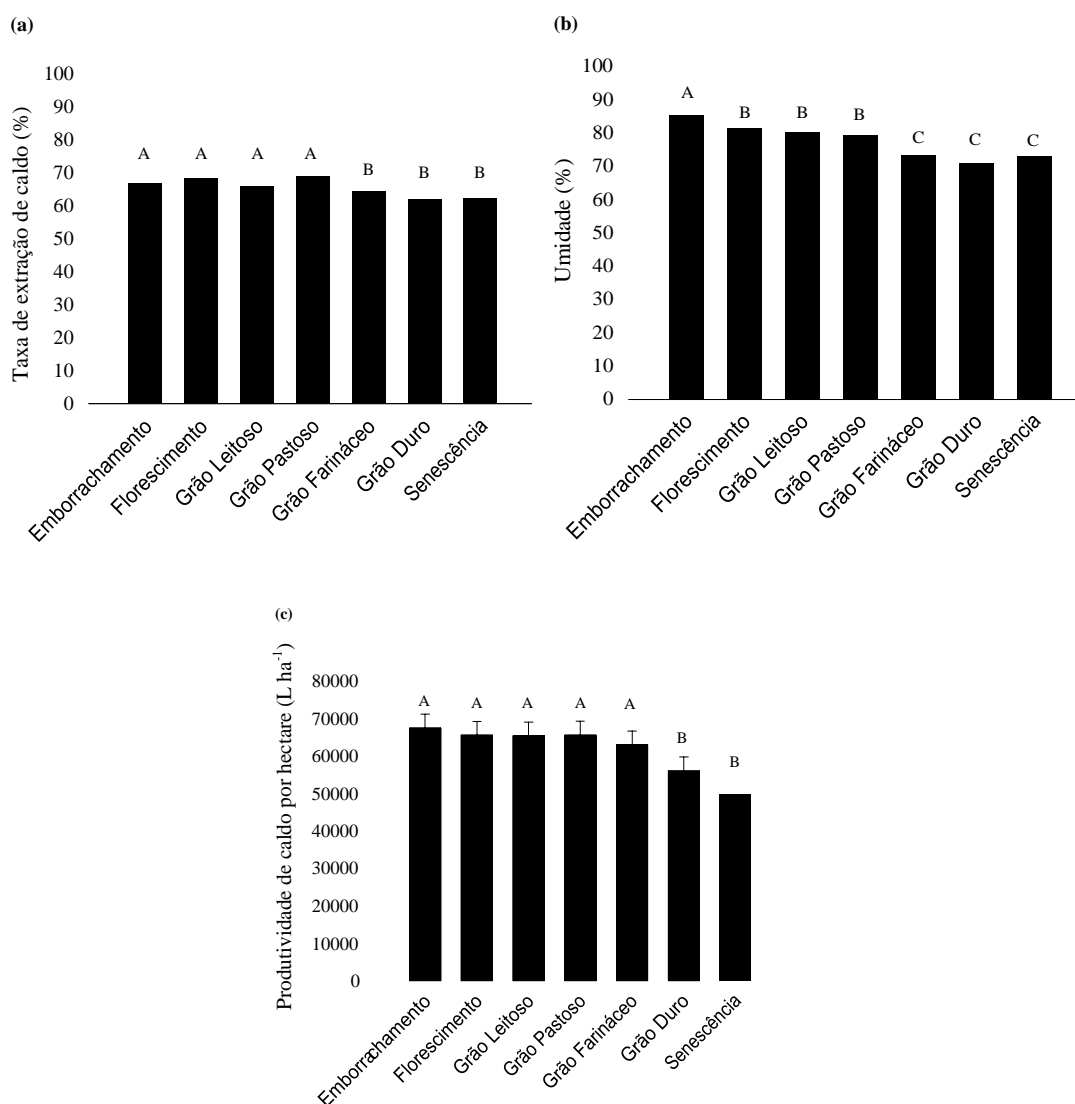
florescimento (75 DAP), grão leitoso (87 DAP) e grão pastoso (101 DAP) registraram menor umidade do colmo que o estágio de emborrachamento (Figura 6b), mas exibiram uma taxa de extração semelhante à obtida no emborrachamento. Acredita-se que o sorgo sacarino BRS 511 apresente taxa de extração de caldo similar entre os estádios de emborrachamento ao grão pastoso e que isso possivelmente esteja relacionado à fenologia da planta. A menor taxa de extração observada nos estádios de grão farináceo, grão duro e senescência pode ser atribuída à redução mais acentuada do teor de umidade. De modo geral, para se obter uma taxa de extração do caldo de 67,5% é preciso que a umidade do colmo seja igual ou superior a 80%, aproximadamente.

Ressalta-se que o percentual de umidade não indica quanto do caldo é de fato extraído. Uma planta menos hidratada exibirá maior concentração de açúcares em função da menor quantidade de água (e não devido ao aumento da quantidade de açúcares). A umidade da planta é bastante influenciada por fatores ambientais como temperatura, precipitação e umidade do ar. A umidade não exibe relação direta com a quantificação dos rendimentos do sorgo sacarino, mas pode ser usada indiretamente por influenciar características industriais consideradas para definição do ponto de colheita.

### **3.2.2- Produtividade de caldo por hectare (PCH)**

O volume de caldo extraído, associado à produtividade de massa fresca do colmo, reflete na produtividade de caldo por hectare (PCH). Quanto maior o volume de biomassa fresca colmos produzida maior será o volume de caldo obtido por tonelada de colmo processada. Obtiveram-se as maiores produtividades de caldo entre os estádios de emborrachamento (69 DAP) ao grão farináceo (112 DAP), com o valor máximo de 67.600 L ha<sup>-1</sup> (Figura 7.c). Uma vez que a PCH não diferiu significativamente no período compreendendo o estágio de emborrachamento ao grão farináceo (Figura 7.c), infere-se que a realização da colheita em qualquer um destes estádios fenológicos (emborrachamento- 69 DAP, florescimento- 75 DAP, grão leitoso- 101 DAP, grão pastoso- 101 DAP e grão farináceo- 112 DAP) resultaria em rendimentos de caldo semelhantes e mais satisfatórios. Ressalta-se que as altas médias de produtividade de caldo por hectare estão relacionadas à elevada produtividade de

massa fresca do colmo estimada, considerando-se uma população de plantas homogênea, conforme discutido no item 3.1.1.



**Figura 7.** (a) Taxa de extração de caldo do colmo (TE); (b) Percentual de umidade do colmo (c) Produtividade de caldo por hectare (PCH), em L ha<sup>-1</sup>, do caldo extraído do colmo de sorgo sacarino BRS 511 ao longo dos estádios fenológicos. Médias (em barras) seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

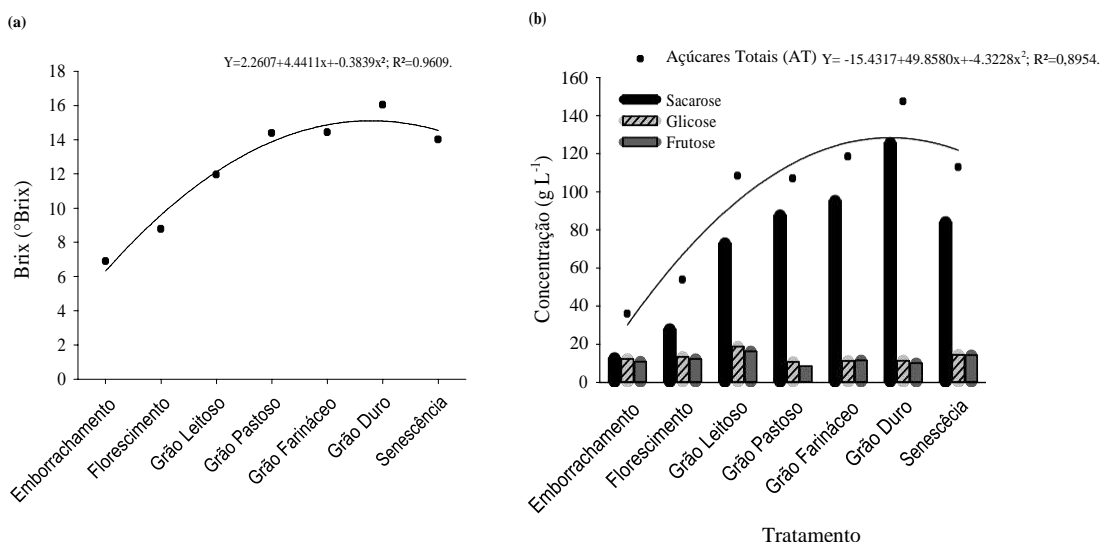
A PCH foi menor nos estádios de grão duro (122 DAP) e senescência (130 DAP), com 56.134 L ha<sup>-1</sup> e 50.074 L ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Isso confirma que embora as produtividades de massa fresca do colmo dos estádios fenológicos estudados tenham sido estatisticamente semelhantes, as variações existentes entre elas resultam em rendimentos de caldo diferentes. Ressalta-se que para sorgo sacarino o maior

volume de caldo nem sempre configura em maior produção de açúcares e, portanto, de etanol (Pereira Filho et al., 2013).

### 3.2.3- Concentração dos açúcares

Além da obtenção de elevados percentuais de extração do caldo do colmo de sorgo sacarino, é importante que a concentração de açúcares no caldo seja a maior possível. A concentração dos açúcares é frequentemente determinada a partir da medição do Brix que corresponde ao teor de sólidos solúveis totais no caldo e apresenta alta correlação com o teor de açúcares totais no caldo (Teetor et al., 2011).

O Brix foi crescente a partir do estágio de emborrachamento (69 DAP) e atingiu o valor máximo entre os estádios de grão pastoso (101 DAP) e grão farináceo (112 DAP) com 15° Brix, conforme indicado pelo ponto de inflexão da curva (Figura 8.a). Do ponto de vista biológico, qualquer acréscimo além do ponto máximo da fase log não é significativo.



**Figura 8.** (a) Concentração de açúcares (em graus Brix- °Brix) e (b) Participação, em g L<sup>-1</sup>, de sacarose, glicose e frutose na concentração de açúcares totais (AT) no caldo do sorgo sacarino BRS 511 ao longo dos estádios fenológicos.

O aumento da concentração de açúcares no colmo foi mais expressivo a partir do estágio de florescimento (75 DAP), corroborando com Parrella et al. (2014) que afirmam que o acúmulo de açúcares no colmo ocorre após o florescimento. Após o estágio de grão duro percebeu-se tendência de redução do Brix do caldo, registrando-

se um Brix próximo a 14 °Brix na senescência (130 DAP). Por ser de fácil medição e apresentar alta correlação com a concentração de açúcares solúveis no caldo, o Brix é amplamente utilizado pelas indústrias sucroalcooleiras para estimar o conteúdo de açúcar no colmo (Tsuchihashi e Goto, 2004). Observou-se uma relação linear entre a concentração de açúcares totais e o Brix do caldo, como registrado por Guigou et al. (2011) ao avaliar a produção de etanol a partir de sorgo sacarino. Tal relação confere credibilidade ao Brix como um dos parâmetros importantes à predição dos rendimentos de etanol.

### **3.2.4- Açúcares totais (AT)**

Observou-se a participação de sacarose, glicose e frutose na concentração de açúcares totais (AT) no caldo do sorgo sacarino BRS 511 ao longo dos estádios fenológicos (Figura 8.b). Conforme observada a alta correlação linear positiva ( $r=0,9712$ ) entre a concentração de AT e Brix, ambos exibiram comportamentos similares. A concentração de AT foi crescente a partir do estádio de emborrachamento (69 DAP), atingindo-se o máximo de  $130 \text{ g L}^{-1}$  entre os estádios de grão pastoso (101 DAP) e grão farináceo (112 DAP). Após o estádio de grão duro houve redução da concentração dos açúcares totais, registrando-se  $112 \text{ g L}^{-1}$  na no estádio de senescência (130 DAP).

Houve incrementos na concentração de sacarose a partir do estádio de emborrachamento, atingindo o valor de  $125 \text{ g L}^{-1}$  entre os estádios de grão pastoso e grão farináceo, coincidindo com a mesma época da máxima concentração de açúcares totais. Zegada-Lizarazu e Monti (2012) afirmam que as concentrações de sacarose aumentam rapidamente após o florescimento (75 DAP). A máxima concentração de glicose ocorreu no estádio de grão leitoso (87 DAP) com  $19 \text{ g L}^{-1}$ . Nos demais estádios fenológicos a concentração não diferiu estatisticamente, apresentado o valor médio de  $12 \text{ g L}^{-1}$ . A maior concentração de frutose também ocorreu no estádio de grão leitoso sendo de  $16 \text{ g L}^{-1}$ . Tal valor não diferiu estatisticamente de  $14 \text{ g L}^{-1}$ , concentração observada no estádio de senescência. Os demais estádios exibiram menores concentrações de frutose, com média de  $10 \text{ g L}^{-1}$ . Comportamento similar das concentrações dos açúcares foi observado por Guigou et al. (2011) em que se registrou, no caldo de sorgo sacarino, concentração de sacarose muito superior às de glicose e frutose, as quais mantiveram uma proporcionalidade próxima a 1:1. Almodares e

Haidi (2009) constataram que a produção de etanol a partir dos açúcares contidos no caldo do colmo de sorgo de sacarino (sacarose e açúcares invertidos) é viável, uma vez que estes açúcares são facilmente convertidos em etanol.

Pontua-se que, para o processo de fermentação realizado nas usinas, é desejável que o material apresente um Brix médio de 15° Brix, o que corresponde a um percentual aproximado de 12,5% de açúcares totais. Este valor de Brix reflete em rendimentos maiores. Materiais com Brix inferior a 15° Brix são inviáveis, uma vez que demandam energia adicional para concentrar mais o caldo.

### **3.2.5- Toneladas de Brix por hectare (TBH)**

Associando-se o Brix à produtividade de massa fresca de colmo e à taxa de extração de caldo é possível prever em qual época do ciclo da cultura obtém-se os rendimentos máximos de açúcar e, conseqüentemente, etanol, definindo-se portanto o estágio para se realizar a colheita. Segundo Fiorini et al. (2016) o índice multiplicativo TBH (toneladas de Brix por hectare) tem se destacado em programas de melhoramento de sorgo sacarino por abranger caracteres que influenciam diretamente na produção de etanol por hectare, foco principal da utilização de sorgo sacarino. Analisando características agroindustriais em 45 genótipos de sorgo sacarino, Lombardi et al. (2015) afirmam que dentre as principais variáveis que afetam o rendimento de etanol em sorgo sacarino, o TBH apresentou o maior efeito direto sobre a produtividade e exibe acentuada correlação linear positiva com a mesma. Ressalta ainda que a seleção para rendimentos de etanol com base no TBH é viável. A variável TBH pode ser utilizada como um indicador prático e eficiente da produtividade de etanol, associando informações relativas aos potenciais agronômicos e tecnológicos (Tsuchihashi e Goto, 2004). O TBH obtido em cada estágio fenológico é apresentado na Tabela 2.

A partir do estágio de emborrachamento (69 DAP), observaram-se incrementos nas toneladas de Brix por hectare (TBH). Atingiu-se o máximo TBH no estágio de grão pastoso (101 DAP), sendo de 9,82 t °Brix ha<sup>-1</sup> (Tabela 2), mas tal valor não diferiu significativamente daqueles encontrados para os estágios seguintes de grão farináceo (112 DAP) e grão duro (122 DAP) (9,02 e 9,37 t °Brix ha<sup>-1</sup>, respectivamente). O fato de as diferenças de rendimento de açúcar, representado pelo TBH, não serem significativas entre os estágios de grão pastoso ao grão duro é bastante interessante às usinas sucroalcooleiras. Já que o TBH se mantém entre estes três estágios

consecutivos, é possível que se escalone a colheita com um “timing” mais flexível sem comprometer os rendimentos de açúcar (e consequentemente os rendimentos de etanol), mantendo-se elevados os padrões produtivos. Infere-se que o PUI para a cultivar BRS 511 seja em torno de 21 dias. Observa-se que o ponto de colheita para o sorgo sacarino BRS 511 corresponde ao período composto pelos estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro.

**Tabela 2.** Índice toneladas de Brix por hectare –TBH (t °Brix ha<sup>-1</sup>) e seus componentes: produtividade de massa fresca de colmo –PMF colmo (t ha<sup>-1</sup>); taxa de extração de caldo –TE (%) e concentração de açúcares totais –Brix (°Brix) avaliadas em sete estádios fenológicos do sorgo sacarino BRS 511.

Tratamento	PMF colmo (t ha <sup>-1</sup> )	TE (%)	Brix (°Brix)	TBH (t °Brix ha <sup>-1</sup> )
1- Emborrachamento	103,51 a	66,83 a	6,88 e	4,75 c
2- Florescimento	101,13 a	68,11 a	8,78 d	6,00 c
3- Grão Leitoso	104,43 a	66,00 a	11,95 c	7,39 b
4- Grão Pastoso	101,53 a	68,89 a	14,38 b	9,82 a
5- Grão Farináceo	103,10 a	64,27 b	14,43 b	9,02 a
6- Grão Duro	96,36 a	61,98 b	16,03 a	9,37 a
7- Senescência	87,12 a	62,34 b	14,00 b	7,34 b
Média	99,60	65,32	12,00	7,67

\*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott. Viçosa, MG.

O fato de se obter o máximo rendimento de toneladas de Brix por hectare (TBH) nos estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro não indica que nestes estádios obteve-se o ótimo produtivo para todas as variáveis (PMF colmo, TE e Brix), mas que a combinação das mesmas resulta na expressão do máximo potencial produtivo naquelas condições. Logo, ressalta-se a importância da análise das variáveis em conjunto a fim de se obter uma determinação mais acurada do rendimento de açúcar e, consequentemente, de etanol, em cada um dos estádios fenológicos. Entretanto, observou-se que dentre os componentes do TBH, o Brix é a variável que apresentou maior correlação linear positiva com este índice, com  $r= 0,9314$ .

Do estágio de emborrachamento ao estágio de grão duro observou-se que os valores de Brix apresentaram certa proporcionalidade aos valores de TBH, sendo que onde obteve-se o menor Brix registrou-se também o menor TBH; e onde houve o maior

Brix registrou-se também maior TBH. Tsuchihashi e Goto (2004), em um trabalho envolvendo a determinação do ponto de colheita em sorgo sacarino, afirmam que o pico da concentração de açúcar, e conseqüentemente a época ótima de colheita, poderia ser determinado com base na medição do Brix do caldo do colmo. Os referidos autores afirmam que as medições deveriam iniciar cerca de trinta dias após a antese (DAA) e continuarem até que o pico seja determinado. Ou seja, o ponto de colheita é determinado medindo-se o Brix 30 DAA, que ocorreu aos 103 dias após o plantio (DAP). Os resultados do presente trabalho corroboram com Tsuchihashi e Goto (2004), sendo que os maiores valores de Brix ocorreram entre os estádios de grão pastoso (26 DAA e 101 DAP) e grão duro (47 DAA e 122 DAP), registrando-se a média de 15° Brix.

Considerando-se a correlação linear positiva obtida entre Brix e TBH ( $r=0,9314$ ) e o comportamento dessas variáveis entre os estádios fenológicos de emborrachamento ao grão duro, infere-se que o Brix pode ser utilizado como uma maneira simples de inferência quanto à grandeza dos rendimentos de açúcar (TBH) que será obtido em dado estágio e, com isso, determinar-se o ponto de colheita. Ressalta-se que a medição exclusivamente do Brix serve como um modo qualitativo de prever o ponto de colheita, mas em termos quantitativos as demais variáveis, principalmente produtividade de massa fresca do colmo e taxa de extração de caldo, devem ser analisadas e consideradas para quantificação mais precisa dos rendimentos de açúcar/etanol e definição da época ideal de colheita.

### **3.3- Análise do Brix dos entrenós versus o Brix do colmo inteiro para validar estratégias de amostragem e subsidiar tomada de decisão para colheita**

Uma vez observado que o Brix apresenta alta correlação com o rendimento de açúcar (e por conseqüência, etanol) e que ele pode ser usado como ferramenta auxiliar para determinação do ponto de colheita, é imprescindível que sua medição seja feita de maneira correta.

Para todos os estádios fenológicos estudados, observou-se um padrão similar de distribuição dos açúcares ao longo do colmo. A concentração de açúcares (Brix) assumiu um comportamento quadrático (Figura 9.a); aumentando a partir dos entrenós mais basais, atingindo-se o máximo nos entrenós do terço médio e reduzindo-se nos

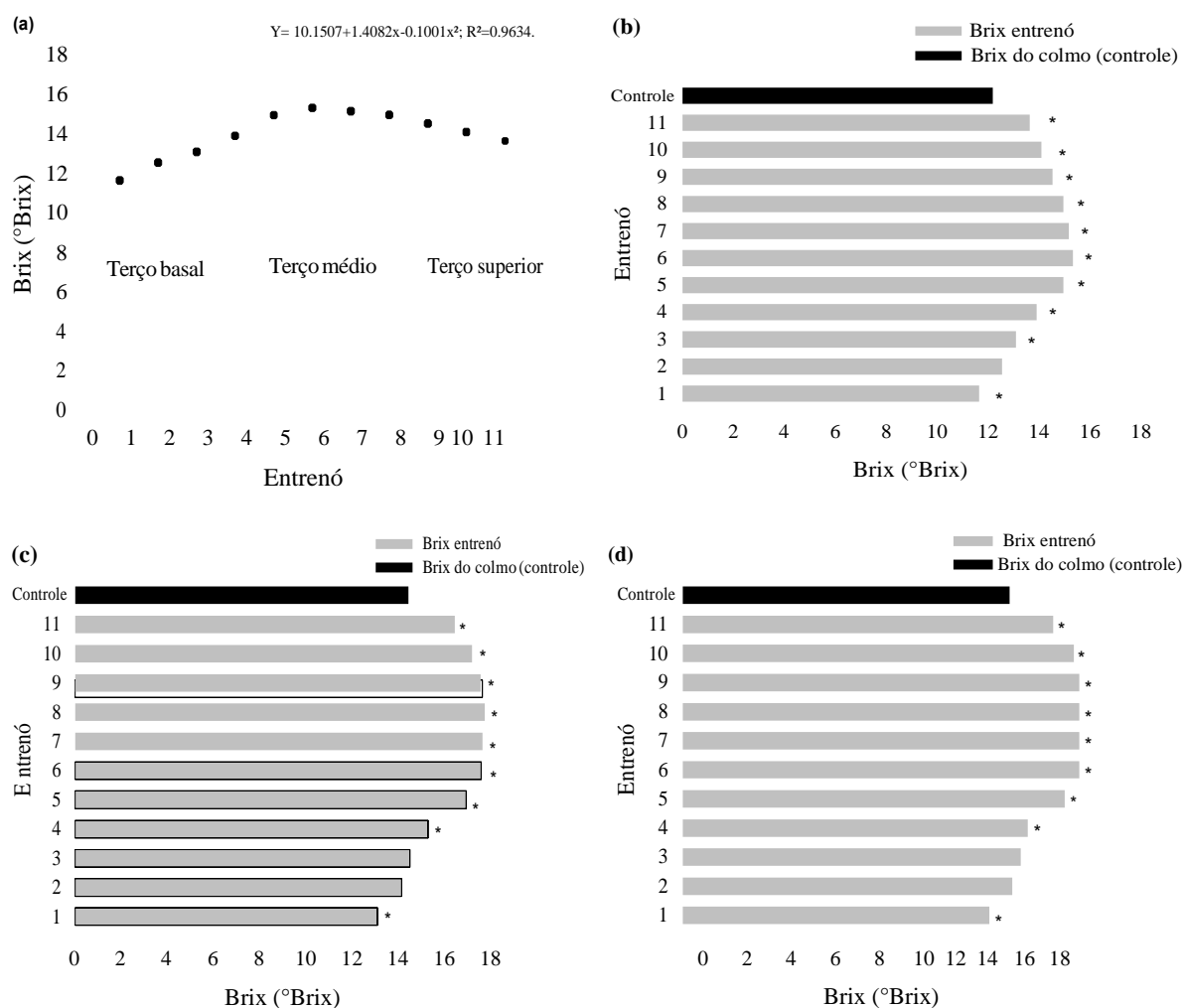
entrenós do terço superior. O maior Brix ocorreu no terço médio do colmo, região que é usualmente amostrada para avaliação do Brix da planta. Apesar da região mediana apresentar o maior valor de Brix, este valor não representa o Brix real obtido do colmo inteiro (Figura 9.a).

Em todos os estádios fenológicos, comparou-se o Brix obtido do caldo de cada um dos entrenós do colmo com o Brix obtido do caldo extraído do colmo inteiro (sem individualização das partes). Considerando-se todos os estádios fenológicos, o único entrenó cujo Brix não diferiu significativamente do Brix do colmo foi o entrenó 2 (Figura 9.b).

Conforme observado que a época ideal de colheita para o sorgo sacarino BRS 511 compreende os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, comparou-se o Brix do caldo dos entrenós (BE) e o Brix do caldo do colmo (BC) considerando-se apenas estes estádios. Observou-se que o Brix dos entrenós 2 e 3 não diferiram significativamente do BC (Figura 9.c), logo poderiam ser a seção amostrada para medição do Brix.

Ao reduzir as épocas de amostragem e considerando-se apenas os estádios fenológicos de grão farináceo e grão duro, observou-se que o padrão foi mantido, sendo que o Brix do caldo dos entrenós 2 e 3 foram os únicos que não diferiram significativamente do Brix do caldo do colmo (Figura 9.d).

O terço médio (Figura 4) onde atualmente se faz a amostragem para medição do Brix, é a região do colmo em que há maior acúmulo de açúcares e conseqüentemente apresenta maior valor de Brix. Entretanto, o Brix obtido no terço médio não correspondeu ao Brix apresentado pelo caldo extraído do colmo inteiro. As regiões do terço basal e terço superior do colmo (Figura 4) apresentaram menor Brix em comparação ao Brix do terço do médio.



**Figura 9.** (a) Concentração de açúcares (Brix) ao longo dos entrenós do colmo do sorgo sacarino BRS 511. Entrenós enumerados a partir da base do colmo. Divisão do colmo em terço basal (mais próximo às raízes), terço médio e terço superior (mais próximo à panícula). (b,c,d) Comparação entre a concentração de açúcares (Brix) de cada entrenó e a concentração de açúcares (Brix) do colmo inteiro (Controle), sem individualização dos entrenós. Comparações feitas entre o Brix do colmo inteiro (Controle) e (b) todos os estádios fenológicos estudados; (c) apenas os estádios fenológicos de **grão pastoso, grão farináceo e grão duro** e (d) apenas os estádios fenológicos de **grão farináceo e grão duro**. Concentração medida em graus Brix (°Brix). Os entrenós foram enumerados do 1 ao 11 a partir da base do colmo. Barras seguidas por asterisco (\*) diferem significativamente do Brix do colmo (Controle) ao nível de 5% de significância pelo teste Dunnett.

Logo, ao extrair-se o caldo do colmo, o alto valor obtido para o Brix do terço médio é diluído pelos menores valores das outras regiões. Acredita-se que os rendimentos industriais insatisfatórios do sorgo sacarino resultem da incorreta estimativa do Brix do colmo. Considerando-se o Brix do caldo obtido no terço médio

do colmo ocorre uma superestimação do conteúdo de açúcar no colmo e consequentemente superestima-se a produtividade de etanol.

Considerando-se todos os estádios fenológicos, o único entrenó cujo Brix do caldo não diferiu significativamente do Brix do caldo do colmo foi o entrenó 2, situado no terço basal. Considerando-se a época de colheita, compreendida entre os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, os únicos entrenós cujos Brix do caldo não diferiram do Brix do caldo do colmo foram os entrenós 2 e 3 (terço basal), devendo portanto ser região do colmo amostrada para medição do Brix.

Ressalta-se que os resultados obtidos neste estudo são válidos para o híbrido de sorgo sacarino BRS 511 nas condições experimentais anteriormente descritas. Estudos complementares com outros genótipos e em diferentes condições são interessantes para comparação entre os resultados e possível estabelecimento de padrões de colheita para sorgo sacarino.

#### 4. CONCLUSÕES

O ponto de colheita para o sorgo sacarino (cultivar BRS 511) é no período correspondente aos estádios de grão pastoso (101 dias após o plantio-DAP), grão farináceo (112 DAP) e grão duro (122 DAP). Referenciado pelas toneladas de Brix por hectare (TBH), conclui-se que neste período há o máximo rendimento industrial da cultura. Ressalta-se que a definição do ponto de colheita resultou da avaliação conjunta da produtividade de massa fresca de colmos, taxa de extração de caldo e Brix do colmo e que estas variáveis não necessariamente apresentaram seu máximo valor se observadas isoladamente, mas a interação entre elas nos estádios de grão pastoso ao grão farináceo resultou no maior rendimento industrial.

A medição do Brix do entrenó pode ser utilizada como um indicador qualitativo do grau de maturação do colmo, para a cultivar de sorgo sacarino BRS 511, permitindo-se a determinação do ponto de colheita. Considerando-se todos os estádios fenológicos, deve-se amostrar o entrenó 2 para avaliação do Brix do colmo. Considerando-se apenas os estádios de grão pastoso ao grão duro, deve-se amostrar o segmento do colmo composto pelos entrenós 2 e 3, enumerados a partir do solo, uma vez que representam a única seção cujo Brix não diferiu significativamente do Brix do caldo extraído do colmo inteiro.

## 5. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, C. J. B., Tardin, F. D., Parrella, R. A. C., Guimarães, A. de S., Oliveira, R. M., Silva, K. M. de J., 2012. Sorgo sacarino em diferentes arranjos de plantas e localidades de Minas Gerais, Brasil. *Rev. Bras. de Milho e Sorgo*, 11(1), 69-85.
- Almodares, A., Taheri, R., Adeli, S., 2008. Stalk yield and carbohydrate composition of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] cultivars and lines at different growth stages. *J. Malesian Appl. Biol.*, 37, 31-36.
- Almodares, A., Hadi, M. R., 2009. Production of bioethanol from sweet sorghum: A Review. *Afr. J. of Agric. Res.*, 4(9), 772-780. Doi: [www.academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/6DDEDD738826](http://www.academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/6DDEDD738826).
- Embrapa- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. *Rev. Atual*, 7, 212.
- Embrapa- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2012. BRS 511: O sorgo sacarino com alto potencial de colmos.
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Wyman, C. E., 2005. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Bioresource Technology*, 96, 985-1002.
- Guigou, M., Lareo, C., Pérez, L. V., Lluberas, M. E., Vázquez, D., Ferrari, M. D., 2011. Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. *Biomass Bioenergy*, 35(7), 3058-3062. Doi: 0.1016/j.biombioe.2011.04.028.
- Fiorini, I. V. A., Pinho, R. G. V., Resende, E. L., Santos, A. de O., Júnior, L. A. Y. B., Borges, I. D., Pires, L. P. M. P., 2016. Produtividade de sorgo sacarino em função de populações de plantas e épocas de corte. *Rev. Bras. Milho e Sorgo*, 15(1), 105-113. Doi: [dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p105-113](http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p105-113).
- Hidema, J., Makino, A., Mae, T., Ojima, K., 1991. Photosynthetic Characteristics of Rice Leaves Aged under Different Irradiances from Full Expansion through Senescence. *Plant Physiol.*, 97, 1287-1293. Doi: 10.1104/pp.97.4.1287.
- Lombardi, G. M. R., Nunes, J. A. R., Parrella, R. A. C., Teixeira, D. H. L., Bruzi, A. T., Durães, N. N. L., Fagundes, T. G., 2015. Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. *Genet. Mol. Res.*, 14 (4), 16392-16402. Doi: [dx.doi.org/10.4238/2015.December.9.8](http://dx.doi.org/10.4238/2015.December.9.8)
- May, A (Ed), 2013. Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais. *Circular Técnica* 186, 1-36.
- MME- Ministério de Minas e Energia, 2016. *Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2015.*

- Murray, S.C., Sharm, A., Rooney, W. L., Klein, P. E., Mullet, J. E., Mitchell, S. E., Kresovich, S., 2008. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I.QTL for stem sugar and grain non-structural carbohydrates. *Crop Sci.*, 48, 2165-2179. Doi: 10.2135/cropsci2008.01.0016.
- Parrella, R. A. C., Menezes, C. B., Rodrigues, J. A. S., Tardin, F. D., Parrella, N. N. L. D., Schaffert, R. E., 2014. Cultivares. In: Borém, A., Pimentel, L. D., Parrella, R. A. C. (ed.). *Sorgo: do plantio à colheita*. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap. 7, p. 169-187.
- Pereira Filho, I. A., Parrella, R. A. C., Moreira, J. A. A., May, A., Souza, V. F. de, Cruz, J. C., 2013. Avaliação de cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em diferentes densidades de semeadura visando a características importantes na produção de etanol. *Rev. Bras. Milho e Sorgo*, 12(2), 118-127. Doi: dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v12n2p118-127.
- Regassa, T. H., Wortmann, C. S., 2014. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. *Biomass Bioenergy*, 64, 348-355. Doi: dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052.
- Ritter, K. B., Jordan, D. R., Chapman, S. C., Godwin, I. D., Mace, E. S., McIntyre, C. L., 2008. Identification of QTL for sugar-related traits in a sweet x grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) recombinant inbred population. *Mol. Breeding*, 22, 367-384.
- Schaffert, R. E., Parrella, R. A. C., May, A., Durães, F. O. M., 2011. Metas de rendimento e qualidade de sorgo sacarino. *Agroenergia em Revista*, 2(3), 47.
- Shukla, S., Felderhoff, T. J., Saballos, A., Vermerris, W., 2017. The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research*, 203, 181-191.
- Teetor, V. H., Duclos, D. V., Wittenberg, E. T., Young, K. M., Chawhuaymak, J., Riley, M. R., Ray, D. T., 2011. Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. *Ind. Crops Prod.*, 34, 1293-1300. Doi: doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.010.
- Tsuchihashi, N., Goto, Y., 2004. Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia. *Plant Prod. Sci.*, 7(4), 442-448. Doi: dx.doi.org/10.1626/pps.7.442.
- Zegada-Lizarazu, W., Monti, A., 2012. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices. *Biomass Bioenergy* 40, 1-12. Doi: 10.1016/j.biombioe.2012.01.048.

## **CAPÍTULO II:**

### **CARACTERIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE SORGO BIOMASSA VISANDO A DEFINIÇÃO DO PONTO DE COLHEITA**

#### **RESUMO**

O sorgo biomassa [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tem sido estudado como matéria-prima para geração de bioenergia. Trata-se de uma planta C4, com elevada produção de biomassa em curto ciclo de desenvolvimento e com alto poder calorífico. Massa seca e umidade são variáveis que influenciam consideravelmente o rendimento energético desta cultura nas usinas. Acredita-se que o máximo acúmulo de massa seca coincida com elevado teor de umidade. Supõe-se que a permanência da planta à campo para o favorecimento da desidratação natural, após certo período, pode acarretar o consumo de massa seca. Neste sentido, objetivou-se caracterizar o comportamento da biomassa, umidade e poder calorífico ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento do sorgo biomassa, visando a definição do ponto ideal de colheita que maximize o rendimento industrial na cogeração de bioeletricidade. O experimento foi realizado em condições de campo, utilizando-se o híbrido de sorgo biomassa BRS 716. Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com cinco repetições e sete tratamentos. Os tratamentos constituíram-se das diferentes épocas de amostragem conforme os estádios fenológicos da cultura: emborrachamento, florescimento, grão leitoso, grão pastoso, grão farináceo, grão duro e senescência. Foram avaliadas as produtividades de massa fresca e seca (total e das partes), número de folhas, altura de planta, diâmetro do colmo, umidade, poder calorífico superior e energia potencial da biomassa. A produtividade de massa fresca total (PMF) foi crescente a partir dos estádios iniciais de avaliação e atingiu o máximo de 229 t ha<sup>-1</sup>, no estádio de grão farináceo. Este valor não diferiu significativamente das PMF's registradas nos estádios de emborrachamento, grão pastoso, grão duro e senescência. As PMF's obtidas nos estádios de florescimento e grão leitoso foram estatisticamente inferiores às demais, com média de 158 t ha<sup>-1</sup>. A produtividade de massa seca total (PMS) aumentou a partir dos estádios iniciais de avaliação e atingiu o máximo de 75,5 t ha<sup>-1</sup> no estádio de grão farináceo, coincidindo com a menor umidade registrada que foi de 67%, estando acima do valor ideal que seria próximo a

50%. A massa seca reduziu após atingir o pico de produtividade, confirmando a hipótese de que caso a planta permaneça à campo após certo período, identificado como o estágio de grão farináceo, haverá perdas na massa seca acumulada. O poder calorífico superior (PCS) foi similar para a maioria dos estádios fenológicos, sobressaindo-se os estádios de grão farináceo e senescência, com média de 4452 kcal kg<sup>-1</sup>. A máxima energia potencial também ocorreu no estágio de grão farináceo, sendo de 1410 GJ ha<sup>-1</sup>. Considerando-se a PMS, o PCS e a umidade, infere-se que o estágio de grão farináceo corresponde ao ponto ideal de colheita para o sorgo biomassa BRS 716. O período de colheita poderia ser escalonado entre os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, ocorrendo ligeira redução na PMS e no PCS, permanecendo a umidade inalterada.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*; produtividade; poder calorífico; umidade.

## BIOMASS AND HUMIDITY CHARACTERIZATION OF BIOMASS SORGHUM AIMING THE HARVEST TIME DEFINITION

### ABSTRACT

Biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] has been studied as raw material for bioenergy production. It is a C4 plant, with high biomass yield in a short time and with high heating value. Dry matter and humidity are parameters that considerably influence the culture's energetic yield at the industrial units, and it is believed that the dry matter peak coincides with high humidity content. It is assumed that if the plant remains at the field, after certain time, intending to favor the natural dehydration, it can result in dry matter consumption. In this regard, the present work aimed to characterize the biomass, humidity and higher heating value behavior during the growing and developing cycle of biomass sorghum. It is intended to define the ideal harvest time that maximizes the industrial yield at the bioelectricity cogeneration. The experiment was conducted under field conditions using the biomass sorghum hybrid BRS 716. It was set in a randomized block design with five replications and seven treatments. The treatments consisted in the biomass sorghum phenological stages, which were pre-flowering, flowering, milk dough, soft dough, mealy dough, hard dough and senescence. It was evaluated fresh and dry biomass yields, leaves number, plant height, stem diameter, humidity, higher heating value and potential biomass energy. Fresh biomass yield (FBY) had increased from the early phenological stages and it reached the maximum of 229 t ha<sup>-1</sup>, at the mealy dough stage. This value had not significantly differed from FBY's recorded at the pre-flowering, soft dough, hard dough and senescence stages. FBY's registered for the flowering and milk dough stages were statistically lower than the other ones, with an average of 158 t ha<sup>-1</sup>. Dry biomass yield (DBY) had also increased from the early stages, reaching the maximum of 75.5 t ha<sup>-1</sup> at the mealy dough stage, coinciding with the lowest humidity content (67%), which was higher than the ideal range of 50-55%. Dry biomass decreased after reaching the peak, confirming the prior hypothesis, which stated that if the plant remains at the field after certain time, identified as mealy dough stage, it will result in dry matter consumption. The higher heating value (HHV) was similar for most phenological stages, but it stood out at the mealy dough and senescence stages, with an average of 4452 kcal kg<sup>-1</sup>. The maximum potential energy, 1410 GJ ha<sup>-1</sup>, also was

registered at the mealy dough stage. Considering the DBY, HHV and humidity, it is inferred that mealy dough stage corresponds to the ideal harvest time for biomass sorghum BRS 716. The harvest gap could be staggered between the soft dough, mealy dough and hard dough stages, leading to slightly decreases in the DBY and HHV, with no changes in humidity percentage.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*; yield; heating value; humidity.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório Cenário Energético Mundial (2016), a demanda mundial por eletricidade irá duplicar até 2060 e, um dos grandes desafios, é suprir tal demanda por meio de fontes de energia mais limpas. Segundo a Revisão Estatística da Energia Mundial, publicada pela British Petroleum (2017), tem-se observado a tendência mundial da expansão do uso de combustíveis mais limpos. Neste cenário, a biomassa está ganhando espaço como fonte de energia renovável, principalmente em sistemas de cogeração (produção combinada de calor e eletricidade).

Atualmente, cerca de 6% da matriz brasileira de geração de energia elétrica é originária da queima do bagaço da cana-de-açúcar em usinas (MME, 2016), cujo excedente de energia produzida é comercializado, sendo a agroeletricidade o mais recente e promissor produto do agronegócio brasileiro (Parrella et al., 2014). A ociosidade dos equipamentos geradores no período de entressafra da cana-de-açúcar e a atratividade advinda dos preços de energia praticados no mercado, livre ou regulado, fazem com que as empresas equipadas para a geração e exportação de energia excedente diversifiquem as fontes de combustível destinado à queima direta nas caldeiras (Oliveira et al., 2016). Uma das opções é o sorgo biomassa [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] que apresenta qualidade para gerar energia com poder calorífico similar ao da cana, do eucalipto e do capim-elefante (SNA, 2016). Qualquer empresa que produza energia por meio de queima de biomassa em suas caldeiras pode utilizar o sorgo sem necessitar de tecnologia específica.

O sorgo biomassa é uma planta C4 com elevada produção de matéria seca (60 t ha<sup>-1</sup>, em média) em um período de aproximadamente 180 dias. Os colmos são fibrosos, cuja composição varia de 5 a 10% de lignina, 15 a 25% de hemicelulose e 35 a 45% de celulose (Parrella et al., 2014). Além de ser uma matéria-prima dedicada, que garante um aproveitamento melhor e total do produto, possui alto poder calorífico que otimiza o processo de geração de energia (Blandy, 2016). Resultados obtidos do poder calorífico superior e inferior da biomassa deste sorgo, em base seca, têm sido verificados em torno de 4300 e 3800 kcal kg<sup>-1</sup> de matéria seca, respectivamente, o que demonstra o grande potencial da cultura para geração de energia.

A umidade no ponto de colheita é uma característica fundamental para o sucesso na adoção da tecnologia, uma vez que para alguns processos industriais é fator

limitante. Segundo Earl (1975) citado por Cunha et al. (1989), uma biomassa muito úmida necessita de calorias de origem externa para secar e entrar em combustão. May et al. (2015) sugerem que valores de umidade em torno de 50% são interessantes para realização da colheita. Quanto menor a umidade da biomassa colhida, menores serão os custos adicionais com o processo de secagem pós-colheita e, possivelmente, maior será o rendimento energético do material na geração de bioeletricidade.

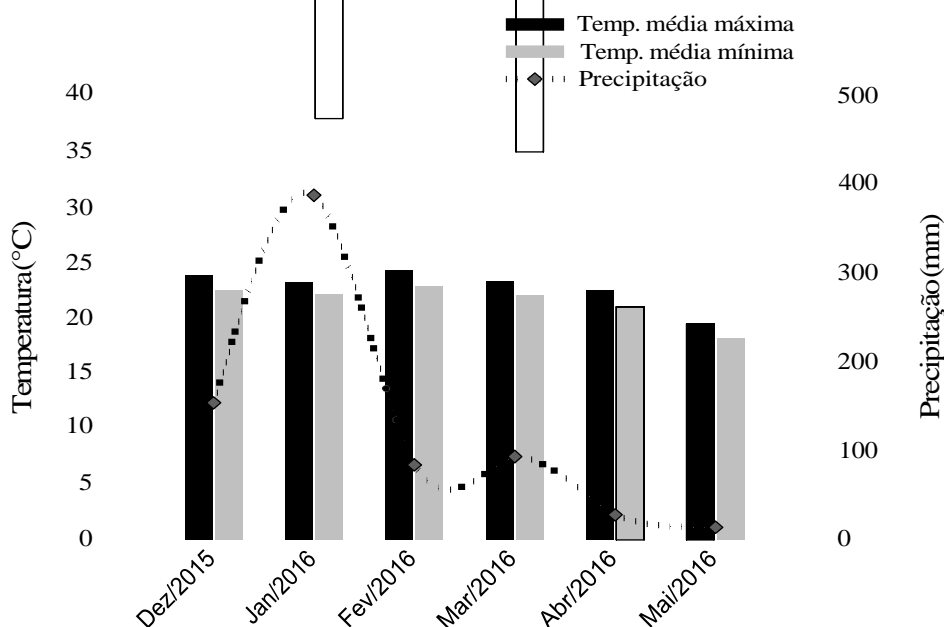
Baixos níveis de umidade, altos teores de fibras e de lignina são desejáveis, uma vez que são relacionados com o aumento do poder calorífico e consequente eficiência no uso da biomassa (Barbosa et al., 2016). Entretanto, acredita-se que o máximo acúmulo de massa seca do sorgo biomassa coincida com elevado teor de umidade e, caso a planta seja mantida à campo para o favorecimento da desidratação natural, ocorrerá também o consumo de massa seca. Não há na literatura informações claras sobre o ganho de biomassa *versus* a desidratação da planta, ao longo de seu ciclo, que possibilite a definição do ponto ideal de colheita otimizando-se o aproveitamento da matéria seca acumulada.

Dessa forma, objetivou-se neste trabalho caracterizar o comportamento da biomassa, umidade e poder calorífico superior ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento do sorgo biomassa, visando a definição do ponto ideal de colheita que maximize o rendimento industrial na cogeração de bioeletricidade.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1- Local e condições climáticas

O experimento foi realizado na Estação Experimental Diogo Alves de Melo, pertencente ao departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa-MG (lat 20° 45' 14" S, long 42° 52' 55" O e alt 648 m). O trabalho foi conduzido entre os meses de dezembro de 2015 a maio de 2016. A Figura 1 apresenta os dados de temperatura e precipitação acumulada no período de realização do trabalho.

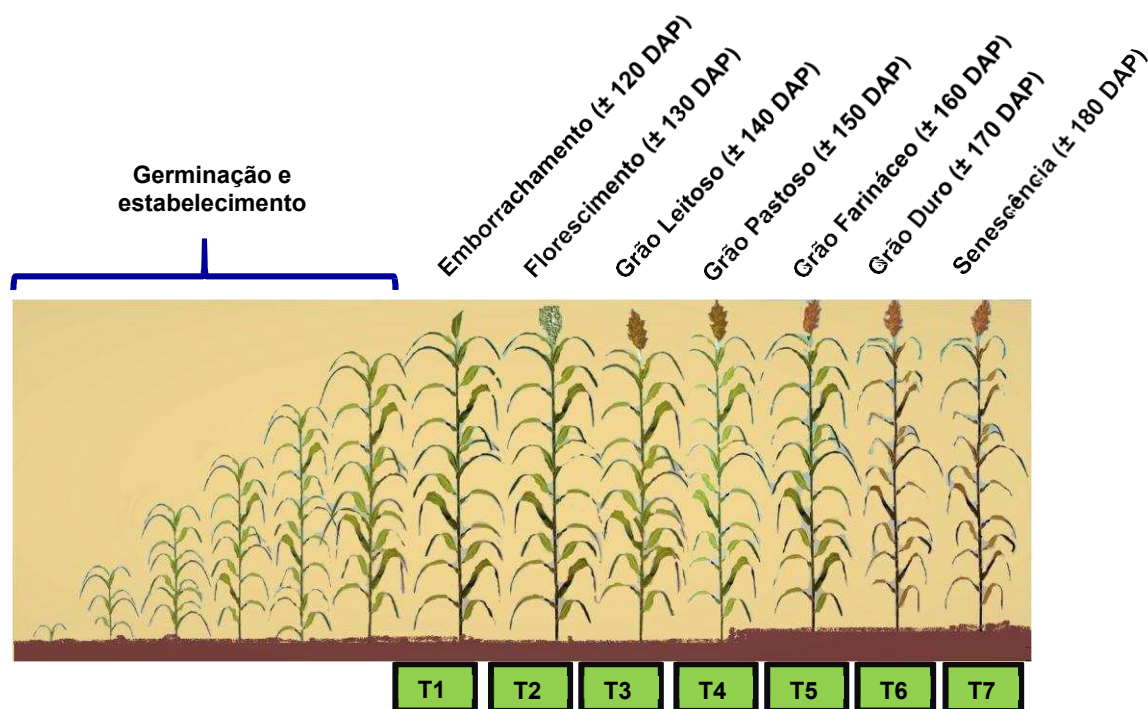


**Figura 1.** Precipitação acumulada (mm) e temperaturas (°C) médias mensais durante o desenvolvimento do sorgo biomassa BRS 716, no município de Viçosa-MG, dez/2015 a maio/2016. Dados da Estação Meteorológica Automática de Viçosa A-510.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura argilosa (Embrapa, 2011). Os resultados da análise química do solo referentes à camada de 0 a 20 cm de profundidade apresentaram as seguintes características: pH (H<sub>2</sub>O) = 5,87; P = 14,7 mg dm<sup>-3</sup>; K = 45 mg dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 3,44 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 1,25 mg dm<sup>-3</sup>; Al<sup>3+</sup> = 0,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al = 3,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB = 4,81 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC(t) = 4,81 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC (T) = 8,41 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, V = 57,2% e MO = 2,79 dag kg<sup>-1</sup>.

## 2.2- Delineamento experimental

Conduziu-se o experimento adotando-se o delineamento em blocos casualizados (DBC) com cinco repetições e sete tratamentos. Os tratamentos constituíram-se na época de amostragem conforme os estádios fenológicos da cultura (Figura 2), sendo estágio de emborrachamento (122 dias após o plantio- DAP), florescimento (133 DAP), grão leitoso (145 DAP), grão pastoso (154 DAP), grão farináceo (159 DAP), grão duro (166 DAP) e senescência (174 DAP).



**Figura 2.** Estádios de desenvolvimento do sorgo biomassa BRS 716, no município de Viçosa-MG, dez/2015 a maio/2016. Tratamentos experimentais (T). Dias após o plantio (DAP).

A parcela experimental foi constituída por quatro linhas com 4,00 m de comprimento, espaçadas em 0,70 m entre si. A parcela útil correspondeu às duas linhas centrais desconsiderando-se 0,50 m de cada uma das extremidades e 10 plantas foram coletadas para realização das análises pré-estabelecidas.

## 2.3- Implantação e manejo da cultura

Para o preparo inicial do solo realizou-se apenas gradagens em área previamente dessecada com 1500 g ha<sup>-1</sup> i. a. de glifosato e 800 g ha<sup>-1</sup> i. a. de 2,4-D. Os

sulcos de plantio foram abertos manualmente com o auxílio de enxada e espaçados em 0,70 m entre si. Distribuíram-se 12 sementes por metro linear do híbrido de sorgo biomassa BRS 716 produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária unidade Milho e Sorgo (Embrapa Milho e Sorgo). Realizou-se o desbaste das plantas aos 15 dias após o plantio (DAP), obtendo-se a população final de 120 000 plantas por hectare.

A adubação de plantio foi realizada manualmente, aplicando-se diretamente no sulco 400 kg ha<sup>-1</sup> do adubo NPK 08:28:16. Aos 30 dias após a emergência (DAE) foram aplicados 200 kg ha<sup>-1</sup> de ureia e 100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (KCl) em cobertura conforme recomendado por May et al. (2013). Capinas manuais foram realizadas aos 10, 30 e 60 DAE para o controle de plantas daninhas. Aos 30 DAE aplicou-se 50 g ha<sup>-1</sup> i. a. de deltametrina (produto comercial Decis®) para controle de pragas da parte aérea (lagartas).

#### 2.4- Características avaliadas

A cada tratamento, avaliou-se a partir de dez plantas:

- **Altura de planta (AP):** considerou-se a média, em metros (m), das alturas da amostra coletada, medindo-se as plantas por meio de uma trena graduada, partindo-se da base do colmo até a altura de inserção da panícula;
- **Diâmetro do colmo (DC):** medido, em milímetros (mm), no terço médio dos colmos (considerando-se o 5° nó após descartar o primeiro nó da base) com o auxílio do paquímetro digital (Starrett®, 6 POL 799A-6/150);
- **Número de folhas (NF):** realizou-se a contagem direta das folhas presentes no colmo;
- **Produtividade de massa fresca total (PMF):** determinou-se, a partir da amostra coletada, a massa referente à cada seção da planta separadamente (massa de folhas, massa de colmos e massa de panículas) e então fez-se o somatório dos valores obtidos resultando na massa fresca total. A pesagem foi realizada com o auxílio de uma balança digital, sendo os valores obtidos em quilograma (kg) e então expressos em toneladas por hectare (t ha<sup>-1</sup>) (Figura 3);



**Figura 3:** Estimativa, em kg, da massa fresca de folha, colmo e panícula do sorgo biomassa BRS 716, utilizando-se balança digital (Balmak®, ELP 25).

- **Produtividade de massa seca total (PMS):** determinada por meio da diferença das massas (kg) da amostra do material recém colhido e após a mesma ser submetida à secagem em estufa; sendo os valores obtidos em quilograma (kg) e então expressos em toneladas por hectare ( $t\ ha^{-1}$ );
- **Umidade (U):** após determinação da PMF, alíquotas úmidas correspondentes a 1,000 kg de folhas; 0,500 kg de colmos e todas as panículas foram levadas à secagem em estufa com sistema de ventilação forçada a  $70\ ^\circ C (\pm 5)$ , até atingirem peso constante. As massas obtidas após secagem dos materiais na estufa foram inseridas na equação (I) e determinou-se a umidade:

$$(IV) \quad U = \left[ \frac{M1-M2}{M1} \right] \times 100;$$

Em que U é a umidade determinada em percentagem (%); M1 é a massa inicial da alíquota, em kg; e M2 é a massa (kg) da alíquota após secagem na estufa;

- **Poder calorífico superior (PCS):** após secagem em estufa, as folhas, colmos e panículas foram moídas (moinho tipo Willye, TE-650, Tecnal). O material moído foi classificado em peneiras com malhas de 40 e 60 Mesh, sendo que a fração entre 40 e 60 Mesh foi utilizada para a análise do poder calorífico superior (PCS) conforme a norma NBR 8633/84 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984). A determinação do PCS de cada amostra foi dada em duplicata pela combustão de 0,4 g do material em bomba calorimétrica e o PCS foi quantificado em  $kcal\ kg^{-1}$ ;
- **Poder calorífico inferior (PCI):** calculado segundo Brito (1993), por meio da equação (II):

$$(II) \quad PCI = PCS - 600 (9H/100);$$

Em que PCI é o poder calorífico inferior, PCS é o poder calorífico superior, H é o percentual de hidrogênio— considerado como 6%, uma vez que a maioria dos resíduos lignocelulósicos apresenta percentual de hidrogênio entre 5,5 e

6,5. Quantificou-se, em kcal kg<sup>-1</sup>, o PCI da planta inteira e de cada seção (folhas, colmo e panícula);

- **Energia potencial (EP):** obtida pelo produto entre o poder calorífico superior (PCS) e a produtividade de massa seca (PMS), conforme a equação (III):

$$(III) EP = PCS \times PMS;$$

Onde *EP* é a energia potencial, expressa em gigajoule (GJ) por hectare (GJ ha<sup>-1</sup>), *PCS* é o poder calorífico superior, em kcal kg<sup>-1</sup>, e *PMS* é a produtividade de massa seca por hectare, expressa em kg ha<sup>-1</sup>. Calculou-se a EP para cada parte da planta (folhas, colmo e panícula) e o somatório das mesmas (EP folha+ EP colmo+ EP panícula) resultou na EP total da planta (EP total).

## 2.5- Análise estatística

Submeteu-se os dados ao teste de normalidade de Shapiro-Wilks e uma vez que houve apenas ligeiros desvios de normalidade, os dados foram processados sem transformação. Realizou-se então a análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e as médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste Scott-Knott (1974) ao nível de 5% de probabilidade. Realizou-se a análise de regressão para verificar o comportamento das variáveis ao longo do tempo. Para as análises mencionadas utilizou-se o programa Statistical Analysis System— SAS e o programa SISVAR 5.6.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1- Descrição fenológica da cultura

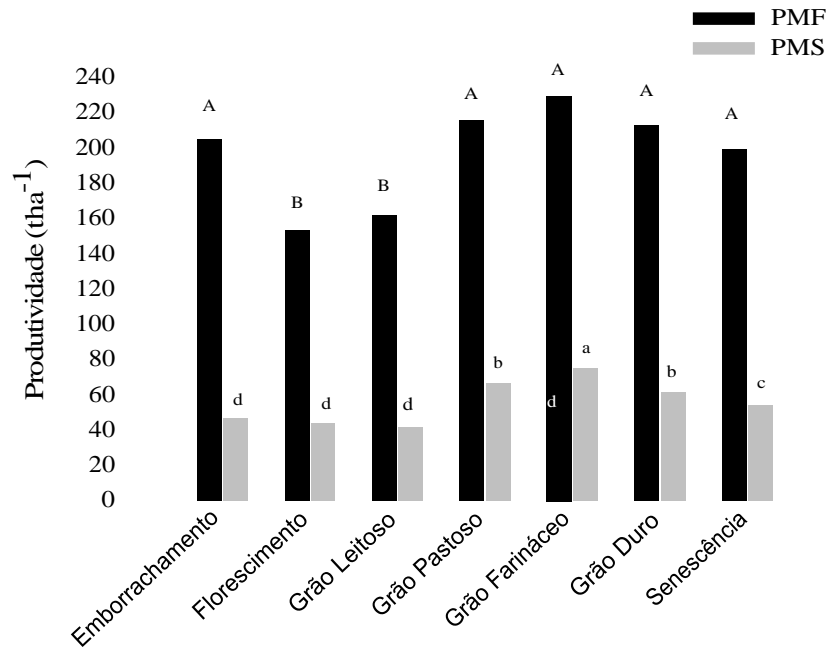
##### 3.1.1- Caracterização das biomassas fresca e seca

A produtividade de massa fresca total (PMF) foi crescente a partir dos estádios iniciais de avaliação e atingiu o máximo de 229 t ha<sup>-1</sup>, no estádio de grão farináceo (159 dias após o plantio-DAP). Entretanto, este valor não diferiu significativamente das produtividades de massa fresca registradas nos estádios de emborrachamento (122 DAP), grão pastoso (154 DAP), grão duro (166 DAP) e senescência (174 DAP) (Figura 4). As PMF's obtidas nos estádios de florescimento (133 DAP) e grão leitoso (145 DAP) foram estatisticamente inferiores às demais, com média de 158 t ha<sup>-1</sup>. Atribui-se esta menor produtividade de massa fresca à redução da umidade da planta nos estádios de florescimento e grão leitoso, já que a massa seca não diferiu significativamente da obtida no estádio de emborrachamento (Figura 5.b), cuja massa fresca foi superior (Figura 4). A redução da umidade nestes estádios pode ser relacionada à menor ocorrência de precipitação neste período, conforme apresentado na Figura 1, e também às variações amostrais.

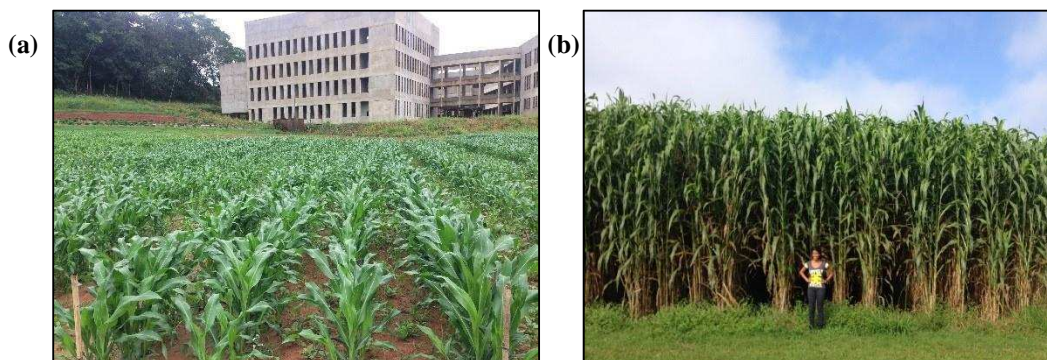
Ressalta-se que houve uma superestimativa da PMF em função da metodologia amostral conforme discutido no item 3.1.1 do primeiro capítulo. Ao adotar a produtividade das plantas amostradas como um padrão para todas as demais plantas da população experimental, excluiu-se as variações existentes entre as mesmas. Logo, a elevada PMF obtida no presente trabalho é justificada partindo-se da premissa de uma população de plantas homogênea. A mesma prerrogativa aplica-se à produtividade de massa seca total (PMS).

A produtividade de massa seca total (PMS) também foi crescente a partir dos estádios iniciais de avaliação, atingindo-se o valor máximo de 75,5 t ha<sup>-1</sup> no estádio de grão farináceo (Figura 4). A máxima PMS encontrada neste trabalho corrobora com Parrella et al. (2010) que apontam híbridos de sorgo biomassa com potencial produtivo superior a 50 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca por ciclo (seis meses). Após atingir o pico de produtividade, observou-se que a massa seca tende a reduzir, confirmando a hipótese de que caso a planta permaneça a campo após certo período, identificado como o estádio de grão farináceo, haverá perdas na massa seca acumulada. Tais perdas podem

ser atribuídas à redução da fotossíntese líquida inerente ao processo de senescência, ocorrendo menor produção de fotoassimilados em comparação às taxas respiratórias, o que resultou no consumo de biomassa seca (Yoder et al., 1994).



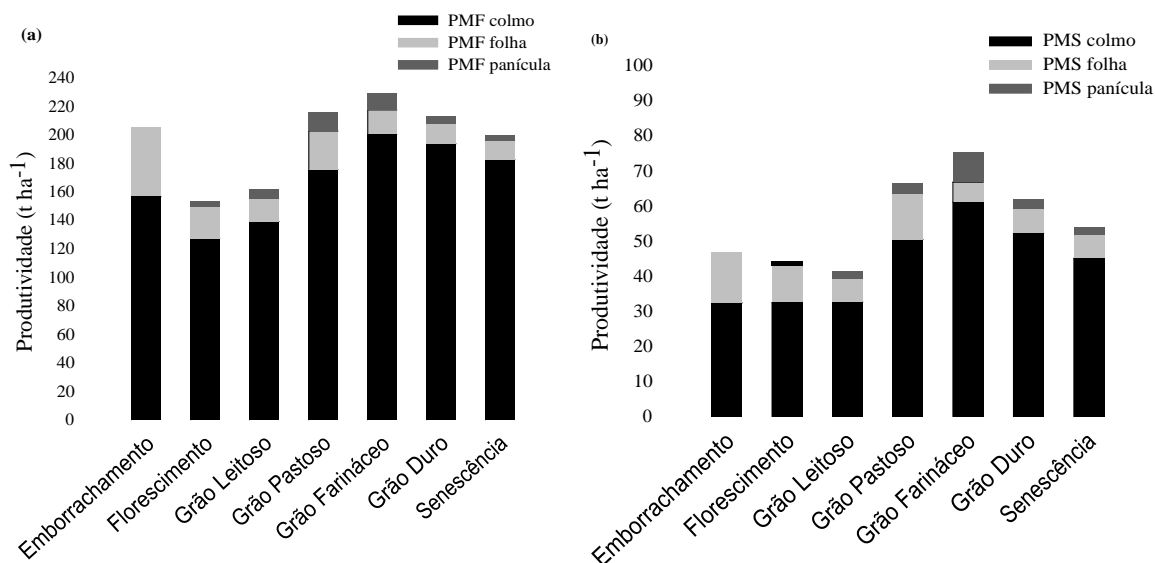
**Figura 4.** Produtividade de massa fresca total (PMF) e produtividade de massa seca total (PMS), ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716. Dias após o plantio (DAP). Médias (em barras) seguidas pela mesma letra maiúscula na PMF e pela mesma letra minúscula na PMS não diferem significativamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.



**Figura 5.** Registro visual do ganho de massa fresca do sorgo biomassa BRS 716 (a) aos 35 dias após o plantio (DAP) e (b) no estágio de emborrachamento (122 DAP).

A participação da biomassa do colmo na massa total da planta correspondeu, em média, a 85% da massa fresca total e 80% da massa seca total. A biomassa de folha correspondeu, em média, a 12% da massa fresca total e 17% da massa seca total,

enquanto a biomassa da panícula correspondeu, em média, a 3% da massa fresca total e 4% da massa seca total da planta (Figuras 6.a e 6.b).



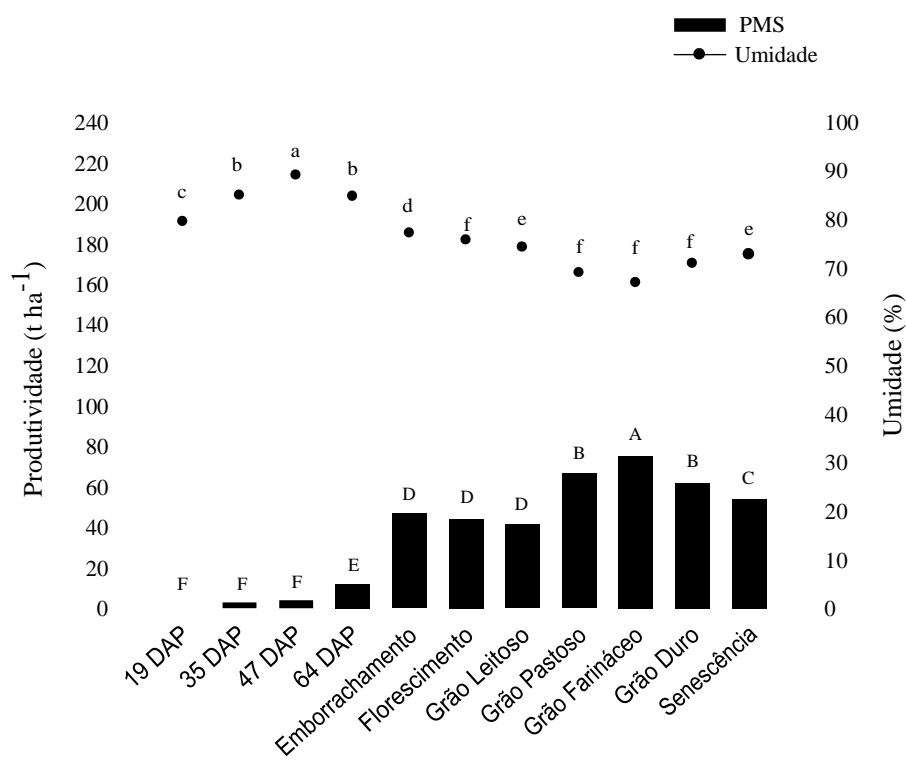
**Figura 6.** (a) Participação da produtividade da massa fresca do colmo (PMF colmo), da folha (PMF folha) e da panícula (PMF panícula) na produtividade de massa fresca total (PMF); (b) participação da produtividade da massa seca do colmo (PMS colmo), da folha (PMS folha) e da panícula (PMS panícula) na produtividade de massa seca total (PMS) nos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716.

Marafon et al. (2016) afirmam que para geração de energia térmica, a seleção de genótipos com maior relação colmo/folhas é considerada mais interessante devido à composição estrutural destas seções da planta. Tal atributo é observado no sorgo biomassa e, associado aos elevados teores de lignina presentes em sua biomassa, endossam o potencial deste tipo de sorgo para uso em cogeração de energia.

### 3.1.2- Produtividade de massa seca total *versus* umidade

A máxima produtividade de massa seca total (PMS) coincidiu com a menor umidade registrada, ocorrendo no estágio de grão farináceo (159 DAP) (Figura 7), embora esta umidade não se encontre no intervalo desejável de 50-55%. Cortez et al. (2008) apontam que só é possível queimar materiais com até 50% de água, a depender do tipo de caldeira utilizada. Ressalta-se que os valores de PMS e umidade obtidos neste trabalho são superiores aos encontrados por Silvério et al. (2016) para as mesmas variáveis. Esta diferença pode ser atribuída ao fato do sorgo biomassa ter apresentado

um ciclo mais curto no estudo desenvolvido por Silvério et al. (2016), em função do fotoperíodo da região. Com isso houve menor acúmulo de massa seca e a redução da umidade foi mais rápida devido à proximidade da senescência.



**Figura 7.** Produtividade de massa seca total (PMS) versus umidade ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716. Dias após o plantio (DAP). Barras seguidas pela mesma letra maiúscula e pontos seguidos pela mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

A menor faixa de umidade foi observada entre os estádios de grão pastoso (154 DAP) ao grão duro (166 DAP), onde não houve diferenças significativas nos valores obtidos. Entretanto, para o mesmo intervalo, a produtividade de massa seca total apresentou comportamento diferente, sendo menor no estádio de grão pastoso, atingindo o máximo no estádio de grão farináceo e reduzindo novamente no estádio de grão duro (Figura 7).

Considerando-se a produtividade de massa seca total (PMS) e umidade, infere-se que o estádio de grão farináceo corresponde ao ponto ideal de colheita para o sorgo biomassa BRS 716. O período de colheita poderia ser escalonado entre os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, ocorrendo ligeira redução na PMS, permanecendo a umidade inalterada.

Salienta-se que, no presente trabalho, a permanência da planta à campo não resultou em queda expressiva da umidade, não atingindo o percentual desejável de 50%. Contrariamente, ocorreu o aumento do teor de água na cultura em função da ocorrência de chuva, fato que possivelmente prejudicou a evolução da desidratação a partir do estágio de grão duro. As condições ambientais do local onde foi desenvolvido o experimento exerceram grande influência na perda de água da cultura. Além do aumento da umidade, a colheita tardia pode acarretar consumo de massa seca, o que comprometeria o rendimento energético da biomassa nas caldeiras. Logo, estudos acerca de estratégias para otimizar a colheita, como o uso de dessecantes, são interessantes para melhor exploração do potencial produtivo da cultura.

### **3.1.3- Número de folhas, diâmetro do colmo e altura de planta**

Para melhor caracterização do comportamento do sorgo biomassa BRS 716 ao longo dos estádios fenológicos, avaliou-se o número de folhas, diâmetro do colmo e altura de planta (Tabela 1).

As diferenças observadas para cada variável ao longo dos estádios fenológicos foram pouco expressivas, embora tenham sido estatisticamente significativas em algumas épocas.

Observou-se um padrão médio para número de folhas, diâmetro de colmo e altura de planta ao longo do crescimento desenvolvimento do sorgo biomassa. Registraram-se os valores médios de 4,89 m e 22,40 mm para a altura de planta e diâmetro do colmo, respectivamente, valores similares aos encontrados por Oliveira (2016) avaliar o uso do sorgo biomassa BRS 716 para cogeração de energia.

Ressalta-se que o sorgo biomassa é uma planta de dias curtos, ou seja, o início do seu florescimento ocorre apenas quando os dias possuem menos de 12 horas e 20 minutos (Rooney, 1999), o que ocorre entre 21 de março e 22 de setembro, na maior parte do Brasil. Realizou-se o plantio da cultura em dezembro, logo seu ciclo vegetativo estendeu-se entre os meses de dezembro a março, o que refletiu nas médias elevadas do número de folhas, altura de planta e diâmetro do colmo.

**Tabela 1.** Médias do número de folhas (NF), altura de planta (AP) e diâmetro do colmo (DC) em sete estádios fenológicos em sorgo biomassa (BRS 716). Viçosa, MG.

<b>Tratamento</b>	<b>NF</b>	<b>AP (m)</b>	<b>DC (mm)</b>
1- Emborrachamento	19,86 a	5,09 a	24,58 a
2- Florescimento	19,37 a	5,23 a	20,13 a
3- Grão Leitoso	17,82 b	5,16 a	22,44 a
4- Grão Pastoso	19,78 a	4,44 b	22,44 a
5- Grão Farináceo	20,20 a	4,58 b	22,28 a
6- Grão Duro	20,04 a	4,76 b	22,41 a
7- Senescência	19,92 a	4,98 a	22,55 a
Média	19,57	4,89	22,40

\*Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

As variações observadas para a altura de planta decorrem de diferenças amostrais, uma vez que em cada estágio fenológico foram selecionadas plantas aleatoriamente em diferentes parcelas dos blocos experimentais.

A definição da época de plantio é uma etapa importante no cultivo do sorgo biomassa. Deve-se determiná-la de modo a maximizar o ciclo vegetativo da cultura o que, provavelmente, refletirá em maior produtividade de massa seca. A massa seca, por sua vez, é um dos fatores que influencia o rendimento energético da biomassa, seja em termos quantitativos ou qualitativos, dependendo da composição química da mesma.

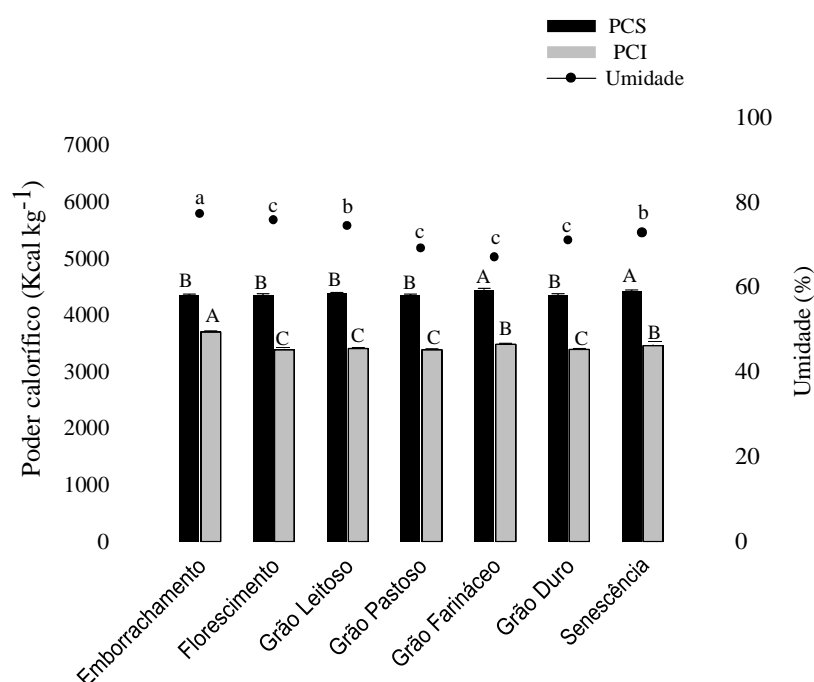
### **3.2- Caracterização do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e energia potencial (EP) da biomassa**

#### **3.2.1- Poder calorífico superior e inferior da biomassa total**

O poder calorífico superior (PCS) da biomassa variou entre 4363 a 4464 kcal kg<sup>-1</sup> ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa (Figura 8). O maior PCS foi registrado no estágio de grão farináceo (4464 kcal kg<sup>-1</sup>), e não diferiu significativamente do PCS do estágio de senescência. Nos demais estádios fenológicos o PCS não diferiu significativamente entre eles, apresentando o valor médio de 4372 kcal kg<sup>-1</sup>. O PCS médio obtido para sorgo biomassa no presente trabalho (4395 kcal

kg<sup>-1</sup>) foi similar, em ordem de grandeza, ao PCS encontrado por Marafon et al. (2016) (4129 kcal kg<sup>-1</sup>) ao estudar o mesmo híbrido de sorgo biomassa em uma região diferente. Foi similar, também, ao PCS encontrado por Carvalho (2015) ao avaliar palha e folhas secas de cana-de-açúcar (4170 e 4067 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Ressalta-se que, apesar de não haver diferenças significativas entre a maioria dos valores de PCS, estes apresentaram uma tendência inversa ao teor de umidade, em que o maior PCS coincidiu com a menor umidade. Mesmo que mínimas, as variações observadas podem influenciar consideravelmente a eficiência do processo de conversão energética.



**Figura 8:** Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e umidade ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716. Médias, em barras de mesma cor para o PC e em pontos para a umidade, seguidas por uma mesma letra, não diferem significativamente entre si, ao nível 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Carvalho (2015) afirma que, no período de entressafra da cana-de-açúcar, a utilização do sorgo biomassa como combustível pode manter a usina termelétrica utilizando cerca de 35% da área destinada ao cultivo da cana.

Registrou-se o maior poder calorífico inferior (PCI) no estágio de emborrachamento, sendo de 3716 kcal kg<sup>-1</sup>. O valor obtido no presente estudo é próximo ao PCI médio de 3800 kcal kg<sup>-1</sup> encontrado por Parrella et al. (2014), ao

avaliar materiais de sorgo biomassa, e superior ao PCI de 1670 kcal kg<sup>-1</sup> obtido por Carvalho (2015) a partir do bagaço de cana. Após o estágio de emborrachamento, o maior PCI foi registrado nos estádios de grão farináceo e senescência, cujos valores não diferiram significativamente entre si, apresentando a média de 3480 kcal kg<sup>-1</sup>. Para os demais estádios fenológicos não houve diferença significativa no PCI, obtendo-se a média de 3403 kcal kg<sup>-1</sup>. Os elevados valores de PCI foram obtidos em condições ótimas, em que o material havia sido previamente secado em estufa, justificando-se os resultados obtidos. Comparativamente, o bagaço de cana com teor de umidade de 50% exibe um PCI de 1800 kcal kg<sup>-1</sup> (Paoleillo, 2006).

### 3.2.2- Poder calorífico superior e inferior das partes (folhas, colmo e panícula)

A Tabela 2 apresenta o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de cada uma das partes do sorgo biomassa, considerando-se a participação de cada seção na biomassa total da planta.

**Tabela 2:** Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das folhas, colmo e panícula do sorgo biomassa BRS 716. Viçosa, MG.

Parte	Partição da biomassa (%)	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )
Folha	17	768	444
Colmo	78	3422	3098
Panícula	5	206	-72
Biomassa total	100	4396	3470

\*Valores médios, em base seca, considerando-se todos os estádios fenológicos do sorgo biomassa.

Observou-se que o colmo é a porção da planta que apresenta o maior poder calorífico superior e inferior, considerando-se sua participação percentual na biomassa total da planta. Os resultados encontrados corroboram com Marafon et al. (2016) que afirmam que a relação colmo/folha influencia o poder calorífico da biomassa das gramíneas energéticas, o qual é geralmente maior nos colmos do que nas folhas. Isso ocorre, possivelmente, pelo fato do teor de cinzas dos colmos ser consideravelmente menor do que o das folhas, uma vez que há maior concentração de minerais presentes folhas que, posteriormente, são translocados para os grãos. O valor de PCI negativo encontrado para a panícula (Tabela 2), pode ser atribuído ao elevado teor de cinzas

desta parte associado à elevada umidade, indicando que não é interessante usá-la para a queima nas caldeiras.

Ressalta-se que para todas as partes (folhas, colmo e panícula) registrou-se elevado percentual de umidade após a colheita. A umidade constitui um fator importante na qualidade da biomassa, uma vez que a maioria das caldeiras são projetadas para queima de biomassa com teores de umidade próximos a 50%. O percentual de umidade, geralmente, exibe relação inversamente proporcional ao poder calorífico da biomassa, ou seja, quanto menor a umidade maior será o poder calorífico, pois requer-se menos energia para vaporização da água. (Payne, 1989 *apud* Silvério et al., 2016).

Brand e Muñiz (2010) sugerem que antes da entrada na planta de geração de energia a biomassa deve ser submetida a algum processo, como estocagem ou secagem, visando melhorar suas condições energéticas.

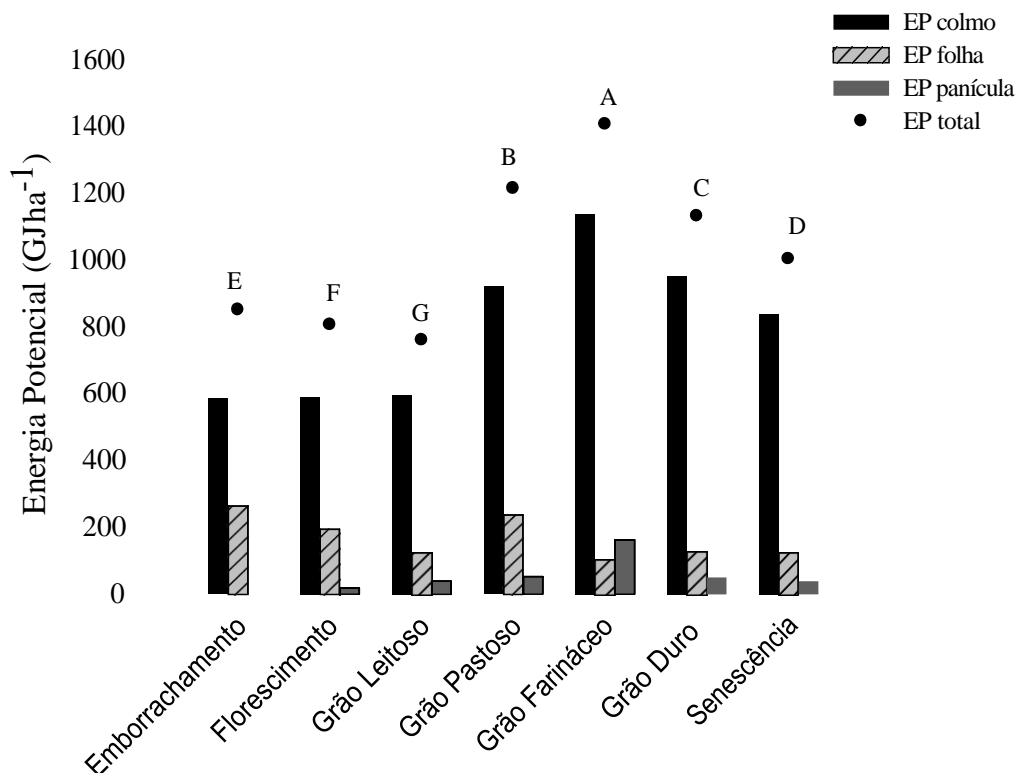
### **3.2.3- Energia potencial (EP) das partes e da biomassa total**

Na Figura 9 é apresentada a EP de cada seção da planta (folha, colmo e panícula) e a EP total da biomassa (considerando-se a planta inteira), ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716.

Observou-se que, em todos os estádios fenológicos, o colmo foi a seção da planta cuja EP foi consideravelmente superior à EP das demais partes. A EP colmo apresentou um valor médio de 806 GJ ha<sup>-1</sup>, enquanto as médias para a EP folha e a EP panícula foram de 167 e 53 GJ ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A maior EP colmo ocorreu no estádio de grão farináceo com 1141 GJ ha<sup>-1</sup> (Figura 9). Acredita-se que a máxima EP observada no colmo esteja relacionada à quantidade e à composição do mesmo. O colmo é a parte da planta que apresenta maior contribuição à massa seca total, correspondendo, em média, a 78% da biomassa seca da planta. Logo, por ocorrer em maior quantidade que as demais partes, é esperado que, em termos proporcionais, o colmo tenha maior EP. Além disso, apresenta elevados teores de lignina, e segundo Cunha (1989) citando Browning (1963), quanto maior o teor de lignina maior é o poder calorífico do material, uma vez que a lignina possui menos oxigênio que os polissacarídeos presentes da celulose e hemicelulose.

As maiores EP totais foram obtidas entre os estádios de grão pastoso ao grão duro, sendo a máxima registrada no estádio de grão farináceo, com 1410 GJ ha<sup>-1</sup>.

Conforme abordado no item 3.1.1 do presente capítulo, houve uma superestimativa da produtividade de massa seca total. Logo, sendo a energia potencial o resultado do produto entre a produtividade de massa seca e poder calorífico superior (EP= PMS x PCS), pontua-se que a EP também exibe uma superestimativa.



**Figura 9:** Energia potencial total (EP total), da folha (EP folha), do colmo (EP colmo) e da panícula (EP panícula) ao longo dos estádios fenológicos do sorgo biomassa BRS 716.

Ressalta-se que os valores máximos de produtividade de massa seca total e poder calorífico superior, bem como a menor umidade, também ocorreram no estágio de grão farináceo. Nota-se que, direta e/ou indiretamente, o rendimento energético da biomassa está relacionado a essas variáveis. Logo, PCS, produtividade de massa seca e umidade devem ser avaliadas para tomada de decisão quanto ao ponto de colheita do sorgo biomassa. Considerando-se estas três variáveis, infere-se que o ponto ideal de colheita para o sorgo biomassa BRS 716 corresponde ao estágio de grão farináceo, pois é o estágio em que se observou maior produtividade de massa seca, com menor umidade, obtendo-se maior rendimento energético em termos de Kcal por kg de biomassa seca.

Destaca-se que em um período curto (cerca de seis meses) o sorgo biomassa produz elevada quantidade de massa seca, cujo potencial energético se sobressai em comparação a outras biomassas energéticas. O cultivo do sorgo biomassa foi projetado para ser realizado em áreas de reforma dos canaviais e no período de entressafra da cana. Logo, a cultura do sorgo não objetiva competir com a cana-de-açúcar e sim complementar a oferta de matéria-prima para geração de energia no setor sucroenergético (Carvalho, 2015).

Dada as características energéticas do material, bem como sua praticidade em termos produtivos (ciclo curto, mecanização dos processos, elevada produtividade de massa seca, etc.), ressalta-se que o sorgo biomassa é uma matéria-prima interessante em sistemas de cogeração de energia. Entretanto, por ser uma biomassa ainda pouco explorada, aponta-se a necessidade de realizar-se mais estudos, principalmente no âmbito fitotécnico, para maior conhecimento e aproveitamento do potencial produtivo da cultura. Sugere-se, por exemplo, estudos acerca de estratégias que favoreçam a redução da umidade do material à campo, tal como a aplicação de dessecantes.

#### 4. CONCLUSÕES

A massa fresca total do sorgo biomassa BRS 716 apresenta variações mínimas ao longo dos estádios fenológicos e exibe a tendência de manter-se elevada ao longo de todo o ciclo cultural. Já a massa seca total exibiu diferenças mais significativas. Aumentou entre os estádios de emborrachamento ao grão farináceo, no qual atingiu-se o máximo. Após este estágio, a produtividade de massa seca apresenta tendência de queda.

Em relação à umidade do material, observa-se um comportamento decrescente do estágio de emborrachamento até o grão pastoso. O valor segue estável até o estágio seguinte, grão duro, a partir do qual exibe nova tendência de aumento.

O poder calorífico superior mantém-se elevado ao longo dos estádios fenológicos, sobressaindo-se nos estádios de grão farináceo e senescência. Tanto para o PCS quanto para o PCI, o colmo é a porção da planta que exibe os maiores valores.

O sorgo biomassa BRS 716 é uma boa opção para cogeração de energia, sendo que a máxima energia potencial de sua biomassa é obtida no estágio de grão farináceo.

Logo, o estágio de grão farináceo corresponde ao ponto ideal de colheita para o sorgo biomassa (BRS 716). O período de colheita pode ser escalonado entre os estádios de grão pastoso, grão farináceo e grão duro, sem ocorrer aumento da umidade, mas com ligeira redução na produtividade de massa seca total e poder calorífico superior.

## 5. REFERÊNCIAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8112. Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.
- Barbosa, M. P. M, Carvalho, R.S.B., 2016. Avanços na pesquisa e tendências de mercado de sorgo biomassa. Disponível em: <http://www.nexsteppe.com.br/artigos/avancos-na-pesquisa-e-tendencias-de-mercado-de-sorgo-biomassa/>. Acessado em 9 de maio de 2017.
- Blandy, R., 2016. 2016 será um ano muito promissor para o sorgo biomassa. Disponível em: <http://www.nexsteppe.com.br/noticias/2016-sera-um-ano-muito-promissor-para-o-sorgo-biomassa/>. Acessado em 9 de maio de 2017.
- Brand, M.A., Muñiz, G. I. B., 2010. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia Sci. For., 38(88), 619-628.
- Carvalho, D. J., 2015. Geração de bioeletricidade em usina sucroalcooleira utilizando bagaço, palha de cana e sorgo biomassa. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, departamento de Engenharia Mecânica.
- Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., Gomez, E. O., 2008. Biomassa para energia. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 734 p.
- Cunha, M. P.S. C., Pontes, C. L. F., Cruz, I. A., Cabral, M. T. F. D., Cunha Neto, Z. B., Barbosa, A. P. R., 1989. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, São Carlos, SP v.2, 93-121.
- Embrapa- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Revista Atual. Rio de Janeiro,7, 212.
- Marafon, A. C., Santiago, A. D., Amaral, A. F. C., Bierhals, A. N., Paiva, H. L., Guimarães, V. S., 2016. Uso da biomassa para a geração de energia. Documentos 211- Embrapa Tabuleiros Costeiros.
- May, A., Silva, D. D., Santos, F. C. (eds.), 2013. Cultivo do sorgo biomassa para cogeração de energia elétrica. Documentos 152- Embrapa Milho e Sorgo.
- MME- Ministério de Minas e Energia, 2016. Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2015. Edição de maio de 2016.
- Oliveira, N. A. B., 2016. O uso do sorgo biomassa para cogeração: aspectos técnicos e econômicos. Dissertação (mestrado). Escola de Economia de São Paulo- Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV.

- Paoleillo, J. M. M., 2006. Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. Bauru-SP.
- Parrella, R. A. C., Menezes, C. B., Rodrigues, J. A. S., Tardin, F. D., Parrella, N. N. L. D., Schaffert, R. E., 2014. Cultivares. In: Borém, A., Pimentel, L. D., Parrella, R. A. C. (ed.). Sorgo: do plantio à colheita. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap. 7, p. 169-187.
- Parrella, R. A. C., Rodrigues, J. A. S., Tardin, F. D., Damasceno, C. M. B., Schaffert, R. E., 2010. Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa. Boletim 28- Embrapa Milho e Sorgo.
- Rooney, W. L., Aydin, S., 1999. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* L. Moench. Crop Science, 39,397-400. DOI:10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200016x.
- Silvério, P. C., Ciaramello, S., Nogueira, L. C., Alcântara, G. U., Costa, G. H. G., Uribe, R. A. M., 2016. Influência da época de colheita do sorgo biomassa na produtividade de toneladas de biomassa seca. In: X Workshop Energia: matérias-primas. Ribeirão Preto, São Paulo.
- SNA/SP- Sociedade Nacional de Agricultura, 2016. Sorgo biomassa é aposta como fonte de energia renovável. Disponível em: <http://sna.agr.br/sorgo-biomassa-e-aposta-como-fonte-de-energia-renovavel/>. Acessado em 07/06/17.
- Yoder, B. J., Ryan, M. G., Waring, R. H., Schoettle, A. W., Kaufmann, M. R., 1994. Evidence of reduced photosynthetic rates in old trees. Forest Science, 40(3), 513-527.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme abordado no presente estudo, os sorgos sacarino e biomassa são promissores à bioenergia, dada as características intrínsecas a cada um dos materiais. Os colmos suculentos com elevada concentração de açúcares diretamente fermentáveis apresentados pelo sorgo sacarino, apontam-no como alternativa complementar à geração de etanol. A elevada produção de biomassa rica em lignina, exibida pelo sorgo biomassa, indicam a possibilidade de utilizá-lo em sistemas de cogeração de energia. Apesar das potencialidades acima mencionadas, os materiais de sorgo bioenergia não têm sido amplamente utilizados conforme preconizava-se, o que é atribuído ao conhecimento ainda limitado da cultura, refletindo nos rendimentos inferiores ao esperado. O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de ampliar o conhecimento acerca dos sorgos sacarino e biomassa no âmbito fitotécnico/fisiológico, principalmente no que diz respeito ao ponto de colheita.

Para ambos os materiais, encontraram-se resultados interessantes ainda não descritos na literatura. Observou-se que o ponto ideal de colheita do sorgo sacarino corresponde ao estágio de grão farináceo, em que há maior rendimento de açúcares e, conseqüentemente, etanol. O segmento composto pelos entrenós mais basais do colmo deve ser a região amostrada para medição do teor dos açúcares, e não os entrenós do terço mediano, como é feito atualmente. Observou-se que se superestima os rendimentos ao medir os açúcares no terço médio.

Para o sorgo biomassa, observou-se que a umidade é um dos fatores que mais influencia o rendimento energético da cultura. Materiais colhidos com alto teor de umidade impossibilitam ou inviabilizam a queima nas caldeiras devido à energia dispendida para evaporação da água. O binômio “massa seca  $\times$  umidade” deve ser considerado para a definição do ponto de colheita, cujo ideal seria elevada produtividade de massa seca com baixo teor de umidade. Entretanto, constatou-se que caso a planta seja mantida à campo para favorecimento da desidratação natural, pode ocorrer a redução da massa seca e, conseqüentemente, redução do rendimento energético em termos de poder calorífico.

Os sorgos sacarino e biomassa são, de fato, materiais com aptidão para o uso em bioenergia. Os resultados obtidos no presente trabalho trazem grande contribuição à exploração da cultura. Entretanto, ressalta-se a necessidade de mais estudos visando

o melhor aproveitamento de seu potencial produtivo, considerando-se outros genótipos, safras, localidades, etc.

A desconfiança observada em relação ao sorgo, própria daquilo que é novo, endossada pelos baixos rendimentos obtidos até então, têm limitado a expansão da cultura. Contudo, por meio da realização de pesquisas e divulgação dos resultados, ressaltando-se sua aplicabilidade em termos práticos, acredita-se que os sorgos sacarino e biomassa consolidar-se-ão no setor bioenergético.