



DANILO ALVES PEREIRA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA E DESEMPENHO DE
HÍBRIDOS DE SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor* L.
Moench.) COM APTIDÃO PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
E ETANOL**

**LAVRAS – MG
2020**

DANILO ALVES PEREIRA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA E DESEMPENHO DE HÍBRIDOS DE
SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor* L. Moench.) COM APTIDÃO
PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes

Orientador

Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella

Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Pereira, Danilo Alves.

Capacidade combinatória e desempenho de híbridos de sorgo sacarino (*Sorghumbicolor* L. Moench.) com aptidão para produção de biomassa e etanol. / DANILO ALVES PEREIRA. - 2020.
60 p. : il.

Orientador(a): JOSÉ AIRTON RODRIGUES NUNES.

Coorientador(a): RAFAEL AUGUSTO DA COSTA

PARRELLA.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. bioenergia. 2. producao de híbridos. 3. seleção para múltiplos caracteres. I. Nunes, José Airton Rodrigues. II. Parrella, Rafael Augusto Da Costa. III. Título.

DANILO ALVES PEREIRA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA E DESEMPENHO DE HÍBRIDOS DE
SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor* L. Moench.) COM APTIDÃO
PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA E ETANOL**

**COMBINING ABILITY AND PERFORMANCE OF SWEET SORGHUM
HYBRIDS (*Sorghum bicolor* L. Moench.) FOR BIOMASS AND
ETHANOL PRODUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 28 de julho de 2020.

Prof. Dr. Leonardo Duarte Pimentel - UFV

Prof. Dr. Pedro Crescêncio Souza Carneiro - UFV

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes - UFLA

Orientador

Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella – Embrapa Milho e Sorgo

Coorientador

À minha mãe Marineide e ao meu pai José Neudo, pelo exemplo de vida, luta e fé.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda saúde, força e coragem que me tem dado na caminhada.

Agradeço ao Professor José Airton e ao Dr. Rafael Parrella pela oportunidade de orientação, pela dedicação e paciência.

Agradeço à minha família, em especial ao meu pai José, à minha mãe Marineide e a todos aqueles que me apoiaram.

Agradeço aos meus amigos e colegas de pós-graduação pelo companheirismo e solidariedade que me proporcionaram.

Agradeço aos meus companheiros de república em Lavras pelo acolhimento e pela convivência que tivemos durante o período de pós-graduação, a saber: Erik, Leonardo, Hugo, Munir, Hélio, Hugo e Otávio.

Agradeço aos meus companheiros da 'Casa 2' pela amizade e companheirismo que sempre exibiram, principalmente nos momentos mais difíceis, a saber: Carlos, Ariel, Tarcísio, Danilo, Izanildo e Teógenes.

Agradeço aos companheiros de trabalho e grupo de pesquisa: Maiara, Cláudio, Brena, Thiago, Lucas, Fernanda, Danilo, Daniela, Talieisse, Camila, Michael David e Mayra Luiza.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, à Universidade Federal de Lavras, bem como todos os servidores que sempre prestativos me ajudaram.

Agradeço à Embrapa Milho e Sorgo por proporcionar a oportunidade de fazer parte de uma pequena etapa do programa de melhoramento genético de sorgo e também pela estrutura e pelos experimentos realizados.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O sorgo sacarino é uma cultura energética voltada primariamente para produção de etanol de primeira geração. O melhoramento genético da espécie no Brasil tem buscado a ampliação da oferta nacional de etanol, bem como a flexibilização do ideótipo da cultura visando à obtenção de cultivares híbridas que também associem elevado rendimento de biomassa, com ou sem uso de sensibilidade ao fotoperíodo. Essa estratégia conduz a uma diversificação econômica da cultura permitindo sua otimização na cogeração de energia elétrica nas usinas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade geral (CGC) e específica (CEC) de combinação de linhagens macho-estéreis (A) e restauradoras de fertilidade (R) de sorgo sacarino para produção de híbridos com elevada aptidão para produção de biomassa e etanol. Foram avaliados 30 híbridos experimentais, oriundos de cruzamento dialélico parcial envolvendo seis linhagens A com alto teor de açúcar no caldo e cinco linhagens R quanto aos caracteres dias para o florescimento (DPF), altura de planta (ALT), produção de massa verde (PMV), porcentagem de caldo extraído (EXT), teor de sólidos solúveis totais (SST) e toneladas de brix por hectare (TBH). Esses híbridos e mais seis testemunhas, totalizando 36 genótipos, foram testados em dois locais do estado de Minas Gerais. Os híbridos experimentais divergiram entre si para a maior parte dos caracteres. Contudo, apenas alguns superaram o desempenho das testemunhas. As linhagens A apresentaram estimativas de CGC significativas para EXT, SST e TBH, enquanto as linhagens R o foram para todos os caracteres. O melhor desempenho foi verificado nos híbridos que possuem a linhagem R CMSX5022 como genitora, a qual é sensível ao fotoperíodo e tem colmo seco. Não houve efeito de CEC nos cruzamentos para os caracteres EXT, PMV, SST e TBH. Para TBH, tanto genótipos sensíveis quanto insensíveis ao fotoperíodo obtiveram bom desempenho. Para produção de biomassa (PMV), os híbridos sensíveis ao fotoperíodo obtiveram claro destaque. Portanto, a sensibilidade ao fotoperíodo é importante para que genótipos sacarinos alcancem elevada produção de biomassa. As combinações híbridas mais promissoras foram CMSXS5506 x CMSX646 (insensível) e CMSXS5507 x CMSX5022 (sensível ao fotoperíodo). No entanto, não houve heterose para caracteres ligados ao rendimento de etanol e biomassa.

Palavras-chave: bioenergia, produção de híbridos, linhagens macho-estéreis sacarinas, sensibilidade ao fotoperíodo, seleção para múltiplos caracteres.

ABSTRACT

The sweet sorghum is a bioenergy crop mainly used in the production of first-generation ethanol. Plant breeding in Brazil has sought the enlargement of the national supply of ethanol and also the flexibilization the ideotype of this crop aiming to produce hybrids with high biomass yield, with or without photoperiod sensitivity. This strategy implies to an economic diversification allowing the improvement on the power energy generation ability from sweet sorghum. Thus, this study aimed to estimate the general (GCA) and specific (SCA) combining ability of male-sterile (A) and restorer (R) lines of sweet sorghum to produce hybrids with high performance for ethanol and biomass yield. A total of 30 hybrids were obtained from a partial diallel cross of six A-lines with high sugar content in stalk juice, and five R-lines. These genotypes were evaluated for flowering time (FT), plant height (PH), fresh biomass yield (FBY), juice extractability percentage (EXT), total soluble solids (TSS), and tons of Brix per hectare (TBH). The 30 hybrids and six checks were tested in two environments in Minas Gerais State of Brazil. The experimental hybrids diverged for most traits across environments, although only a few hybrids were superior in performance to the checks. The A-lines had a significant estimate of GCA for the traits EXT, TSS, and TBH, whereas the R-lines were significant for all traits. The hybrids with the best scores in the multitrait index were those that had the CMSX5022 as the male genitor, which is a dry stem genotype and sensitive to photoperiod. There was no significant SCA for the traits EXT, FBY, TSS, and TBH. Regarding sugar yield (TBH), photoperiod-sensitive and non-sensitive genotypes were best ranked. Whereas for biomass yield (FBY), photoperiod-sensitive hybrids had a clear advantage. Therefore, photoperiod sensitivity is an important feature of sweet sorghum genotypes with high biomass production. The best ranked hybrids were CMSXS5506 x CMSX646 (non-sensitive) and CMSXS5507 x CMSX5022 (sensitive to photoperiod). Although, no heterosis was found to traits related to ethanol and biomass yield.

Keywords: bioenergy, hybrids production, sweet male-sterile lines, sensitivity to photoperiod, multi-trait selection.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	9
2. Referencial teórico.....	12
2.1. A planta de sorgo e suas características.....	12
2.2. O sorgo sacarino.....	13
2.3. Programas de melhoramento de sorgo sacarino e o incentivo a energia renovável no Brasil.....	14
2.4. A hibridação como estratégia de melhoramento.....	16
2.5. A sensibilidade ao fotoperíodo.....	18
2.6. Parâmetros genéticos associados à produção de híbridos.....	19
2.7. Associação de características em sorgo sacarino.....	21
3. Material e Métodos.....	21
3.1. Locais.....	21
3.2. Genótipos avaliados.....	22
3.3. Plano e Condução experimental.....	23
3.4. Caracteres avaliados.....	25
3.5. Análise estatístico-genética.....	26
3.5.1. Análise estatística.....	26
3.5.2. Análise dialélica conjunta.....	27
3.5.3. Índice de seleção.....	28
4. Resultados.....	29
4.1. Análise multilocais.....	29
4.2. Análise dialélica conjunta.....	31
4.3. Agrupamento de médias.....	34
4.4. Índice de Seleção (T) e biplots.....	35
5. Discussão.....	38
6. Considerações finais.....	47
7. Conclusões.....	47
Referências bibliográficas.....	48

1. Introdução

O sorgo sacarino é uma cultura bioenergética voltada primariamente para a produção de etanol de primeira geração, com potencial de fornecer matéria-prima de qualidade no final da entressafra (março/abril) e início da safra (maio) da cana-de-açúcar, possibilitando antecipação da moagem, ampliando a operacionalidade nas usinas. Há potencial para expansão da área cultivada com sorgo sacarino, com destaque para a vantagem adicional relativa a outras culturas energéticas, como o milho, por exemplo, de não competir diretamente com a produção para alimentação humana (PEREIRA FILHO; RODRIGUES, 2015).

Os genótipos de sorgo sacarino atualmente presentes no mercado foram desenvolvidos pela iniciativa privada, por institutos de pesquisa estaduais e pela Embrapa Milho e Sorgo. Esta última tem se dedicado a desenvolver, em parceria com universidades e produtores do setor sucroenergético, híbridos de sorgo sacarino de alto potencial produtivo, alta produção de etanol, resistentes às principais doenças e pragas e com alta produção de biomassa (bagaço).

O bagaço é o resíduo da extração do caldo rico em açúcares e é aproveitado para queima em caldeiras com finalidade de gerar energia elétrica. Esse aproveitamento é bastante comum em usinas que utilizam a cana-de-açúcar, nas quais a energia gerada supre a demanda utilizada durante o processo de produção de etanol e o excedente é vendido para as concessionárias do sistema elétrico nacional (FODRA; ESPERANCINE, 2013). O sorgo sacarino tem aptidão para este fim, mas possui produtividade de biomassa inferior à da cana-de-açúcar. Por esse motivo é necessária uma investigação científica para selecionar genótipos de sorgo sacarino com maior potencial tanto para produção de etanol, quanto para biomassa.

Os programas de melhoramento genético de sorgo sacarino têm focado no desenvolvimento de cultivares híbridas. Apesar do sistema reprodutivo predominantemente autógamo é relatada a existência de heterose para características agrônômicas e industriais na cultura (PFEIFFER et al, 2010; UMAKANTH et al., 2012; BUNPHAN et al., 2015; LOMBARDI et al., 2018; ROCHA et al., 2018). A hibridação ocorre por cruzamentos e a viabilidade do processo tornou-se possível apenas após a descoberta e o desenvolvimento do esquema de produção de linhagens macho-estéreis.

A macho-esterilidade genético-citoplasmática ocorre devido à ação combinada de herança extracromossômica e genes nucleares (ROONEY, 2004). A cultivar híbrida é obtida pelo cruzamento de uma linhagem denominada 'A', que possui citoplasma macho-estéril e é recessiva para o gene nuclear Kafir de restauração de fertilidade (rfrf), com uma linhagem denominada 'R', que possui citoplasma fértil e alelos que restauram a fertilidade (RfRf). Assim, o híbrido F_1 é 100% fértil com citoplasma estéril, porém com alelo restaurador de fertilidade no núcleo (Rfrf).

A identificação dos potenciais híbridos em sorgo sacarino depende especialmente da escolha dos genitores que apresentem elevado potencial agrônomo e tecnológico nas combinações híbridas resultantes. Para este fim, comumente são utilizados delineamentos de cruzamento dialélicos parciais envolvendo os grupos de linhagens A e R, sob a premissa de que a divergência genética entre linhagens destes grupos resulte na maximização da heterose. Os dialelos permitem a estimação da capacidade geral de combinação (CGC) das linhagens parentais A e R, que está diretamente relacionado com a frequência de alelos favoráveis que determinado genitor possui para o caráter de interesse. Permite também a estimação da capacidade específica de combinação (CEC), que expressa a complementaridade de dois genitores em relação aos alelos associados à expressão fenotípica, na presença de interação alélica dominante.

Na medida em que se busca selecionar as linhagens parentais que apresentem alta CGC quanto aos principais caracteres agroindustriais, faz-se necessário acentuar as atividades de desenvolvimento de linhagens parentais sacarinas. Neste tocante, a Embrapa Milho e Sorgo vem desenvolvendo linhagens A (macho-estéreis) sacarinas destinadas especificamente à produção de híbridos. Em gerações passadas de híbridos, comumente utilizava-se linhagens A forrageiras (non-sweet) como genitor feminino e linhagens R comerciais como genitores masculinos (DURÃES, 2014). Contudo, o desempenho dos híbridos é penalizado para caracteres relacionados aos teores de açúcares, cujo controle genético é mais fortemente exercido por genes de ação aditiva (PFEIFFER et al, 2010; ROCHA et al., 2018). Deste modo, é imprescindível o desenvolvimento de novas linhagens parentais, especialmente macho-estéreis sacarinas, a fim de alavancar o rendimento de açúcares dos novos híbridos. O presente trabalho é um dos pioneiros a utilizar linhagens macho-estéreis com alto teor de açúcar no caldo para produção de híbridos.

Outrossim, devido à pertinente exigência do setor sucroenergético de que haja incremento em produção de bagaço para melhor rentabilidade do sorgo sacarino na cogeração de energia elétrica, o programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo tem incluído a produtividade de biomassa como um dos focos da seleção de linhagens e híbridos. A estratégia mais efetiva tem sido a utilização de genótipos sensíveis ao fotoperíodo. O controle desse caráter é exercido por cerca de seis genes (Ma1 a Ma6), sendo que o alelo dominante Ma1 se sobrepõe aos demais genes para conferir a sensibilidade ao fotoperíodo, enquanto em recessividade a sensibilidade pode ser determinada por interações epistáticas entre os outros genes (ROONEY; AYDIN, 1999). Logo, a introdução de sensibilidade ao fotoperíodo nos genótipos é relativamente simples. Esse efeito faz com que genótipos retardem seu florescimento até que o comprimento do dia seja menor do que 12h e 20min (GARNER; ALLARD, 1923). Isso implica em crescimento vegetativo expressivo, culminando principalmente em incremento no caráter-alvo produtividade de biomassa.

A considerar as exigências de rendimento e de qualidade do empresariado industrial e rural concernente à produtividade de etanol e cogeração de energia elétrica a partir do sorgo sacarino é necessária a avaliação fenotípica de muitos caracteres com eles correlacionados, tais como a concentração de açúcares, eficiência de extração de caldo, produção de biomassa, além de outros ligados à adaptabilidade como duração do ciclo da cultura e altura de plantas. De sorte que a seleção de genitores e híbridos é de fundamental importância e esta seleção é de natureza multi-caráter. Por consequência, necessita de emprego de índices de seleção, que levam em consideração combinações dos valores fenotípicos, bem como pesos a eles associados ou análises estatísticas multivariadas.

A genética quantitativa aplicada ao melhoramento genético é uma das melhores estratégias para aumentar a produtividade do sorgo sacarino e em conjunto com as diferentes estratégias de avaliação de caracteres, condução de população, introdução de genes e seleção de genótipos necessitam ser melhor estudadas para amparar as necessidades do setor sucroenergético no Brasil.

O presente estudo teve por finalidade avaliar a capacidade combinatória de linhagens macho-estéreis e restauradoras de fertilidade de sorgo sacarino, na produção de híbridos com ou sem sensibilidade ao fotoperíodo e selecionar combinações híbridas com elevada aptidão para produção de biomassa e etanol.

2. Referencial teórico

2.1. A planta de sorgo e suas características

O sorgo (*Sorghum bicolor*. L. Moench.) é uma espécie da família *Poaceae*. O gênero *sorghum* possui aproximadamente 30 espécies. A espécie *S. bicolor* possui número cromossômico $2n = 2x = 20$, sendo dividida em três subespécies, *bicolor* que inclui todas as variedades cultivadas, subespécie *verticilliflorum* que inclui parentes selvagens da subespécie *bicolor*, e também a subespécie *drummondii* que compreende espécies originárias de hibridação das outras duas subespécies e cresce de forma selvagem nas regiões de ocorrência (VENKATESWARAN et al., 2018).

A espécie foi domesticada no nordeste da África e foi levada para a China, Oriente Médio e Europa logo após a domesticação. Possui ampla adaptação, sendo cultivada em climas temperados, subtropicais e tropicais. O metabolismo é C4 e apresenta tolerância tanto ao estresse hídrico quanto ao estresse térmico, ao passo que é bastante responsiva às boas condições edafoclimáticas e tratos culturais. Atualmente a área cultivada com sorgo no mundo é de 5,8 milhões de hectares (FAO, 2017).

As temperaturas ótimas para o desenvolvimento estão dentro da faixa de 25-31°C. O regime hídrico necessário varia na faixa de 500-800 mm por ciclo. O cultivo se dá nos variados tipos de solo, com pH entre 5,0 e 8,5. Cultivares podem ser sensíveis tanto ao fotoperíodo (ROONEY; AYDIN, 1999), quanto ao frio e geadas. Todas as espécies do gênero *Sorghum* têm raízes fibrosas que podem atingir de 1,5 a 2,4 m de profundidade. O sistema radicular é extenso e a capacidade de 'dormência' durante períodos inóspitos fazem do sorgo uma cultura em potencial para adaptação às regiões com secas intermitentes (VENKATESWARAN et al., 2018).

O caule é do tipo colmo, ereto, sólido e com diâmetro entre 5 e 50 mm. O caule possui córtex rígido e medula tenra, podendo esta ser suculenta ou seca, com ou sem presença de açúcar. Esses caracteres são definidores da aptidão das cultivares (HOUSE, 1985). O tipo de colmo (cheio ou seco) é determinado pelo gene *Dry*, cujo alelo dominante condiciona o fenótipo colmo seco (HILSON, 1916). Com isso, as plantas têm teor de caldo recuperável consideravelmente menor que aqueles de colmo suculento. Já o conteúdo de açúcar no colmo é um caráter reconhecidamente poligênico e é independente do tipo de colmo (AUDILAKSHMI et al., 2010), logo, há

uma distribuição de fenótipos com vários níveis de acúmulo de açúcar no caldo. Cada nó do colmo possui a capacidade de gerar um novo broto, caso a gema axial seja cortada. As gemas basais possuem brotos que podem originar perfilhos. A capacidade de perfilhamento é determinada geneticamente e também depende de condições ambientais como suprimento de CO₂, temperatura noturna (ROOZEBOOM; PRASAD; CIAMPITTI, 2018; HART et al., 2001), além do manejo cultural de estande.

Quanto ao sistema reprodutivo, o sorgo é uma planta monóica e autógama. A fertilização se inicia no topo da panícula com duração de 4 a 5 dias. Ocorre a predominância de autofecundação e a taxa de fecundação cruzada pode variar de 2% a 10%. O fruto é uma cariopse ou grão seco (BORÉM et al., 2014).

2.2. O sorgo sacarino

A matéria-prima mais utilizada no Brasil para produção de etanol tem sido a cana-de-açúcar. O sorgo sacarino é uma cultura com ampla aptidão para essa finalidade, pois acumula açúcares nos colmos e possui potencial para complementar a cana-de-açúcar no período entressafra, renovação de canaviais ou de ociosidade nas usinas no Brasil e com margem para expansão (TEIXEIRA et al., 1996).

Quanto às suas características, o sorgo sacarino alcança até seis metros de altura, possui caule espesso, tem alto teor de matéria seca e é utilizado na indústria sucroenergética pela similaridade com a cana-de-açúcar em relação aos processos industriais para geração de etanol, inclusive com a utilização da mesma estrutura de usinas (DURÃES, 2011). Todavia, a extração de açúcares da cana gera grande aporte de biomassa que é utilizada para cogeração de energia nas usinas. O sorgo também apresenta expressiva produção de biomassa, contudo a produtividade pode ser acentuada por meio do melhoramento genético. Outros destaques para o sorgo sacarino são o ciclo curto, comumente associado a genótipos insensíveis ao fotoperíodo, resistência a estresses bióticos e abióticos, além do aporte de fibra e rendimento de etanol (DAHLBERG et al., 2012).

Considerando a extração de açúcares, o caldo extraído do sorgo sacarino consiste numa mistura de sacarose, glucose e frutose, sendo que a proporção de cada um destes componentes varia conforme o genótipo (ALMODARES; HADI, 2009). Os açúcares podem ser extraídos e utilizados para rendimento de etanol e o bagaço também é utilizado, evidenciando a versatilidade e o potencial da cultura (ARUNA; VISARADA, 2018). Vale ressaltar que o caldo extraído do sorgo contém maiores

teores de açúcares invertidos em relação à cana-de-açúcar e por essa razão a cristalização é prejudicada e a aptidão para produção de açúcar cristal é baixa (CLARKE, 2003).

Ainda em comparação com a cana-de-açúcar, o sorgo leva vantagens como menor ciclo (4-6 meses *versus* 12-14 meses), material de propagação simples (8 kg.ha⁻¹ de sementes *versus* 40.000 kg.ha⁻¹ de colmos), requerimento de água relativamente menor (8.000 m³.ha⁻¹ *versus* 36.000 m³.ha⁻¹), manejo e adubação menos laboriosos e onerosos e teor de sólidos solúveis total, produção total de etanol semelhante ou superior à cana, quando considerado que é possível a realização de duas safras anuais de sorgo e apenas uma de cana (UMAKANTH et al., 2018).

A Embrapa Milho e Sorgo no Brasil tem desenvolvido pesquisas de tecnologia e inovação, principalmente no que tange ao melhoramento genético e ao desenvolvimento de híbridos de sorgo sacarino que possuam o máximo rendimento de etanol e também para produção de fibra a ser queimada em caldeiras para geração de energia elétrica (PARRELA et al., 2010).

Para que a queima do bagaço ocorra de forma eficiente é necessário que a umidade da biomassa esteja adequada. Quanto maior a umidade, menor será a geração de energia elétrica pelo fato de a energia liberada pela queima ser inicialmente destinada para evaporação da água presente na biomassa (MAY et al., 2013). O processo de extração do caldo do colmo também tem que ser eficiente. É ideal o menor conteúdo possível de açúcares livres no bagaço. Ademais, outros atributos tecnológicos devem ser observados nos genótipos, como teor de lignina, sólidos solúveis totais, produção de matéria verde e seca, pois influenciam na logística das indústrias e não podem passar despercebidos pelo processo de melhoramento (OLIVEIRA, 2015).

2.3. Programas de melhoramento de sorgo sacarino e o incentivo a energia renovável no Brasil

As primeiras cultivares de sorgo foram trazidas ao Brasil por escravos, ainda durante o período colonial. Os materiais tinham como principal aptidão a produção de sementes e a espécie foi vulgarmente chamada de 'milho-da-angola' (RIBAS, 2003). O sorgo passou a ser alvo de pesquisa e melhoramento entre as décadas de 1920 e 1960 por variados institutos de pesquisa e universidades, destacando-se o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Instituto Pernambucano de Pesquisas Agropecuárias

(Instituto Agronômico de Pernambuco, no presente), Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Sul e escolas de agronomia, como a de Viçosa, Lavras e Piracicaba.

As cultivares sacarinas foram inicialmente idealizadas para a produção em micro e minidestilarias durante a década de 1970, incentivadas pela política do Pró-Álcool. Foram introduzidos cerca de 50 genótipos advindos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), África e Índia. Resultantes da introdução de material foram selecionados e lançados comercialmente pela Embrapa Milho e Sorgo seis cultivares, a saber: BR 500, BR 501, BR 502, BR 503, BR 504 e BR 505. No fim dos anos 1980 foram lançados os primeiros cultivares de sorgo sacarino brasileiros com aptidão para produção de etanol. Vale ressaltar que posteriormente as variedades de sorgo utilizadas durante esse período foram direcionadas para uso forrageiro, tendo em vista a decadência de políticas estatais de incentivo ao álcool (DURÃES, 2011).

A Embrapa Milho e Sorgo retomou em 2008 o programa de melhoramento genético de cultivares sacarinas com vista na forte tendência no uso e diversificação da matriz energética nacional e também da diversificação de culturas, visando principalmente sanar a falta de matéria-prima na entressafra da cana-de-açúcar e durante a renovação dos canaviais (DURÃES, 2011). A tendência por uso de energia limpa tem impulsionado o setor sucroenergético e o cultivo tem sido fomentado por novas políticas públicas para o setor, como o RenovaBio.

O RenovaBio é uma política pública de Estado no Brasil que surgiu em 2016. Trata-se de um programa governamental de incentivos que retribui o produtor de biocombustíveis, seja etanol ou biodiesel, de acordo com a eficiência na redução de emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes. O incentivo se dá de forma que a energia 'mais limpa' proporciona maior recompensa em ativos financeiros que podem ser trocados no mercado de ações. O programa visa dar maior previsibilidade ao setor energético na produção e conjugar o crescimento da demanda energética com o cuidado com o ambiente (NOVATO; LACERDA, 2017).

Uma vertente importante do etanol é o forte apelo ambiental vivido desde o início do século XXI. As políticas públicas direcionadas ao setor de energia renovável têm promovido expressiva redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) no mundo. Os Estados Unidos e a União Europeia foram os pioneiros na implementação

de programas como o *Renewable fuel standard* e o *Renewable energy directive*, respectivamente. Essas iniciativas visam produzir 'créditos' de carbono, gerados quando se utilizam fontes renováveis que reduzem a emissão de carbono em relação aos combustíveis fósseis ou estabelecer metas de substituição da matriz de energia fóssil no tempo, respectivamente. O RenovaBio foi iniciativa do Brasil e estabeleceu diretrizes importantes para o país, como por exemplo, meta de redução de 10,1% na intensidade de carbono até o ano de 2028 (GRASSI; PEREIRA, 2019).

Os programas governamentais para reformulação da matriz energética não tangem somente o aspecto ambiental. Por intermédio dos incentivos há também fortalecimento da produção agrícola, geração de empregos e renda no campo e em destilarias. Quanto ao sorgo sacarino, o ganho genético na produção de biomassa permite que haja maior creditação de carbono e, conseqüentemente maior atratividade para a cultura.

2.4. A hibridação como estratégia de melhoramento

A introdução de genótipos de sorgo no Brasil se deu pelo uso de linhagens ou multilinhas, comumente chamadas de "variedades". O sistema reprodutivo da espécie, por ser autógamo, leva a utilização principalmente de linhagens. A hibridação é uma técnica de melhoramento genético amplamente conhecida para plantas alógamas, como o milho (BERNARDO, 2002), contudo há casos de sucesso na exploração para espécies autógamas como o arroz, desde que haja técnicas que permitam realizar cruzamentos e que ao mesmo tempo seja economicamente viável, como o uso dos gameticidas e de macho-esterilidade (NIENHUIS; SILLS, 1992).

A cultivar híbrida deve apresentar potencial agrônômico e tecnológico superior ao das linhagens, para que possa compensar o trabalho e o custo empregados e, principalmente, para incrementar a produtividade ou a qualidade do produto final desejado. Para o caso do sorgo sacarino, há trabalhos que relatam heterose significativa para a quase totalidade das características desejadas pelos produtores, não apenas no germoplasma presente no Brasil, mas também em diversos outros países (BUNPHAN et al., 2015; KUMAR et al., 2016; LOMBARDI et al., 2018). Embora seja válido ressaltar que recentes trabalhos têm mostrado existência de viés na quantificação do efeito heterótico no sentido de superestimá-lo (YAO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2019).

A produção de sementes híbridas de sorgo só foi possível após a utilização de macho-esterilidade, devido ao tamanho diminuto e ao grande número de espiguetas nas inflorescências. A macho-esterilidade ocorre de forma genética (GMS) e genético-citoplasmática (CMS), sendo esta última a mais amplamente utilizada em programas de melhoramento para produção de sementes de híbridos comerciais. Esse tipo de esterilidade é fisiológica e se dá em virtude de interações entre fatores citoplasmáticos (genes mitocondriais) e genes nucleares.

No contexto histórico, a macho-esterilidade foi primeiramente descoberta por Stephens e Holland (1954), ao relatarem que plantas com citoplasma Milo quando utilizadas como fêmea no cruzamento com plantas Kafir produziam híbridos macho-estéreis – esses dois *pools* pertencem a centros de diversidade diferentes e com isso possuem diferentes alelos e adaptabilidade. Quando o híbrido entre Milo e Kafir foi retrocruzado com o parental Milo, a descendência foi 100% fértil e quando retrocruzados com o parental Kafir, 100% estéreis. Percebeu-se que plantas Kafir poderiam ser utilizadas como mantenedoras da macho-esterilidade (REDDY et al., 2005). Essa estratégia é a mais utilizada atualmente, onde plantas macho-estéreis (portadoras do citoplasma Milo e núcleo Kafir) são cruzadas com plantas portadoras do gene restaurador de fertilidade (núcleo Milo ou outros portadores de alelos restauradores).

Na produção comercial de híbridos de sorgo utilizando a macho esterilidade genético-citoplasmática são necessários genótipos macho-estéreis (A), mantenedores de fertilidade (B) e restauradores de fertilidade (R). As linhagens A possuem citoplasma que confere esterilidade e genes nucleares recessivos para restauração, as linhagens B são isogênicas em relação às linhagens A, diferindo apenas por possuir citoplasma fértil. Utilizando linhagens A como fêmeas e B como machos é produzida a linhagem A (macho-estéril), por essa razão B é dita mantenedora da fertilidade. Para produção de um híbrido F₁, são utilizadas linhagens A (fêmea) cruzadas com linhagens R (macho). Linhagens R são ditas restauradoras de fertilidade por possuir alelos nucleares que conferem fertilidade mesmo em presença de citoplasma estéril. Portanto, a geração F₁ de um cruzamento A×R é 100% fértil (SAXENA et al., 2015).

De forma geral, ainda é pequena a produção de linhagens de sorgo sacarino para a produção de híbridos (SILVA; PARRELLA; SILVA, 2016). Portanto, é

imprescindível a coleta de dados e resultados a respeito de genitores e do desempenho de híbridos para melhor aproveitamento da heterose e também para a escolha de genitores para recombinação, a fim de gerar melhores linhagens a ser utilizadas tanto como fêmeas, quanto como machos que congreguem alta produção de açúcares e caldo nos colmos.

2.5.A sensibilidade ao fotoperíodo

Outro caráter importante para a cultura do sorgo é a sensibilidade ao fotoperíodo. Essa sensibilidade é relacionada com a duração do ciclo da cultura. O sorgo é uma espécie de dias curtos. Genótipos sensíveis ao fotoperíodo iniciam a fase reprodutiva apenas quando o comprimento do dia for menor que 12h e 20min (GARNER; ALLARD, 1923).

A importância agronômica desse caráter é grande no Brasil. Nas regiões de maior cultivo do sorgo sacarino, entre os meses de outubro e março, o comprimento do dia é superior ao requerido para florescimento do sorgo sensível, isso faz com que as plantas semeadas em outubro ou novembro iniciem o florescimento apenas após março. Diante disso, a planta permanece em estado vegetativo, crescendo em altura, diâmetro, número de folhas e, conseqüentemente em produção de biomassa, daí o interesse em genótipos sensíveis ao fotoperíodo.

O controle genético da sensibilidade é feito por cerca de seis genes, alguns destes também influenciam na expressão de outros caracteres como altura e cor do pericarpo (QUINBY, 1967; ROONEY; AYDIN, 1999), ou seja, os genes podem estar em ligação ou pleiotropia com outras características. Além disso, os genes ligados ao fotoperiodismo são independentes em relação a outros caracteres importantes como conteúdo de caldo no colmo e macho-esterilidade. A sensibilidade ao fotoperíodo a nível fisiológico afeta o tempo de conversão da gema apical para uma inflorescência. É dessa maneira, portanto, que afeta o tempo para florescimento, como também o número de folhas e, conseqüentemente, a altura das plantas.

Outros fatores também contribuem para a expressão da sensibilidade, por exemplo, a resposta ao fotoperíodo é também modulada pela temperatura, principalmente noturna. O desempenho varia em função do genótipo (QUINBY et al., 1973). Contudo, os mecanismos moleculares que permeiam a resposta às diferentes variações de fotoperíodo à temperatura ainda não foram completamente elucidados (WOLABU; TADEGE, 2016).

A sensibilidade ao fotoperíodo tem sido aproveitada para fins de melhoramento genético de sorgo biomassa (PARRELLA et al, 2010). A introdução desse caráter em híbridos de sorgo sacarino é realizada como estratégia, no intuito de incrementar a produção de biomassa desses cultivares às expensas de alguns dias a mais no ciclo da cultura.

2.6. Parâmetros genéticos associados à produção de híbridos

As características agronômicas alvos do melhoramento podem apresentar controle genético simples (um ou poucos genes envolvidos) ou complexo no qual há grande número de genes envolvidos. O controle genético é fator importante na escolha do melhor método de seleção e de metodologias experimentais para estimação de parâmetros genéticos. Em sorgo sacarino, os caracteres ligados à produção de etanol e biomassa são quantitativos, controlados por muitos genes, com herdabilidade moderada a baixa. Os caracteres relacionados à macho-esterilidade e à sensibilidade ao fotoperíodo são qualitativos e relativamente mais facilmente introduzíveis nas linhagens, e são genes independentes em relação aos caracteres agronômicos.

Além do número de genes que controlam o caráter, é necessário o conhecimento também do tipo de interação existente entre eles. Os alelos podem ter interação entre si num mesmo loco, nos diversos graus de dominância ou também entre locos diferentes, chamados de interações epistáticas. As interações entre alelos e entre genes proporcionam que o desempenho de uma progênie possa divergir daquele apresentado pelos pais, esse efeito é chamado de não-aditividade. Quando duas linhagens cruzadas produzem um híbrido de desempenho superior, a esse incremento dá-se o nome de heterose (ou vigor híbrido) que é em si efeito de não-aditividade. A heterose é amplamente explorada no melhoramento de plantas.

O melhoramento visando à obtenção de híbridos é justificado tão somente pela existência de heterose ou vigor híbrido. Uma das formas utilizadas pelos melhoristas para quantificar a importância relativa dos efeitos não-aditivos (e.g. heterose) na expressão dos caracteres-alvo de melhoramento é por meio de cruzamentos dialélicos.

O dialelo se refere a um delineamento de cruzamento genético em que a partir de n linhagens são obtidos todos os híbridos simples possíveis, podendo conter ou não os cruzamentos recíprocos (CRUZ; REGAZZI, 2012). O uso desses cruzamentos

permite a estimativa de parâmetros genéticos ligados a escolha dos genitores que podem produzir o(s) melhor(es) híbrido(s) F_1 e também F_2 com boas propriedades genéticas para seleção.

Griffing (1956) foi o pioneiro na introdução de cruzamentos dialélicos utilizando como base parentais homozigóticos (linhagens), propondo modelos para estimação da capacidade geral (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC). Estes termos CGC e CEC foram anteriormente propostos por Sprague e Tatum (1943) e referem-se ao efeito aditivo dos alelos transmitidos por um determinado parental (CGC) e aos desvios desse efeito que podem aumentar ou diminuir a média do híbrido (CEC), este último efeito advém principalmente de desvios de dominância e epistáticos. Já Gardner e Eberhart (1966) propuseram alteração na metodologia anterior para que os parentais a serem utilizados pudessem ser variedades e não somente linhagens. Diversos outros modelos foram propostos para análise de parâmetros genéticos, como os de Hayman (1954) e dialelos parciais, como os de Geraldi e Miranda Filho (1981), este último permite avaliar cruzamentos entre grupos diferentes de genótipos, otimizando os custos experimentais por reduzir o número de híbridos experimentais avaliados.

A análise dialélica parcial permite também acessar o padrão heterótico dos cruzamentos, tendo em vista que genitores contrastantes podem ser cruzados a fim de mesclar características desejáveis de ambos os grupos e/ou combinações superiores a qualquer dos parentais, no fenômeno conhecido como segregação transgressiva. Alguns estudos têm mostrado a presença de efeitos de heterose na expressão de caracteres em sorgo sacarino e biomassa (DURÃES, 2014; LOMBARDI, 2016; ROCHA, 2016; OLIVEIRA, 2015).

A produção de híbridos para oportunizar a heterose dos cruzamentos em sorgo tem despertado interesse no melhoramento da espécie para vários fins, principalmente visando produção de grãos, rendimento de etanol e biomassa energética. São nesses últimos dois pilares que se baseia o presente estudo, valendo-se do cruzamento entre linhagens de sorgo sacarino a fim de promover incremento tanto na produção de etanol, quanto na produção de biomassa. Portanto, a seleção ocorre com mais de um caráter-alvo e diante disso é necessário levar em consideração a relação existente entre os caracteres-alvo.

2.7. Associação de características em sorgo sacarino

A associação entre duas características é chamada de correlação. As causas da correlação genética são a ligação - que especifica a proximidade física de genes que controlam o caráter - e a pleiotropia - quando um único gene é responsável pela expressão de duas ou mais características.

A existência de correlações pode permitir a avaliação indireta de uma característica mais dificilmente mensurável por intermédio de outra que tenha forma de avaliação menos laboriosa. Além disso, as correlações também podem dar suporte ao melhorista em relação ao reflexo da seleção em outras características não-alvo, que serão alteradas caso haja correlação positiva ou negativa com o caráter-alvo, efeito chamado de 'arrasto'.

Em sorgo sacarino, por exemplo, Lombardi et al. (2015) descreveram a existência de correlação significativa entre vários caracteres morfológicos e agrônômicos/tecnológicos tais quais altura de plantas e dias para florescimento em relação ao caráter toneladas de Brix por hectare (TBH). Este último por sua vez possuiu correlação próxima à unidade em relação à produção de etanol por hectare. Diante do exposto, TBH é um ótimo indicador da produção de etanol dos genótipos e é uma característica mais acessível de ser mensurada.

Analogamente, Vendruscolo et al. (2016) descreveram correlações fortes entre altura de plantas e período do plantio ao florescimento com o caráter produção de matéria fresca em sorgo biomassa - genótipos de sorgo cujo apelo é o aporte de biomassa para queima e geração de energia elétrica. Enquanto segundo os mesmos autores também ocorreu correlação próxima à unidade entre produção de matéria fresca e produção de matéria seca, sendo esta última o caráter-alvo de seleção. Portanto, a avaliação de matéria fresca é boa indicadora da produção de matéria seca, não necessitando dessa forma de complicadores adicionais para avaliação desta por razão de secagem.

3. Material e Métodos

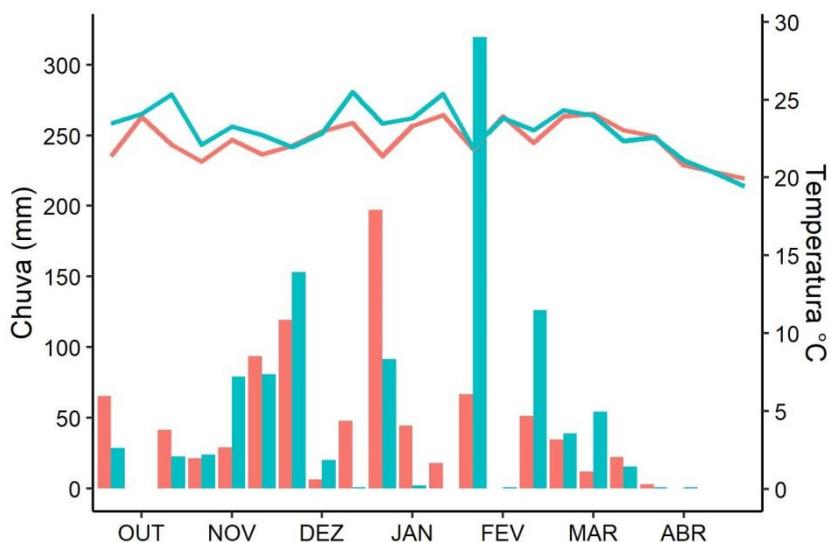
3.1. Locais

Os experimentos foram conduzidos em dois locais no Estado de Minas Gerais, Brasil, conforme descritos a seguir:

- i) Lavras - MG – na área experimental do Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, situada na fazenda ‘Muquém’ da Universidade Federal de Lavras, altitude de 918 m, 21° 14’ de latitude sul e 45° 00’ de longitude oeste. A temperatura média anual é de aproximadamente 19,4°C e a precipitação anual acumulada de 1.500 mm. O clima é o Cwa (Koppen). O solo é classificado como latossolo vermelho-amarelo com pequenas ondulações;
- ii) Sete Lagoas - MG – na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, na região central do estado, a 767 m de altitude, 19°27’7" de latitude sul e 44°14’9" de longitude oeste. A temperatura média anual é de aproximadamente 23°C, precipitação média de 1.400 mm. O clima é o Cwa. O solo é classificado como latossolo vermelho.

A precipitação acumulada em Lavras no período do plantio à colheita foi de 623 mm, enquanto em Sete Lagoas o total foi de 795 mm (Figura1). A umidade relativa média do ar em Lavras foi de 72% e em Sete Lagoas foi de 73,5%.

Figura 1. Precipitação decendial e temperatura média registradas durante o período de duração dos experimentos. As linhas representam as temperaturas e as barras a precipitação em Lavras (rosa) e Sete Lagoas (azul). Fonte: INMET.



3.2. Genótipos avaliados

Foram utilizados 36 genótipos, sendo 30 híbridos experimentais e 6 testemunhas. O grupo das testemunhas foi composto por:

- Dois híbridos comerciais: N31L5010 (Nexteppe Sementes do Brasil) e CV198 (Monsanto). São genótipos elite para rendimento de etanol, insensíveis ao fotoperíodo e de colmo suculento;
- Um híbrido (CMSXS5501A x CMSXS5021) do programa de melhoramento da Embrapa. É sensível ao fotoperíodo (*Ma1ma1*), tem colmo seco (*Dd*) e alto potencial de produção de biomassa;
- As variedades (linhagens): BRS 511, linhagem sacarina desenvolvida e lançada pela Embrapa que possui alto potencial para produção de biomassa e de etanol. Além de CMSXS643 e CMSXS646, que são linhagens do programa de melhoramento da Embrapa que possuem alta concentração de açúcar no colmo e também foram utilizadas como genitoras dos híbridos experimentais. Todas são insensíveis ao fotoperíodo e de colmo suculento.

Para obtenção dos híbridos experimentais foram cruzadas linhagens A com linhagens R de sorgo sacarino no delineamento de cruzamento dialélico parcial (Tabela 1).

Os híbridos insensíveis ao fotoperíodo foram obtidos pelo cruzamento de uma fêmea insensível (*ma1ma1*) com o macho insensível (*ma1ma1*). Os híbridos sensíveis foram obtidos pelo cruzamento de uma fêmea insensível (*ma1ma1*) com o macho sensível (*Ma1Ma1*). Os genótipos sensíveis são de colmo seco (*dry stem*), obtidos através do cruzamento das fêmeas com caldo (*juice stem - dd*) com um macho com colmo seco (*dry stem - DD*), mas ambos parentais possuem açúcar no colmo.

As linhagens utilizadas como genitoras nos cruzamentos são provenientes do Programa de Melhoramento de Sorgo Sacarino da Embrapa Milho e Sorgo. Vale ressaltar que as linhagens A utilizadas foram fêmeas sacarinas pré-selecionadas.

3.3. Plano e Condução experimental

Os experimentos em cada local foram conduzidos no delineamento látice triplo 6 x 6. A parcela experimental consistiu em duas linhas de cinco metros, espaçadas entre si em 0,7 m. O plantio ocorreu no dia 30 de novembro de 2017 em Lavras-MG, enquanto em Sete Lagoas foi efetuado no dia 26 de outubro de 2017.

Tabela 1 Códigos e descrição genótipos avaliados quanto ao pedigree e à resposta de sensibilidade ao fotoperíodo.

Código	Pedigree (linhagem A ♀ x linhagem R ♂)	Sensibilidade ao Fotoperíodo
1	CMSXS5502 A x BRS 508	Insensível
2	CMSXS5503 A x BRS 508	Insensível
3	CMSXS5504 A x BRS 508	Insensível
4	CMSXS5505 A x BRS 508	Insensível
5	CMSXS5506 A x BRS 508	Insensível
6	CMSXS5507A x BRS 508	Insensível
7	CMSXS5502 A x CMSXS643	Insensível
8	CMSXS5503 A x CMSXS643	Insensível
9	CMSXS5504 A x CMSXS643	Insensível
10	CMSXS5505 A x CMSXS643	Insensível
11	CMSXS5506 A x CMSXS643	Insensível
12	CMSXS5507A x CMSXS643	Insensível
13	CMSXS5502 A x CMSXS646	Insensível
14	CMSXS5503 A x CMSXS646	Insensível
15	CMSXS5504 A x CMSXS646	Insensível
16	CMSXS5505 A x CMSXS646	Insensível
17	CMSXS5506 A x CMSXS646	Insensível
18	CMSXS5507A x CMSXS646	Insensível
19	CMSXS5502 A x 201717B062	Insensível
20	CMSXS5503 A x 201717B062	Insensível
21	CMSXS5504 A x 201717B062	Insensível
22	CMSXS5505 A x 201717B062	Insensível
23	CMSXS5506 A x 201717B062	Insensível
24	CMSXS5507A x 201717B062	Insensível
25	CMSXS5502 A x CMSXS5022	Sensível
26	CMSXS5503 A x CMSXS5022	Sensível
27	CMSXS5504 A x CMSXS5022	Sensível
28	CMSXS5505 A x CMSXS5022	Sensível
29	CMSXS5506 A x CMSXS5022	Sensível
30	CMSXS5507A x CMSXS5022	Sensível
31	CMSXS5501A x CMSXS5021	Sensível
	CMSXS643	Insensível
	CMSXS646	Insensível
	BRS 511	Insensível
	N31L5010	Insensível
	CV198	Insensível

A adubação de plantio foi realizada com NPK na formulação 8-28-16, na dose de 400 kg.ha⁻¹. Foi realizado desbaste aos 30 dias após o plantio, com densidade final de oito plantas por metro linear. A adubação de cobertura foi realizada com uréia (250 kg.ha⁻¹). O controle de plantas daninhas ocorreu com aplicação de herbicida à base de atrazina, conforme dosagem recomendada para a cultura e também via capina manual. O controle de formigas foi realizado com uso de inseticida à base de fipronil, conforme recomendação.

A colheita em Lavras foi realizada no dia 05 de abril de 2018, os genótipos sensíveis ao fotoperíodo foram colhidos no dia 25 de abril de 2018. Já em Sete Lagoas-MG, procedeu-se a colheita em 08 de fevereiro de 2018, com exceção de genótipos tardios, cuja colheita ocorreu dia 23 de abril de 2018. A colheita foi realizada quando a maioria dos genótipos alcançou o estágio de grão pastoso tanto para genótipos sensíveis, quanto para insensíveis.

3.4. Caracteres avaliados

Foram avaliados os seguintes caracteres:

- Dias para florescimento (DPF, dias) – Número de dias decorridos do plantio até o florescimento de 50% das plantas da parcela;
- Altura de planta (ALT, m) – A partir da altura média (m) de cinco plantas tomadas aleatoriamente da parcela, sendo medidas da superfície do solo ao ápice da panícula com auxílio de trena métrica.
- Produção de massa verde (PMV, t.ha⁻¹) – Foram cortadas as plantas da parcela a 5,0 cm da superfície do solo. Em seguida foram pesadas (planta inteira sem panículas) valendo-se de uma balança de suspensão digital, em kg.
- Extração de caldo (EXT, %) – Foram amostradas aleatoriamente seis plantas inteiras por parcela, sem panículas. Em seguida as plantas foram desintegradas em desfibrador e homogeneizadas. Em Lavras, a extração do caldo foi realizada usando uma moenda de cana modelo de dois ternos com rolos de 10"x14". A porcentagem de extração foi calculada pela razão entre o peso do caldo e o peso dos seis colmos. Em Sete Lagoas foi retirada uma subamostra de 500 ± 0,5 g para extração do caldo em prensa hidráulica, com pressão mínima e constante de 250 kgf/cm² sobre a amostra, durante o tempo de 1 minuto. A partir do caldo extraído foi anotado o peso do caldo (g) da subamostra. A porcentagem de extração foi calculada pela fórmula $EXT = \text{Peso do caldo} / 500 \times 100$.
- Sólidos solúveis totais (SST, %caldo) – Determinados em caldo filtrado em papel por meio de um refratômetro digital de leitura automática, com correção automática da temperatura e resolução máxima de 0,1°Brix, de acordo com método proposto pela Association of Official Analytical Chemistry - AOAC (1990).

- Tonelada de brix por hectare (TBH, t. ha⁻¹) – Determinado a partir da expressão TBH = PMV x SST.

3.5. Análise estatístico-genética

3.5.1. Análise estatística

Foi realizada inicialmente a análise com recuperação da informação interblocos para cada local, conforme o modelo estatístico:

$$y_{ijk} = \mu + r_i + b_{(i)j} + t_k + e_{ijk},$$

em que:

μ é uma constante associada às observações;

r_i é o efeito da repetição i ;

$b_{(i)j}$ é o efeito do bloco j dentro da repetição i , $b_{(i)j} \sim N(0, \sigma_b^2)$, sendo σ_b^2 a variância de blocos dentro das repetições;

t_k é o efeito do genótipo k ;

e_{ijk} , é o erro experimental associado à parcela y_{ijk} , $e_{ijk} \sim (0, \sigma_e^2)$, sendo σ_e^2 a variância do erro.

A análise multilocais foi realizada, conforme o seguinte modelo:

$$y_{ijkl} = \mu + a_l + r_{i(l)} + b_{(il)j} + t_k + ta_{kl} + e_{ijkl},$$

em que:

y_{ijkl} é a observação da parcela do bloco j dentro da repetição i no local l que recebeu o genótipo k ;

μ é uma constante associada às observações;

a_l é o efeito do local l ;

$r_{i(l)}$ é o efeito da repetição i dentro do local l ;

$b_{(il)j}$ é o efeito do bloco j dentro da repetição i no local l , $b_{(il)j} \sim N(0, \sigma_b^2)$ sendo σ_b^2 a variância de blocos dentro das repetições;

t_k é o efeito do genótipo k ;

ta_{kl} é o efeito da interação do genótipo k com o local l ;

e_{ijkl} , é o erro experimental associado à observação y_{ijkl} , $e_{ijkl} \sim N(0, \sigma_e^2)$ sendo σ_e^2 a variância do erro.

Foi verificada para a análise multilocais, a homogeneidade das variâncias residuais entre os locais pelo teste de Levene implementado no pacote 'car' no

ambiente R (FOX; WEISBERG, 2012). O exame da normalidade dos resíduos foi feito pelo método QQ-Plot (KOSAK; PIEPHO, 2018). As análises estatísticas foram realizadas no pacote lme4 (BATES et al., 2014) em ambiente R (R CORE TEAM, 2018).

A partir dos modelos ajustados foram estimadas as médias fenotípicas ajustadas dos genótipos em cada local com auxílio do pacote *emmeans* (LENTH et al., 2018) e subsequente agrupamento de Scott-Knott usando o pacote *ExpDes* (FERREIRA et al, 2011).

A precisão associada às estimativas das médias fenotípicas foi aferida pela acurácia seletiva (RESENDE; DUARTE, 2007) conforme a fórmula:

$$Acc(\%) = 100 * \sqrt{1 - \frac{1}{F_c}}$$

Onde:

Acc é a acurácia seletiva em porcentagem;

F_c é a estimativa da estatística F de Snedecor-Fisher.

O coeficiente de variação experimental para cada caráter foi estimado conforme a seguinte fórmula:

$$CV(\%) = 100 * \frac{\sqrt{QMR}}{\bar{Y}}$$

Onde:

$CV(\%)$ é o coeficiente de variação experimental;

QMR é o quadrado médio do resíduo da análise de variância;

\bar{Y} é a média fenotípica de todos os genótipos para o dado caráter.

3.5.2. Análise dialélica conjunta

A partir das médias ajustadas dos híbridos experimentais do cruzamento dialélico parcial foi utilizado o procedimento descrito por Geraldi e Miranda Filho (1988), que se trata de uma adaptação do método de Griffith (1956), para estimação da capacidade geral e específica de combinação, conforme o seguinte modelo:

$$y_{kk'l} = \mu + a_l + g_k + g_{k'} + s_{kk'} + g_{akl} + g_{ak'l} + s_{akk'l} + e_{kk'l},$$

em que:

$y_{kk'l}$ é o valor médio da combinação híbrida entre a k-ésima linhagem A e k'-ésima linhagem R;

μ é a média geral;

a_l efeito do l-ésimo local;

g_k é o efeito da capacidade geral de combinação da k-ésima linhagem A;

$g_{k'}$ é o efeito da capacidade geral de combinação da k'-ésima linhagem R;

$s_{kk'}$ é o efeito da capacidade específica de combinação entre as linhagens A e R;

g_{akl} é o efeito interação entre capacidade geral de combinação da k-ésima linhagem A e o l-ésimo local;

$g_{ak'l}$ é o efeito interação entre capacidade geral de combinação da k-ésima linhagem R e o l-ésimo local;

$s_{akk'l}$ é o efeito da interação entre a capacidade específica de combinação entre as linhagens A e R e o l-ésimo local;

$e_{kk'l}$ erro experimental médio.

Posteriormente, a significância dos efeitos das capacidades geral e específica de combinação foi testada por intermédio do teste t-Student a 5% de significância. Esta análise foi realizada no software genes (CRUZ, 2013).

3.5.3. Índice de seleção

A seleção dos genótipos com base em múltiplos caracteres foi realizada por intermédio do índice de seleção da soma das variáveis estudentizadas. Neste caso o índice T, de forma análoga ao índice Z (MENDES et al., 2010), foi implementado a partir da estudentização das médias ajustadas dos genótipos para cada caráter m a partir da seguinte expressão:

$$t_{km} = \frac{\bar{y}_{km}}{s_{\bar{y}_{km}}},$$

em que: t_{km} é o valor estudentizado da média fenotípica ajustada do genótipo k quanto ao caráter m ; \bar{y}_{ik} é a média fenotípica ajustada do híbrido i ; $s_{\bar{y}_{km}}$ é o erro padrão da média fenotípica ajustada do genótipo k quanto ao caráter m .

A partir da soma desses valores estudentizados dos caracteres de cada genótipo k , obtêm-se os valores do índice T, o qual pode ser denotado pela seguinte expressão:

$$T_i = \sum_{k=1}^n t_{ik} = t_{i1} + t_{i2} + \dots + t_{in}.$$

Posteriormente foi feita a representação gráfica por intermédio de biplots dos genótipos a partir das médias fenotípicas padronizadas, onde cada coluna na tabela

de dupla-entrada corresponde à combinação entre caráter e local, conforme procedimento descrito por Yan e Tinker (2006). A confecção dos gráficos foi realizada com uso do pacote GGEBiplots (DUMBLE, 2017)

4. Resultados

4.1. Análise multilocais

O delineamento em látice não se mostrou eficiente no controle da variação ambiental para nenhum dos caracteres, portanto prosseguiram-se as análises assumindo o delineamento em blocos completos casualizados. A precisão experimental foi considerada de moderada a alta em cada local, com acurácia na média de genótipos mínima de 67% para TBH em Sete Lagoas nas análises individuais (resultados não inclusos). O mesmo padrão pôde ser observado nas análises conjuntas com acurácia variando de 91% para TBH a quase 100% para DPF (Tabela 2).

Tabela 2 Resumo da análise conjunta dos caracteres dias para florescimento (DPF), altura de plantas (ALT), produção de matéria verde (PMV), eficiência de extração (EXT), teor de sólidos solúveis total (SST) e toneladas de Brix por hectare (TBH) e métrica de precisão experimental acurácia seletiva (Acc).

FV	Df	Valor de F					
		DPF	ALT	PMV	EXT	SST	TBH
Locais (L)	1	1939,05*	0,08	85,54*	934,74*	27,50*	39,76*
Genótipos (G)	35	628,63*	25,75*	8,10*	5,43*	8,29	5,99*
Híbridos Experimentais (H)	29	647,32*	21,10*	5,37*	5,38*	7,72*	3,68*
CGC A	5	1,39	1,2	1,97	2,74*	4,17*	2,97*
CGC R	4	4679,97*	140,14*	32,55*	31,77*	43,03*	15,93*
CEC A x R	20	2,27*	2,27*	0,78	0,76	1,54	1,41
Testemunhas (T)	5	607,20*	55,38*	23,18*	6,97*	11,43*	17,07*
H vs. T	1	165,54*	12,34*	11,91*	0,20	11,05*	17,91*
G x L	35	43,17*	1	1,99*	1,56*	2,88*	2,90*
H x L	29	47,26*	1,05	1,56*	1,76*	2,29*	2,08*
CGC A x L	5	0,24	0,98	1,47	4,65*	1,75	0,99
CGC R x L	4	337,20*	0,78	5,71*	1,31	10,18*	8,84*
CEC A x R x L	20	1,03	1,13	0,75	1,13	0,84	1
T x L	5	27,86*	0,45	4,37*	0,68	5,06*	7,00*
(H vs. T) x L	1	0,87	2,21	2,74	0,04	9,11*	6,26*
Acc		100%	98%	94%	90%	94%	91%
CV		2,08%	5,35%	15,63%	9%	7,33%	18,17%

* significativo à 5% de significância pelo teste de F (Snedecor-Fisher).

Apenas para o caráter altura de plantas (ALT) não houve diferença entre os locais (Tabela 2). Na média, em Sete Lagoas os híbridos foram mais tardios, obtiveram maior teor de SST, contudo produziram menos matéria verde (PMV), obtiveram maior porcentagem de extração (EXT) e menor rendimento de açúcares (TBH) em relação à Lavras (APÊNDICE B).

Os genótipos avaliados no experimento divergiram entre si para todos os caracteres avaliados na análise conjunta (Tabela 02). A decomposição dessa fonte de variação revelou efeito significativo de híbridos experimentais para todas as características. De modo semelhante, a decomposição do efeito de testemunhas na análise conjunta indicou que esse grupo não foi homogêneo, compreendendo genótipos com diferentes desempenhos, o que justificou o uso de mais de uma testemunha. Além disso, existiu diferença no contraste da média entre híbridos experimentais e testemunhas, com exceção da extração de caldo (EXT), implicando que os híbridos experimentais diferiram das cultivares comerciais.

Houve interação entre genótipos e locais em todos os desdobramentos, com exceção do caráter ALT (Tabela 2). Diante disso, o desempenho dos genótipos foi desdobrado para cada local para as variáveis EXT, DPF, PMV, TBH e SST e na média entre locais para ALT. Em relação à tipicidade da interação genótipos x ambientes, houve predomínio de interação simples apenas para DPF e TBH. Os demais atributos apresentaram fração variada entre interação simples e complexa (Figura 2).

Ocorreu interação do contraste dos híbridos experimentais vs. testemunhas com os locais apenas para os caracteres TBH e SST. O desdobramento da interação revela que, para esses últimos caracteres, o desempenho dos híbridos divergiu das testemunhas apenas em Lavras. Na análise do contraste verificou-se que o desempenho das testemunhas foi igual ou superior ao dos híbridos experimentais (Tabela 3).

Figura 2 Desdobramento da interação genótipos x ambientes para os caracteres dias para florescimento (DPF), eficiência de extração (EXT), produção de matéria verde (PMV), teor de sólidos solúveis totais (PMV) e toneladas de brix por hectare (TBH).

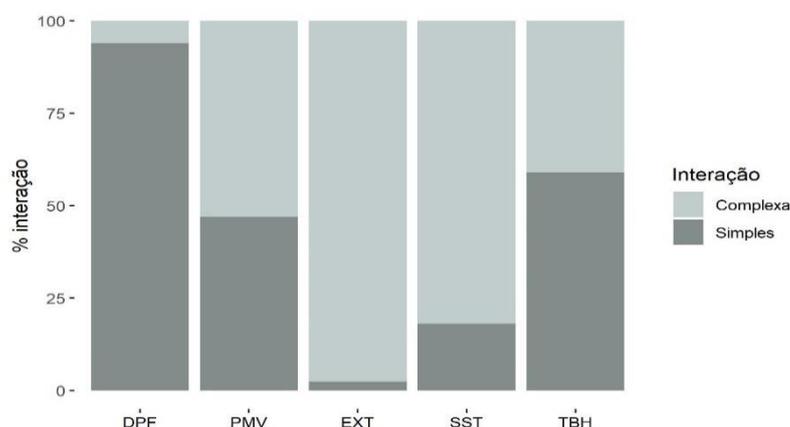


Tabela 3 Desdobramento dos contrastes de médias para híbridos experimentais vs testemunhas para cada local e caráter.

Caráter	Tratamentos			
	Híbridos		Testemunhas	
	Lavras	Sete Lagoas	Lavras	Sete Lagoas
TBH	8,02a	6,86a	10,35b	7,21a
SST	13,99b	15,20a	15,50a	15,32a
DPF (dias)	91,11a		96,75b	
ALT (m)	3,21b		3,35 ^a	
PMV (t.ha ⁻¹)	51,52b		57,95 ^a	
EXT (%)	50,56a		50,22 ^a	

*Médias seguidas pela mesma letra na horizontal são estatisticamente semelhantes conforme teste F à 5% de significância. Para os caracteres TBH e SST as letras na horizontal comparam o desempenho de híbridos ou testemunhas entre os locais.

4.2. Análise dialélica conjunta

Houve divergência entre os efeitos de CGC das linhagens A apenas para os caracteres EXT, SST e TBH, enquanto as linhagens R foram divergentes entre si para todas as características. Contudo, a capacidade específica de combinação (CEC) dos híbridos foi significativa apenas para dias para florescimento (DPF) e altura de plantas (ALT) (Tabela 2). Ademais, houve interação da CGC das linhagens R com locais para quase todos os caracteres avaliados, excetuando-se a altura das plantas. Para a CGC das linhagens A e a CEC não se constatou interação com locais para os caracteres avaliados, com exceção para eficiência de extração (EXT) (Tabela 2).

Devido a existência de interação entre CGC de linhagens R e locais foi necessária a análise das capacidades de gerais e específicas para cada local e

caráter, exceto para ALT onde a interação não ocorreu para nenhum dos componentes da GCG e CEC.

Quanto às estimativas de CGC do grupo de linhagens A, houve destaque para os genitores CMSXS5506 e CMSX5507, os quais associaram os maiores efeitos para os caracteres de interesse, muito embora não significativos. Contudo, diante da necessidade da escolha de genitores, estas linhagens obtiveram os melhores resultados. Em geral, as linhagens do grupo A obtiveram desempenho homogêneo para os caracteres (Tabela 3).

As estimativas de CGC do grupo de linhagens R, em contraste com as do grupo A, foram significativas para a quase totalidade dos atributos avaliados. Com destaque para a linhagem fotossensível CMSXS5022, que apresentou em geral estimativas positivas e significativas. Esta linhagem conferiu sensibilidade ao fotoperíodo em todos os cruzamentos que participou como genitora, e estes híbridos apresentaram bom ranqueamento, principalmente para biomassa (PMV) e em decorrência disso, também para rendimento de açúcares (TBH).

Poucos dos efeitos de capacidade específica de combinação foram significativos (APÊNDICE A), logo não há evidências suficientes para afirmar que houve efeito heterótico nos cruzamentos. Muito embora com estimativas não significativas para o caráter-alvo (TBH), algumas estimativas dos efeitos de CEC, mensurados em porcentagem em relação à média geral de cada híbrido em cada local, alcançaram 31,5% para o híbrido 30 em Lavras e 22,2% em Sete Lagoas, 16% para 17 e 22,3% para 3 em Lavras.

O híbrido experimental 25 apresentou efeito negativo significativo de CEC para o caráter ALT, enquanto o híbrido 26 apresentou efeito positivo. Ademais, houve presença de efeito heterótico significativo para alguns genótipos no caráter DPF (APÊNDICE A), nenhum dos efeitos de CEC foi significativo para PMV, EXT, SST e TBH (Tabela 2).

Tabela 4 Estimativas de efeitos de capacidade geral de combinação para linhagens do grupo A e para linhagens do grupo R para cada desdobramento de caráter e local.

Linhagem	DPF		ALT	PMV		EXT		SST		TBH	
	Lavras	Sete Lagoas		Lavras	Sete Lagoas	Lavras	Sete Lagoas	Lavras	Sete Lagoas	Lavras	Sete Lagoas
(Grupo A)											
CMSXS5502	0.62	1.42*	-0.09*	-7.43	-1.48	-3.14	-0.05	-1.04*	-0.41	-1.503	-0.431
CMSXS5503	-0.18	-0.35	0.02	-1.48	-1.17	-3.32	1.12	0.11	-0.01	-0.136	-0.244
CMSXS5504	-0.11	-0.15	0.04	1.81	0.9	-0.26	0.3	-0.55	-0.12	-0.091	0.166
CMSXS5505	0.42	0.32	0.01	1.73	-0.77	-0.95	-1	0.43	0.29	0.38	0.015
CMSXS5506	-0.91	-0.48	0.01	6.5	-0.21	8.62*	-0.74	-0.21	0.18	0.756	0.026
CMSXS5507	0.16	-0.75	0.02	-1.12	2.73	-0.94	0.37	1.26*	0.07	0.594	0.466
(Grupo R)											
201717B062	-10.26*	-17.41*	-0.31*	-13.01*	-3.26	1.12	3.09*	-2.07*	0.12	-2.643*	-0.37
BRS 508	-7.98*	-15.35*	-0.09*	-5.75	-3.36	1.62	1.07	1.41*	1.17*	-0.122	0.04
CMSXS5022	36.24*	62.57*	0.75*	21.22*	11.22	-8.23*	-10.78*	-1.15*	-2.63*	1.983*	0.32
CMSXS643	-8.31*	-12.96*	-0.17*	-7.23*	-2.75	1.4	4.42*	-0.41	0.18	-1.276*	-0.28
CMSXS646	-9.70*	-16.85*	-0.18*	4.78	-1.84	4.08*	2.19*	2.22*	1.16*	2.059*	0.29

4.3. Agrupamento de médias

O desempenho para DPF foi altamente coincidente entre os locais. Todos os cruzamentos que envolveram o genitor CMSXS5022 foram os mais tardios, principalmente em virtude da sensibilidade ao fotoperíodo conferida por esse genitor. O grupo dos híbridos mais precoces foi mais heterogêneo, com genótipos do grupo controle e experimental. O grupo de genótipos de maior altura foi composto pelas testemunhas BRS 511, CMSXS5501A x CMSXS5021 e os cruzamentos que envolveram o parental CMSX5502. Todos os outros híbridos compuseram o grupo de menor porte (APÊNDICE A).

Os híbridos de colmo seco (descendentes de CMSX5022) e a testemunha CMSX5501A x CMSX5021, obtiveram índices de eficiência de extração de caldo consideravelmente inferior aqueles de colmo suculento (APÊNDICE A).

O genótipo com maior produção de matéria verde (PMV) foi a testemunha CMSXS5501A x CMSXS5021. No entanto, essa foi agrupada com os híbridos experimentais oriundos dos cruzamentos com o genitor CMSX5502. Todos esses genótipos foram também os mais tardios (DPF) e de maior porte (ALT). Concomitantemente, os genótipos de menor EXT também foram os mesmos que compuseram o grupo de maior média para PMV, DPF e ALT (APÊNDICE B).

Em Lavras, o teor de sólidos solúveis totais (SST) variou de 9,67 a 18,83, enquanto que em Sete Lagoas, os valores mínimo e máximo foram de 11,67 a 16,90. Todos os genótipos pertenceram a um mesmo grupo de Scott-Knott em ambos os locais e nenhum padrão pôde ser observado quanto aos melhores colocados em relação ao porte, precocidade, produção de matéria verde e TBH.

Já para o caráter TBH, houve pouca coincidência entre o desempenho de genótipos nos locais. A correlação de Spearman foi de aproximadamente 0,31. No grupo dos 10 genótipos superiores em cada local houve coincidência de 60%. No caso dos 10 piores foi de 40%. Conforme já citado, houve considerável efeito de interação complexa para esse caráter, com tendência de inversão de ranqueamento nos genótipos intermediários e de menor desempenho. Apesar disso, os genótipos 31 e 30 foram os melhores colocados em ambos os ambientes.

As médias fenotípicas pontuaram TBH mínimo de 4,54 e máximo de 18,84, com média 8,42 em Lavras. Em Sete Lagoas o mínimo foi de 5,06, máximo de 10,11 e média 6,92. Portanto, é notório o efeito de localidade tanto na média dos genótipos,

que foi superior em Lavras, quanto na variabilidade entre eles, que foi menor em Sete Lagoas.

4.4. Índice de Seleção (T) e biplots

Conforme o índice, os genótipos com melhor desempenho geral foram CMSXS5501A x CMSXS5021 e todos os cruzamentos envolvendo o parental CMSXS5022 (APÊNDICE C). Vale ressaltar que apenas estes obtiveram o índice positivo, ou seja, no geral estiveram acima da média para as variáveis analisadas ponderadas por seus respectivos erros-padrões.

Os valores do índice T para cada atributo também foram utilizados para confecção de gráficos do tipo biplot. Nesse trabalho, as variáveis de entrada no gráfico foram todos os desdobramentos que foram necessários para análise das médias fenotípicas. No caso, cada análise individual para EXT, DPF, PMV, ST e TBH, além da análise na média de locais para ALT.

O primeiro e o segundo componentes principais capturaram 80,87% da variação encontrada nos valores de média estudadas. A Figura 3 permite visualizar o ranqueamento de genótipos. O que se pode verificar é que o ranqueamento ocorreu de forma bastante semelhante ao do índice T descrito acima (APÊNDICE C).

A Figura 3 também permite visualizar o comportamento médio de cada genótipo e também da estabilidade em relação aos caracteres. É possível deduzir, portanto, que os genótipos de maior média foram o CMSXS5501A x CMSXS5021 e o híbrido experimental 30. A testemunha CMSXS5501A x CMSXS5021 apresentou elevado valor em relação à média dos demais. Também exibiu perfil estável quanto ao desempenho nos diferentes atributos avaliados e foi seguida pelo híbrido experimental 30, cujo desempenho foi melhor para os caracteres PMV, ALT e DPF.

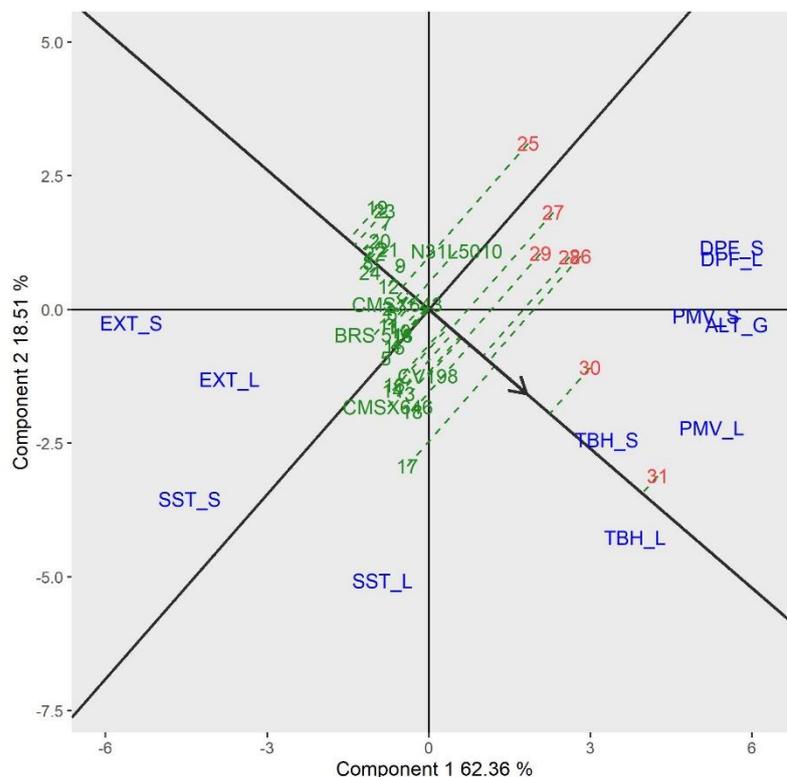
É possível também observar a relação entre os caracteres avaliados. Na Figura 4 quando dois vetores apresentarem ângulo entre si de 0° , a correlação é dita máxima (igual a um), quando o ângulo é 90° , a correlação é dita nula – ou seja, são variáveis não correlacionadas – e quando o ângulo formado é de 180° , indica a existência de correlação inversa (igual a menos um).

Todos os caracteres individualmente obtiveram boa correlação entre os ambientes Lavras e Sete Lagoas. Houve forte correlação positiva entre DPF, PMV e ALT. Enquanto que estes obtiveram fortes correlações negativas ou nulas com EXT e

SST. A correlação dos primeiros com TBH (caráter-alvo) foi moderada, enquanto com os últimos foi praticamente nula.

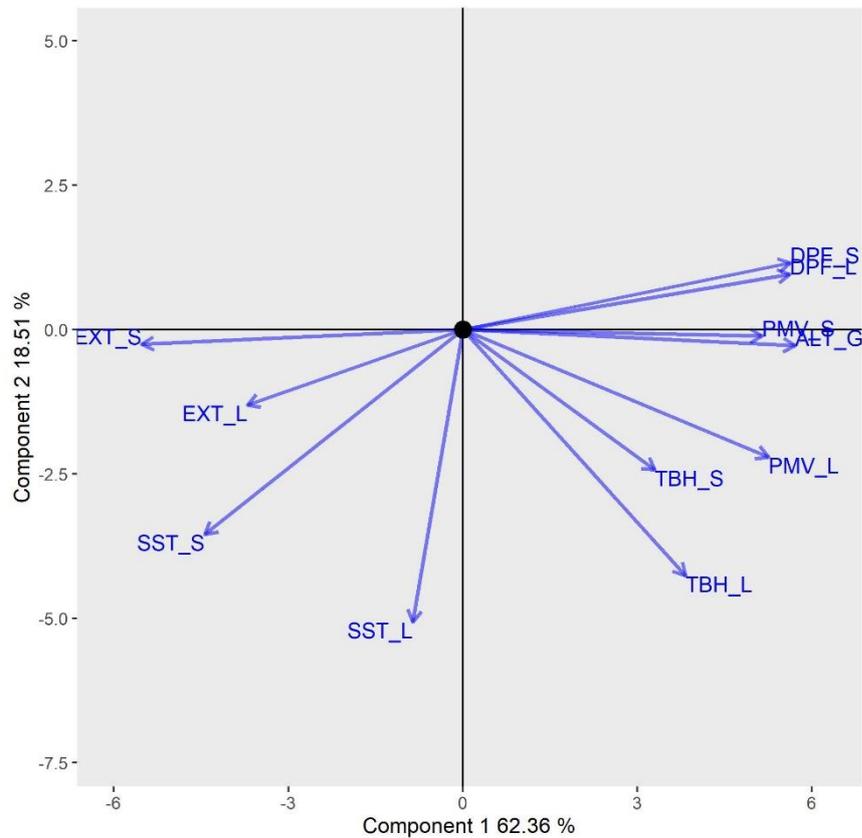
Uma informação importante a respeito dos caracteres é sua capacidade em representar e discriminar os genótipos. Em relação ao poder de discriminação, todas as variáveis obtiveram um desempenho semelhante (verificado pelo comprimento dos vetores, partindo da origem do gráfico). Contudo, quanto à representatividade, os caracteres TBH em Lavras e Sete Lagoas, PMV em Lavras, ALT e PMV em Sete Lagoas foram os que melhor descreveram os genótipos (verificado a partir da proximidade do vetor do caráter (linha tracejada) com o vetor médio (linha contínua que passa pela origem) (Figura 5).

Figura 3 Representação dos genótipos para os caracteres EXT, DPF, ALT, PMV, SST e TBH nos desdobramentos para Lavras (L) e Sete Lagoas (S) sob a perspectiva de média vs estabilidade.



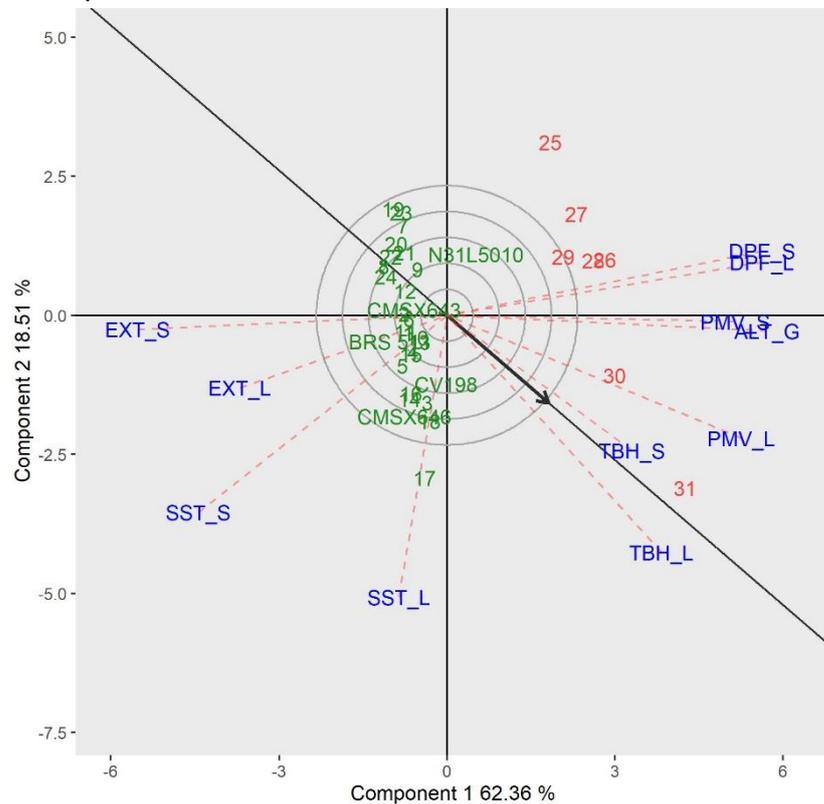
Genótipos representados em coloração salmão são sensíveis ao fotoperíodo, os genótipos insensíveis são representados em verde. O eixo com seta aponta para o genótipo com desempenho médio (abscissa ATC) e o eixo em negrito perpendicular a este passando pela origem é a ordenada ATC. A projeção dos genótipos sobre a abscissa ATC representa o desempenho de cada genótipo em relação ao desempenho médio. Assim os genótipos 31 e 30 (*CMSX5501* x *CMSXS5021* e *CMSXS5507* x *CMSXS5022*) obtiveram o melhor desempenho.

Figura 4 Representação dos caracteres EXT, DPF, ALT, PMV, SST e TBH nos desdobramentos para Lavras (L) e Sete Lagoas (S) sob a perspectiva de associação entre caracteres.



Representação vetorial das combinações de caracteres e locais. Os vetores em azul partem da origem e projetam-se na direção do caráter ao qual está associado. O cosseno do ângulo formado entre os vetores aproxima a correlação existente entre eles. Ângulos agudos 0 a 90° implicam correlações variando de 1 e 0, respectivamente. Ângulos obtusos de 90 a 180° implicam correlações variando de 0 a -1, respectivamente.

Figura 5 Representação dos genótipos para os caracteres EXT, DPF, ALT, PMV, SST e TBH nos desdobramentos para Lavras (L) e Sete Lagoas (S) sob a perspectiva de discriminação vs representatividade.



Representação vetorial das combinações de caracteres e locais. As linhas tracejadas que partem da origem apontam para a direção da combinação de caráter e local ao qual estão associadas, o comprimento dessas linhas aproxima o desvio padrão dos genótipos para essa determinada combinação e, portanto, reflete o poder de discriminar genótipos desse caráter e local. O ângulo entre a linha tracejada e a abscissa ATC reflete o poder de representatividade do caráter.

5. Discussão

Os valores de acurácia seletiva (Acc) observados no experimento foram considerados altos de acordo com a classificação de Resende e Duarte (2007). Vale salientar, embora conhecido, que a acurácia reflete a correlação entre os valores preditos e o valor real do caráter para os genótipos. Portanto, as médias fenotípicas ajustadas dos híbridos no experimento permitem boa aproximação e representatividade do valor genético destes. No entanto, a análise por local revelou acurácia moderada para TBH em Sete Lagoas (67%). Nesse local os genótipos apresentaram menor divergência que em Lavras. Essa provavelmente foi uma das principais causas da interação G x E verificada para esse caráter.

Os resultados encontrados nesse trabalho estão em consonância com o verificado na literatura para os caracteres morfoagronômicos DPF e ALT (SETIAWAN; KAMAL; HADI, 2016; CUNHA; LIMA, 2010; MENEZES et al., 2017) e também para os ligados à produção de biomassa e açúcar (PMV, SST e TBH) no tocante à amplitude de variação da média fenotípica dos genótipos.

Diferenças macro ambientais puderam ser observadas nos experimentos, algumas, no entanto, podem ser explicadas por diferenças na condução experimental, como é o caso de DPF. Os genótipos foram mais tardios em Sete Lagoas. Contudo, deve ser levado em conta que o experimento em Sete Lagoas foi semeado com um mês de antecedência em relação à Lavras e que os genótipos sensíveis ao fotoperíodo somente floresceram em Sete Lagoas no dia 18 de Março – o comprimento do dia só passou a ser menor que 12h20min no dia 09 de março de 2018. Por essa razão, a diferença na média de DPF está intimamente ligada à questão da data de semeadura entre os experimentos. Visto que os genótipos fotossensíveis do experimento semeado precocemente apresentaram ciclo um mês maior em relação àqueles semeados mais tardiamente em relação à data em que o fotoperíodo foi menor que o requerido e não em relação à diferença ambiental entre Lavras e Sete Lagoas.

O teor de sólidos solúveis totais (SST) foi da ordem de 1°Brix superior em Sete Lagoas. Esse resultado pode ser explicado, em parte, pela temperatura levemente superior nesse ambiente e a menor maturação dos genótipos em Lavras, dada a precocidade da colheita nesse ambiente. O ponto de colheita para genótipos sensíveis ao fotoperíodo ainda carece de literatura especializada visto que esses materiais possuem ciclo mais variável (DURÃES; MAY; PARRELLA, 2012). Contudo, observações experimentais do programa de melhoramento de sorgo da Embrapa apontam que colheita mais tardia para esses genótipos pode ser mais vantajosa para caracteres relacionados à produção de açúcares.

A média de SST nos experimentos não chegou a alcançar aquele considerado ideal (14°Brix) (PARRELLA, 2011) para nenhum híbrido experimental. Esse índice foi alcançado apenas pela testemunha CMSX646 em Lavras. Os genótipos CMSX646 e CMSX643 são linhagens parentais que também foram utilizadas como testemunhas no experimento. No ranqueamento e nos caracteres relacionados à produção de açúcar, os híbridos originados dos cruzamentos desses genitores não apresentaram

desempenho superior ao das linhagens *per se*, portanto, não houve heterobeltiose para SST, ao menos em relação a esses híbridos. Em estudo molecular na detecção de QTL's associados ao caráter SST, Felderhoff et al. (2012) descrevem que o controle é predominantemente aditivo, implicando que não há expectativa de heterose e que para alcançar altos valores de SST, ambos os parentais necessitam de média alta. Portanto, as linhagens A contribuíram para a redução de SST. As fêmeas utilizadas no presente estudo divergem das anteriormente utilizadas em hibridações por apresentarem alto teor de açúcar no caldo, ainda assim se faz necessário desenvolvimento de linhagens com maior potencial para esse caráter.

A produção de matéria verde (PMV) é o segundo caráter-alvo de maior importância considerado nesse trabalho, pois está diretamente associado à geração de biomassa para queima e geração de energia elétrica (OLIVEIRA, 2015). A PMV foi superior em Lavras, essa superioridade também influenciou na superioridade nos valores de TBH, visto que são diretamente correlacionados.

Segundo Schaffert et al. (2011) o genótipo ideal deve produzir um mínimo de 60 t.ha⁻¹ de biomassa, vários híbridos experimentais apresentaram potencial acima desse corte, como o 25, todos os cruzamentos contendo a linhagem CMSXS5022 R, além dos híbridos 14 e 17. A maior parte destes híbridos apresenta sensibilidade ao fotoperíodo. No entanto, alguns genótipos insensíveis se aproximaram do ideótipo (APÊNDICE B). Os valores de CEC foram de pequena magnitude para esse caráter. Guan et al. (2011) relatam que o controle de caracteres relacionados à produção de biomassa ocorre por dominância parcial. Portanto, diante da existência de efeito de dominância, o efeito heterótico só não é manifestado quando não há boa complementariedade entre as linhagens A e R ou ainda, quando não houver efeito de dominância para os caracteres relacionados ao rendimento de etanol e produção de biomassa em sorgo sacarino. Essa indagação não está claramente respondida na literatura e tem o potencial de impactar o tipo de cultivar a ser desenvolvido para a cultura.

Segundo Lombardi et al. (2015), o caráter toneladas de brix por hectare (TBH) é aquele que melhor correlaciona a produção de etanol por hectare. Por essa razão, atenção especial tem que ser dada para esse caráter. Apesar da correlação com TBH, nenhuma equivalência é feita entre o limiar de 3600 L.ha⁻¹ do ideótipo de produção de etanol e a produção de TBH. Essa informação necessita ser produzida, se possível,

em outros experimentos. Logo, o apontamento de quais híbridos experimentais atingem o mínimo necessário em litros de etanol por hectare para viabilidade na indústria fica prejudicado. Todavia, é notória a superioridade na média dos genótipos para TBH em Lavras com relação à Sete Lagoas. Essa diferença está relacionada também às maiores médias fenotípicas de PMV em Lavras, visto que o teor de SST foi superior em Sete Lagoas. A CEC também não foi significativa para esse caráter. É comum na literatura a descrição de efeitos aditivos ou sua predominância em cruzamentos envolvendo sorgo para caracteres relacionados à produção de açúcar e biomassa (VINAYKUMAR et al., 2011; KNOLL et al., 2016; OLWENY et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019), constatação que corrobora com os resultados obtidos.

A existência de variabilidade genética e também a sua dimensão são fatores primordiais para o melhoramento genético de qualquer cultura. No presente estudo, foi encontrada variabilidade em todos os caracteres avaliados na análise conjunta (Tabela 2) para híbridos experimentais, portanto a seleção é possível. O desdobramento dos efeitos genéticos revela que há variabilidade entre os genitores nas linhagens macho-estéreis (EXT, TBH, SST) e também nas linhagens restauradoras. Porém não houve efeito significativo de CEC i.e. heterose para o caráter TBH, assim como EXT, PMV e SST no efeito principal. Duas hipóteses podem então ser levantadas: a detecção da heterose poderia ter sido prejudicada pela dimensão do erro experimental, ou não houve complementariedade entre os genitores nas combinações híbridas.

Com magnitudes semelhantes para as métricas de precisão experimental, outros autores observaram valores significativos de CEC (DURÃES, 2014; ROCHA et al., 2018; LOMBARDI et al., 2018). É importante a ressalva que muitas das análises dialélicas, tais quais as realizadas pelos referidos autores que encontraram significância para CEC, avaliaram tanto os parentais, quanto os F_1 's. Segundo Yao et al. (2013) a inclusão de parentais nas análises dialélicas produz estimativas viesadas por incluir como heterose o efeito epistático aditivo \times aditivo. Logo, os efeitos das CECs nestes trabalhos podem estar superestimados pela inclusão de efeito de genes epistáticos recessivos no cômputo da heterose.

É possível que os resultados encontrados sejam devido então à falta de complementariedade das linhagens. Para testar essa hipótese é necessária a avaliação da divergência genética entre os grupos A e R para os genes de interesse

e também a estimação dos desvios de dominância para produção de etanol e biomassa, a fim de confirmar com precisão a existência de heterose para esses caracteres em sorgo sacarino. Além disso, a melhoria da precisão experimental, com aumento do número de repetições em próximos experimentos pode auxiliar na detecção de heterose nos cruzamentos, visto que alguns cruzamentos exibiram CEC em torno de 30% da média de tal combinação híbrida.

A heterose é a principal razão para a opção de cultivares híbridos. Vencovsky (1987) descreve que a CGC e CEC são dadas de acordo com a frequência média de alelos favoráveis para os *loci* que controlam o caráter para a CGC e para a diferença nas frequências alélicas entre os genitores e o efeito de dominância para a CEC. Para produção de um híbrido com alta heterose é necessário que os genitores tenham média alta e que sejam divergentes geneticamente para os *loci* envolvidos na expressão do caráter. Com isso, é possível afirmar que não houve padrão heterótico entre o grupo de linhagens A e R utilizadas no presente estudo para os principais caracteres agronômicos de interesse.

As fêmeas (linhagens macho-estéreis) utilizadas nesse estudo são oriundas do programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo e são consideradas de alto teor de açúcar. Isso diverge de híbridos obtidos em outros experimentos que utilizavam fêmeas forrageiras (DURÃES; MAY; PARRELLA, 2016). Contudo, o processo de obtenção das linhagens fêmeas do presente estudo foi realizado pela introgressão de genes que conferem alto teor de açúcar no caldo a partir do cruzamento com linhagens R e condução da população segregante pelo método genealógico (SILVA; PARRELLA; SILVA, 2016). Este fato, aliado ao truncamento de seleção de genótipos com SST > 15°Brix provavelmente fixou *loci* nos dois parentais, reduzindo a divergência das frequências alélicas entre o grupo A e R, de forma que a capacidade específica de combinação foi reduzida.

Ainda segundo Silva, Parrela e Silva (2016), as fêmeas outrora utilizadas produziam caldo, porém com baixíssimo teor de açúcar nos colmos, o que justificou o objetivo de promover o melhoramento para incrementar esse caráter. No entanto, a utilização de linhagens R como fonte de alelos prejudicou a formação de grupos heteróticos. Portanto, caso possível, a geração de linhagens fêmeas em próximos ciclos de melhoramento, com vista para produção de híbridos, deverá utilizar outras fontes de genótipos com alto teor. Preferencialmente fora de genótipos do

germoplasma do programa de melhoramento em questão, ou de linhagens que possuam alto teor e que sejam divergentes das linhagens R utilizadas para confecção dos híbridos.

Há estratégias de melhoramento de linhagens para produção de híbridos que podem ser encontradas na literatura, como por exemplo, os testes de progênie (HALLAUER; MIRANDA FILHO, 1981) ou adaptação de métodos como os do híbrido críptico (LONNQUIST; WILLIAMS, 1967), onde a necessidade de plantas prolíficas pode ser substituída por perfilhamento ou por diferentes cortes na cultura do sorgo, seleção recorrente recíproca, além de outros. Estas estratégias buscam concomitantemente elevar a frequência de alelos favoráveis nas linhagens e otimizar a capacidade de combinação dos híbridos.

Ainda a respeito das linhagens macho-estéreis, houve menor divergência genética dentro deste grupo do que entre as linhagens restauradoras de fertilidade (Tabela 2). Essa observação é comum também em outros dialelos de sorgo sacarino ou biomassa no Brasil e fora dele (VINAYKUMAR et al., 2011; BUNPHAN et al., 2015; OLIVEIRA, 2015; LOMBARDI, 2016). Essa realidade incrementa a necessidade de desenvolvimento de linhagens e revela que não apenas a média deve ser aumentada, como também a variabilidade genética no grupo das linhagens A.

As linhagens restauradoras foram altamente divergentes entre si para todos os caracteres (Tabela 2), com destaque para o genitor CMSXS5022 que obteve boas capacidades combinatórias para os caracteres PMV e TBH. Este genitor confere sensibilidade ao fotoperíodo em todos os cruzamentos que participa. O que também evidencia haver importância de híbridos sensíveis para incremento de produção de etanol e biomassa em sorgo sacarino, desde que não haja prejuízos como alto teor de lignina, baixo EXT e SST. A sensibilidade é reconhecidamente importante em sorgo biomassa (MAY; SILVA; SANTOS, 2013).

Visto que não houve significância para os efeitos de CEC dos cruzamentos experimentais, a alternativa é apenas a escolha dos melhores híbridos no experimento. Ademais, para a avaliação do desempenho dos genótipos com base em suas médias fenotípicas ajustadas é necessária a avaliação da interação genótipos \times locais. Nesse sentido, somente ALT não exibiu interação entre os locais e, portanto, a avaliação na média entre os locais não pôde ser realizada para os demais caracteres, havendo a necessidade de observação dos desdobramentos em cada local.

Conforme Romagosa e Fox (1993), a interação entre genótipos e ambientes é a expressão diferencial de genes em cada ambiente. As implicações podem ser tais que determinados genótipos tenham um bom desempenho em um dado ambiente e mau em outro, ou seja, há uma redução na correlação dos valores genotípicos e fenotípicos nos diversos ambientes de avaliação. Ainda conforme os autores, esse fato obriga o melhorista a observar os padrões de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos. No presente estudo, foram utilizadas apenas duas localidades, logo estudos de estabilidade não puderam ser empregados. Ainda assim, uma das formas de detalhar a interação genótipos por ambientes é dividi-la em partes simples e complexa (COCKERHAM, 1963).

Na definição de Cruz e Castoldi (1991), a parte simples reflete a diferença de variabilidade entre os genótipos nos determinados locais e a parte complexa reflete a falta de correlação entre os genótipos. Diante disso, os caracteres que tiveram majoritariamente interação do tipo simples foram DPF (94%) e TBH (59%). Para o caráter DPF foi nítido que houve alta correlação entre os ambientes, o que reduz a proporção de interação complexa. Para TBH ocorreram dois fatos notórios, os genótipos em Sete Lagoas obtiveram desempenho semelhante uns aos outros se comparados à Lavras (APÊNDICE B) e a correlação entre os locais se mostrou moderada (Figura 4). No balanço a parte simples (diferença de variabilidade entre os genótipos nos locais) foi quem mais contribuiu para a interação.

Considerando o caráter EXT, a maior parte da interação foi complexa (97,7%) e isso se deu ao fato de que houve um confundimento entre efeito de locais e de método de extração do caldo entre os locais, de forma que a correlação entre os genótipos nestes locais foi baixa. Outro caráter com grande expressividade da interação complexa foi SST (82%), o que revela também baixa correlação, e talvez possa ser explicado pelas diferenças no ponto de colheita feito entre os locais, a umidade dos colmos e ocorrência de chuvas antes da colheita, pois o status hídrico tem muita influência na diluição dos açúcares. No entanto, a maior parte dos genótipos que exibiu SST acima de 14°Brix, fez isso em ambos os ambientes. Para os híbridos que não houve essa concordância, deve haver certa cautela para não selecionar ou excluir sem informação real de que tal combinação híbrida preencha o requisito mínimo de 14°Brix, conforme descrito por Schaffert et al. (2011). Todos os genótipos

avaliados foram considerados sacarinos, por possuir SST acima de 8°Brix (APÊNDICE B), segundo elencado por Pfeiffer et al. (2010).

A PMV obteve um valor equilibrado no desdobramento da interação, refletindo mais uma vez que os genótipos em Lavras apresentaram maior variabilidade que em Sete Lagoas, além de mudança razoável no ranqueamento dos mesmos entre os ambientes.

Por conseguinte, para os caracteres que apresentaram efeito significativo de interação $G \times E$, os efeitos de genótipos foram desdobrados em cada um dos dois locais. Em virtude de tais desdobramentos, um grande volume de resultados é criado, bem como a visualização e o ranqueamento de genótipos torna-se complexo. Para a avaliação multi-caráter foi produzido índice t (média fenotípica estudentizada) para cada combinação de caráter, genótipo e local nos desdobramentos. Posteriormente esses dados foram agregados pela soma, formando o índice T que se propõe a ranquear todos os genótipos, como também para confecção dos gráficos do tipo biplot (Figura 3, 4 e 5) que se propõem a embasar tanto uma análise de ranqueamento, como a evidenciar pontos fortes e fracos e observar a correlação dos caracteres entre os ambientes. Os biplots gerados constituem naqueles descritos como *Genotype by Trait \times Environment* e permitem que diferenças entre os genótipos sejam mais minuciosamente observadas (YAN; TINKER, 2006).

O ranqueamento proporcionado pelo índice T permite a visualização de que os genótipos que, considerando todos os caracteres, ostentaram desempenho superior ao das testemunhas foram os híbridos experimentais dos quais participam o genitor CMSXS5022 (linhagem R).

A porcentagem explicada pelo primeiro e segundo componentes nesse estudo foi superior ao mínimo exigido conforme Rencher (2002). A Figura 3 elucida a formação de dois grandes grupos, o dos genótipos sensíveis (salmão) e dos insensíveis (verde) ao fotoperíodo. Resta claro que os genótipos sensíveis foram mais tardios, tiveram maior PMV e ALT. Enquanto os insensíveis obtiveram maior teor de EXT e SST. Neste trabalho, os genótipos sensíveis ao fotoperíodo são também de colmo seco, por coincidência. Esse fato explica a razão dos baixos índices de EXT para esses genótipos. O caráter-alvo TBH não foi unanimidade em nenhum dos grupos, ou seja, independente da sensibilidade ao fotoperíodo, houve genótipos promissores para TBH.

A Figura 3 permitiu o ranqueamento de genótipos tendo a testemunha CMSX5501A:CMSXS5021 também como a de melhor desempenho geral, seguida por 30, 17, 28 e 18. O ranqueamento, nesse caso variou em relação ao índice T. A análise biplot, no entanto, compreende uma interpretação e visualização mais detalhada.

Os genótipos insensíveis que obtiveram boa classificação no caráter TBH apresentaram valores altos de SST e ao mesmo tempo, não obtiveram baixos valores de PMV. Inversamente, genótipos sensíveis exibiram tendência a menor SST, com maior produção de biomassa. Esses caracteres impactam significativamente a produção de açúcar e de biomassa e tem também implicações diretas no custo de produção, principalmente no tocante à colheita e ao transporte (MIRANDA; MAY, 2016).

Portanto, é necessário que o genótipo sensível tenha boa PMV, a fim de garantir bom TBH e boa quantidade de biomassa para cogeração de energia elétrica, contanto que não apresente baixos teores de SST, o que encareceria os custos. Considerando o genótipo insensível, é desejável que possua bom teor de SST e que produza também boa quantidade de biomassa para queima nas caldeiras.

A análise gráfica evidencia que os híbridos melhores colocados para TBH obtiveram i) alta PMV e baixo SST ou ii) baixo PMV e alto SST. Em suma, é necessário haver cruzamentos ou linhagens parentais sensíveis ao fotoperíodo que concentrem mais açúcar e que tenham menor aporte de PMV e insensíveis que tenham maior PMV. A média geral de PMV encontrada no presente experimento corrobora com o encontrado em outros trabalhos na literatura para sorgo sacarino (LOMBARDI, 2016; DURÃES 2014). Porém, abaixo do encontrado para genótipos-elite, conforme resultados de Ornelas et al. (2016).

Quanto ao agrupamento de Scott-Knott (APÊNDICE B), pouca informação pôde ser extraída, visto que os principais caracteres agrônômicos não apresentaram segregação em dois ou mais grupos. Considerando a magnitude do erro experimental e o número de genótipos considerados, é esperado haver elevado conservadorismo nos testes e agrupamento de média. Conforme Westfall, Tobias e Wolfinger (2011) quanto maior o número de tratamentos na família, menor a chance de encontrar diferenças significativas, e o recomendado seria dividir o conjunto total em conjuntos menores e então aplicar os testes de comparações múltiplas. Além do mais, visto que o erro associado às estimativas de caracteres biométricos é geralmente elevado, o

ajuste da significância para comparação múltipla também causa baixa diferença estatística entre as médias dos genótipos.

Como o objetivo do presente estudo é a seleção de híbridos e com a ciência de que o agrupamento de média sofre com as peculiaridades supracitadas, a estratégia utilizada foi o ranqueamento dos genótipos explicitado pelos biplots *genotype by trait x environment* em combinação com a avaliação de quais preenchem os requisitos agrônômicos e industriais conforme descrito por Schaffert et al. (2011).

Além das análises das médias dos genótipos, avaliamos também a correlação entre os caracteres (Figura 4) e a importância da avaliação (Figura 5) dos mesmos. Em geral, cada caráter foi bem correlacionado consigo mesmo entre os ambientes. A correlação entre diferentes caracteres esteve dentro do já descrito na literatura (SINGH et al., 2015; VENDRUSCOLO et al., 2016; LOMBARDI et al., 2015). Em relação à importância da avaliação, todos os caracteres apresentaram bom poder de discriminação, mas apenas TBH apresentou alto poder de representatividade. A representatividade é a qualidade que permite que um caráter represente bem a combinação de todos os outros (YAN et al., 2007). No entanto, não é possível a avaliação de TBH sem que haja informações de EXT, PMV e SST. Portanto todos os caracteres avaliados são de importância.

6. Considerações finais

Não foi encontrado efeito significativo de heterose para os principais caracteres agrônômicos de importância nos híbridos experimentais avaliados. Foi encontrada menor variabilidade genética entre as linhagens macho-estéreis comparado com as linhagens restauradoras. Portanto, é necessário incremento na frequência de alelos favoráveis nas linhagens macho-estéreis, como também na variabilidade genética intragrupo, por intermédio de melhoramento de linhagens por métodos que propiciem também avaliação a cada ciclo da heterose entre os grupos.

7. Conclusões

Houve melhores genitores para todos os caracteres ligados à produção de biomassa e açúcar, com destaque para as linhagens restauradoras de fertilidade e em específico para o genitor CMSX5022.

Os genótipos sensíveis ao fotoperíodo foram superiores aos insensíveis na produção de matéria verde, visto que com ciclo maior houve maior acúmulo de biomassa. Contudo, essa superioridade não se imprimiu também para produção de açúcares, onde genótipos sensíveis e insensíveis ocuparam as primeiras colocações no ranqueamento.

As combinações híbridas mais promissoras foram CMSXS5506 x CMSX646 (insensível) e CMSXS5507 x CMSX5022 (sensível ao fotoperíodo), contudo foram inferiores à testemunha CMSX5501A x CMSXS5021.

Referências bibliográficas

ALMODARES, A.; HADI, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 9, p. 772-780, 2009.

ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S. Other Industrial Uses of Sorghum. In: **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Woodhead Publishing. p. 271-292, 2018.

AUDILAKSHMI, S. et al. Inheritance of sugar concentration in stalk (brix), sucrose content, stalk and juice yield in sorghum. **Biomass and bioenergy**, v. 34, n. 6, p. 813-820, 2010.

BATES, D. et al. The lme4 package. **R package version**, v. 2, n. 1, p. 74, 2007.

BERNARDO, R. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury, MN: Stemma press, 2002.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. Sorgo do plantio à colheita. **UFV, Viçosa**, 275p, 2014.

BUNPHAN, D. et al. Heterosis and combining ability of F 1 hybrid sweet sorghum in Thailand. **Crop Science**, v. 55, n. 1, p. 178-187, 2015.

CLARKE, M. A. SYRUPS. **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**, p. 5711–5717, 2003.

COCKERHAM, C.C. Estimation of genetic variances.. In: Hanson, W.D.; Robinson, H.F., eds. **Statistical genetics and plant breeding**. National Academy of Science, Washington, DC, USA, p. 53-94, 1963.

CRUZ, C. D. **GENES: software para análise de dados em estatística experimental e em genética quantitativa**. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 35, n.3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C. D.; CASTOLDI, F. L. Simple and complex decomposition in parts of the genotypes x environments interaction. **Revista Ceres**, 1991.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, Imprensa universitária, v.1, 2012.

CUNHA, E. M. LIMA, J. M. P. Caracterização de genótipos e estimativa de parâmetros genéticos de características produtivas de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.39, n.4, p. 701-706, 2010.

DAHLBERG, J. et al. Assessing sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench] germplasm for new traits: food, fuels & unique uses. **Maydica**, v. 56, n. 2, 2012.

DUMBLE, S. GGEBiplots: GGE Biplots with 'Ggplot2'. **R Package 0.1**, v. 1, 2017.

DURÃES, F.O.M. Sorgo sacarino: desenvolvimento de tecnologia agrônômica. **Agroenergia em revista**, v. 3, p. 7, 2011.

DURÃES, F. O. M.; MAY, A.; PARRELLA, R. A. C. Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público-privada: oportunidades, perspectivas e desafios. **Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, 2012.

DURÃES, N. N. L. **Heterose em sorgo sacarino**. Dissertação. Programa de pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas. Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG, p. 68, 2014.

FAO, 2017. <http://www.fao.org>. Acessado em 05/04/2020.

FERREIRA, E. B. et al. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952, 2014.

FELDERHOFF, T. J. et al. QTLs for Energy-related Traits in a Sweetx Grain Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] Mapping Population. **Crop Science**, v. 52, n. 5, p. 2040-2049, 2012.

FODRA, M.; ESPERANCINI, M. S. T. Viabilidade econômica da venda de energia elétrica em cogeração sob condições de risco: um estudo de caso. **Energia na Agricultura**, p. 229-239, 2013.

FOX, J. et al. Package 'car'. **Vienna: R Foundation for Statistical Computing**, 2012.

GARDNER, C.O.; EBERHART, S.A. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. **Biometrics**, v.22, p. 439-452, 1966.

GARNER, W. W.; ALLARD, H. A. Further studies in photoperiodism: the response of the plant to relative length of day and night. **US Government Printing Office**, 1923.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial crops and products**, v. 129, p. 201-205, 2019.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v.9, p.463-493, 1956.

GUAN, Y. et al. QTL mapping of bio-energy related traits in Sorghum. **Euphytica**, v. 182, n. 3, p. 431, 2011.

HALLAUER, A. R.; MIRANDA, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa. p. -, 1981.

HART, G. E. et al. Genetic mapping of Sorghum bicolor (L.) Moench QTLs that control variation in tillering and other morphological characters. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 103, n. 8, p. 1232-1242, 2001.

HILSON, G. R. On the inheritance of certain stem characters in sorghum. **Agric J India**, v. 11, p. 150-155, 1916.

HOUSE, L. R. **A Guide to Sorghum Breeding Second Edition**. 1985.

KNOLL, J. E.; ANDERSON, W. F. Yield components in hybrid versus inbred sweet sorghum. **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2638-2646, 2016.

KOZAK, M.; PIEPHO, H.-P. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 1, p. 86-98, 2018.

KUMAR, I. S. et al. Heterosis and inbreeding depression in tropical sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench). **Crop Research**, v. 51, n. 01, p. 01-04, 2016.

LENTH, R. et al. Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. **R package version**, v. 1, n. 1, p. 3, 2018.

LOMBARDI, G. M. R. et al. Heterosis in sweet sorghum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 5, p. 593-601, 2018.

LOMBARDI, G. M. R. **Heterose em sorgo sacarino em diferentes épocas de colheita**. Dissertação. Programa de pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas. Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, p.68, 2016.

LOMBARDI, G. M. R. *et al.* Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research**. Ribeirão Preto, 14(4), p. 16392-16402, 2015.

LONNQUIST, J. H.; WILLIAMS, N. E. Development of maize hybrids through among fullsib families. **Crop Science**, Madison, n. 7, p. 369-370, 1967. Madison, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, Sept. 2010.

MAY, A.; SILVA, D. D.; SANTOS, F. C. Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica. **Embrapa Milho e Sorgo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2013.

MENDES, F. F.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B. Índice de seleção como alternativa na escolha de populações segregantes de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1312-1318, 2010.

MENEZES, C. B. et al. Capacidade combinatória de linhagens e seleção de híbridos de sorgo granífero. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2017.

MIRANDA, R. A.; MAY, A. Análise dos custos de produção do sorgo biomassa para a geração de energia elétrica e sorgo sacarino para a produção de etanol e energia. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2016.

NIENHUIS, J.; SILLS, G. The potential of hybrid varieties in self-pollinating vegetables. In: **Reproductive Biology and Plant Breeding**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 387-396, 1992.

NOVATO, M.; LACERDA, M. I. RenovaBio—towards a new national biofuel policy and a truly sustainable world. **Innov Energy Res**, v. 6, n. 2, p. 164, 2017.

OLIVEIRA, I. C. M. Heterose e capacidade de combinação em cruzamentos dialélicos de sorgo biomassa. 2015. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Viçosa.

OLIVEIRA, I. C. M. et al. Combining Ability of Biomass Sorghum Lines for Agroindustrial Characters and Multitrait Selection of Photosensitive Hybrids for Energy Cogeneration. **Crop Science**, v. 59, n. 4, p. 1554-1566, 2019.

ORNELAS, D. O. et al. Período de utilização industrial de genótipos-elite de sorgo sacarino. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.

OLWENY, C. et al. Combining ability of parents and hybrids for sugar yield and its attributing traits in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Sugar Tech**, v. 19, n. 1, p. 57-63, 2017.

PARRELLA, R. A. C. et al. Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2010.

PARRELLA, R. A. C. et al. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em diferentes ambientes visando a produção de etanol. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA DO CARTUCHO, 4., 2010, Goiânia. Potencialidades, desafios e sustentabilidade: resumos expandidos... Goiânia: ABMS, 2010.

PARRELLA, R. A. C. Melhoria genética do sorgo sacarino. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E)**, 2011.

PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J.A.S. Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde. **Embrapa Milho e Sorgo-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2015.

PFEIFFER, T. W. et al. Heterosis in sweet sorghum and selection of a new sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, 2010.

PFEIFFER, T. W. et al. Heterosis in sweet sorghum and selection of a new sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, 2010.

QUINBY, J. R. The maturity genes of sorghum. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, p. 267-305, 1967.

QUINBY, J. R.; HESKETH, J. D.; VOIGT, R. L. Influence of Temperature and Photoperiod on Floral Initiation and Leaf Number in Sorghum 1. **Crop Science**, v. 13, n. 2, p. 243-246, 1973.

REDDY, B. VS; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 25, p. 139-172, 2005.

RENCHE, A.C. **Methods of Multivariate Analysis**. A JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION.p.727. 2ed. 2002.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2007.

RIBAS, P. M. Sorgo: introdução e importância econômica. **Embrapa Milho e Sorgo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2003.

ROCHA, M. R. **Capacidade combinatória de linhagens e seleção de híbridos de sorgo sacarino**. Dissertação. Programa de pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas. Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, p. 75, 2016.

ROCHA, M. J. et al. General and specific combining ability in sweet sorghum. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 18, n. 4, p. 365-372, 2018.

ROMAGOSA, I.; FOX, P. N. Genotypex environment interaction and adaptation. In: **Plant breeding**. Springer, Dordrecht, p. 373-390, 1993.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in Sorghum bicolor (L.) Moench. **Crop science**, v. 39, n. 2, p. 397-400, 1999.

ROONEY, W. L. Sorghum improvement-integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in agronomy**, v. 83, n. 10.1016, p. S0065-2113, 2004.

ROOZEBOOM, K.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. Sorghum growth and development.(this publication). **Sorghum: State of the art and future perspectives. Amer. Soc. Agronomy, Madison, WI, 2018.**

SAXENA, K. B.; HINGANE, A. J. Male sterility systems in major field crops and their potential role in crop improvement. In: **Plant biology and Biotechnology**. Springer, New Delhi, p. 639-656, 2015.

SCHAFFERT, R. E. et al. Metas de rendimento e qualidade de sorgo sacarino. **Agroenergia em Revista**, v. 2, n. 3, p. 47, 2011.

SETIAWAN, K.; KAMAL, M.; HADI, M. S. Genetic variability and heritability of vegetative and generative traits of different sorghum genotypes. In: **The USR seminar on food security**, Indonesia, 2016.

SILVA, R. A. et al. Desenvolvimento de linhagens macho-estéreis (A) e mantenedoras (B) de sorgo sacarino. In: Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC/BIC JÚNIOR, 10., 2016, Sete Lagoas.

SILVA, R. A.; PARRELLA, R. A. C.; SILVA, M. J. Desenvolvimento de linhagens macho-estéreis (A) e mantenedoras (B) de sorgo sacarino. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)**, 2016.

SINGH, S. P. et al. Correlation coefficient of agronomic attributes on sweet sorghum [Sorghum bicolor (L.) Moench]. **INDIAN SOCIETY OF AGRICULTURAL SCIENCE**, p. 200, 2015.

SPRAGUE, G.F.; TATUM, L.A. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. **Journal of American Society of Agronomy**, v. 34, n. 10, p. 923-932, 1942.

STEPHENS, J. C.; HOLLAND, R. F. Cytoplasmic Male-Sterility For Hybrid Sorghum Seed Production 1. **Agronomy Journal**, v. 46, n. 1, p. 20-23, 1954.
sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. **Crop Science**,

TEIXEIRA, C. G. T.; JARDINE, J. G.; BEISMAN, D. A. **Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em microdestilaria**. EMBRAPA-CNPTIA, 1996.

UMAKANTH, A. V. et al. Sweet Sorghum for Biofuel Industry. In: **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Woodhead Publishing, p. 255-270, 2018.

UMAKANTH, A. V. et al. Combining ability and heterosis over environments for stalk and sugar related traits in sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench.). **Sugar Tech**, v. 14, n. 3, p. 237-246, 2012.

VENCOVSKY, R. Herança quantitativa. In: Paterniani, E. (Ed.) **Melhoramento e produção de milho no Brasil**. Piracicaba: Fundação Cargill, p. 135-214, 1987.

VENDRUSCOLO, T. P. et al. Correlation and path analysis of biomass sorghum production. **Genetics and molecular research: GMR**, v. 15, n. 4, 2016.

VENKATESWARAN, K. et al. Classification, Distribution and Biology. In: **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Woodhead Publishing, p.33-60, 2018.

VINAYKUMAR, R. et al. Combining ability of parents and hybrids for juice yield and its attributing traits in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Electronic Journal of Plant Breeding**, v. 2, n. 1, p. 41-46, 2011.

WESTFALL, P. H.; TOBIAS, R. D.; WOLFINGER, R. D. **Multiple comparisons and multiple tests using SAS**. SAS Institute, 2011.

WOLABU, T. W.; TADEGE, M. Photoperiod response and floral transition in sorghum. **Plant signaling & behavior**, v. 11, n. 12, p. e1261232, 2016. AHMED, Mukhtar et al. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum?. **Agricultural water management**, v. 98, n. 12, p. 1808-1812, 2011.

YAN, W.; TINKER, N. A. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. **Canadian journal of plant science**, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006.

YAN, W. et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop science**, v. 47, n. 2, p. 643-653, 2007.

YAO, W. H. et al. Diallel analysis models: A comparison of certain genetic statistics. **Crop science**, v. 53, n. 4, p. 1481-1490, 2013.

APÊNDICE A – ESTIMATIVAS DE CAPACIDADE ESPECÍFICA DE COMBINAÇÃO

Estimativas de efeito da capacidade específica de combinação para cada híbrido experimental nos desdobramentos para cada combinação de caráter e local.

HIBRIDO		Caráter										
		DPF		ALT	PMV		EXT		SST		TBH	
P1	P2	Lavras	Sete Lagoas	Geral	Lavras	Sete Lagoas						
CMSXS5502	201717B062	-0.01	0.97	0.11	2.21	-0.1	1.52	-0.87	0.5	0.15	0.66	0.11
CMSXS5502	BRS_508	-0.96	-0.75	0.16	4.89	-1.85	0.42	-1.77	1.06	0.57	1.1	-0.04
CMSXS5502	CMSXS5022	1.16	-2.16	-0.39*	-10.41	-1.01	-3.6	4.38*	-0.68	-0.5	-1.45	-0.51
CMSXS5502	CMSX643	-0.96	-0.47	0.14	1.18	1.44	-0.51	1.37	-0.56	-0.14	-0.15	0.22
CMSXS5502	CMSX646	0.77	2.41	-0.01	2.12	1.53	2.17	-3.11*	-0.32	-0.08	-0.16	0.23
CMSXS5503	201717B062	-0.21	-3.26*	-0.02	2.62	-0.74	-3.49	-1.22	0.19	0.32	0.3	0.07
CMSXS5503	BRS_508	-1.16	-0.65	-0.03	-3.22	1.84	0.3	0.82	-1.22	0.03	-1.19	0.33
CMSXS5503	CMSXS5022	-0.38	0.77	0.21*	3.95	4.73	1.41	-3.09*	0.17	-0.3	0.67	0.44
CMSXS5503	CMSX643	1.84*	0.29	-0.18	-8.27	0.52	2.37	3.61*	-0.04	0.06	-1.09	0.18
CMSXS5503	CMSX646	-0.1	2.85*	0.03	4.92	-6.35	-0.59	-0.11	0.9	-0.12	1.3	-1.03
CMSXS5504	201717B062	0.06	0.87	0.05	0.61	2	1.11	-0.49	0.15	0.36	0.08	0.39
CMSXS5504	BRS_508	1.11	-0.85	-0.04	3.37	3.24	3.15	-1.84	2.01	0.01	1.83	0.49
CMSXS5504	CMSXS5022	-0.11	0.57	-0.04	1.79	-9.73	-7.39	1.06	-0.07	-0.19	0.27	-1.32
CMSXS5504	CMSX643	-0.89	-1.24	0.03	5.13	1.11	-0.17	-0.17	-0.98	-0.22	0.3	-0.04
CMSXS5504	CMSX646	-0.17	0.65	0	-10.9	3.38	3.31	1.44	-1.11	0.03	-2.48	0.48
CMSXS5505	201717B062	0.52	0.74	-0.02	1.25	-1.48	3.21	1.13	0.07	-0.14	0.14	-0.31
CMSXS5505	BRS_508	-0.76	0.35	-0.04	1.84	-0.33	-1.15	0.06	-0.98	0.24	-0.09	0.04
CMSXS5505	CMSXS5022	-0.98	-0.57	0.04	2.29	-1.87	-4.16	-2.51	-0.14	0.07	0.14	-0.18
CMSXS5505	CMSX643	1.24	0.63	-0.01	-1.92	5.06	1.28	-0.26	1.24	0.1	0.34	0.81
CMSXS5505	CMSX646	-0.03	-1.15	0.03	-3.46	-1.38	0.81	1.57	-0.19	-0.28	-0.53	-0.36
CMSXS5506	201717B062	0.52	1.87	-0.06	-1.94	3.06	-4.41	2.01	-1.41	-1.14	-0.52	-0.03
CMSXS5506	BRS_508	-1.09	-1.85	-0.04	1.18	-2.55	-2.04	0.42	-0.04	-0.02	0.25	-0.41

Estimativas de efeito da capacidade específica de combinação para cada híbrido experimental nos desdobramentos para cada combinação de caráter e local.

HIBRIDO		Caráter										
		DPF		ALT	PMV		EXT		SST		TBH	
P1	P2	Lavras	Sete Lagoas	Geral	Lavras	Sete Lagoas						
CMSXS5506	CMSXS5022	1.69	0.23	0.18	-6.04	0.34	14.27	0.17	-0.5	-0.09	-2.3	0.04
CMSXS5506	CMSX643	-0.76	0.1	0.01	4.28	-1.54	-0.68	-2.73	-0.19	0.88	0.49	0.12
CMSXS5506	CMSX646	-0.37	-0.35	-0.09	2.52	0.69	-7.13	0.13	2.14	0.36	2.07	0.29
CMSXS5507	201717B062	-0.88	-1.19	-0.05	-4.74	-2.74	2.06	-0.57	0.51	0.44	-0.65	-0.23
CMSXS5507	BRS_508	2.84*	3.75*	-0.01	-8.06	-0.35	-0.67	2.3	-0.83	-0.84	-1.9	-0.4
CMSXS5507	CMSXS5022	-1.38	1.17	0.01	8.41	7.54	-0.53	-0.01	1.22	0.99	2.66	1.54
CMSXS5507	CMSX643	-0.49	0.69	0.01	-0.41	-6.58	-2.29	-1.81	0.52	-0.68	0.1	-1.29
CMSXS5507	CMSX646	-0.1	-4.42*	0.04	4.8	2.13	1.42	0.08	-1.42	0.08	-0.21	0.38

*Significativo pelo teste t-Student à 5% de significância.

APÊNDICE B – MÉDIAS FENOTÍPICAS E AGRUPAMENTO DE SCOTT-KNOTT

Médias fenotípicas ajustadas para cada tratamento nas combinações de caráter e local. Onde 'L' significa Lavras e 'S', Sete Lagoas. Onde DPF – dias para florescimento; ALT- altura de plantas; PMV – Produção de matéria verde, EXT – eficiência de extração de caldo, SST – teor de sólidos solúveis totais e TBH – toneladas de brix por hectare.

Genótipos	DPF_L	DPF_S	ALT	PMV_L	PMV_S	EXT_L	EXT_S	SST_L	SST_S	TBH_L	TBH_S
BRS 511	84.67 ^d	92.33 ^c	4.68 ^a	50.33 ^b	33.10 ^a	46.32 ^a	65.79 ^b	17.57 ^a	15.2 ^a	8.77 ^a	5.06 ^a
CMSXS5501A:CMSXS5021	128.00 ^a	162.00 ^a	4.18 ^a	121.00 ^a	71.71 ^a	25.98 ^a	51.11 ^d	15.53 ^a	14.35 ^a	18.84 ^a	10.11 ^a
CMSXS5502:201717B062	74.33 ^f	84.00 ^e	4.14 ^a	39.19 ^b	40.76 ^a	37.80 ^a	64.70 ^c	11.3 ^a	15.07 ^a	4.54 ^a	6.16 ^a
CMSXS5502:BRS_508	75.67 ^f	84.33 ^e	4.00 ^a	49.14 ^b	38.90 ^a	37.20 ^a	61.78 ^c	15.33 ^a	16.53 ^a	7.51 ^a	6.43 ^a
CMSXS5502: CMSXS5022	122.00 ^b	160.52 ^a	3.99 ^a	60.81 ^b	54.33 ^a	23.32 ^a	56.07 ^d	11.03 ^a	11.67 ^a	7.06 ^a	6.24 ^a
CMSXS5502:CMSX643	75.33 ^f	87.00 ^e	3.96 ^a	43.94 ^b	42.81 ^a	36.05 ^a	68.27 ^a	11.9 ^a	14.83 ^a	5.11 ^a	6.37 ^a
CMSXS5502:CMSX646	75.67 ^f	86.00 ^e	3.48 ^b	56.89 ^b	43.81 ^a	41.41 ^a	61.56 ^c	14.77 ^a	15.87 ^a	8.42 ^a	6.95 ^a
CMSXS5503:201717B062	73.33 ^f	78.00 ^e	3.19 ^b	45.56 ^b	40.43 ^a	32.60 ^a	65.52 ^c	12.13 ^a	15.63 ^a	5.55 ^a	6.31 ^a
CMSXS5503:BRS_508	74.67 ^f	82.67 ^e	3.18 ^b	46.97 ^b	42.90 ^a	36.89 ^a	65.53 ^c	14.2 ^a	16.4 ^a	6.58 ^a	6.99 ^a
CMSXS5503:CMSXS5022	119.67 ^b	162.00 ^a	3.13 ^b	81.11 ^a	60.38 ^a	28.16 ^a	49.77 ^d	13.03 ^a	12.27 ^a	10.55 ^a	7.38 ^a
CMSXS5503:CMSX643	77.33 ^f	86.00 ^e	3.13 ^b	40.44 ^b	42.19 ^a	38.74 ^a	71.67 ^a	13.57 ^a	15.43 ^a	5.53 ^a	6.51 ^a
CMSXS5503:CMSX646	74.00 ^f	84.67 ^e	3.12 ^b	65.64 ^b	36.24 ^a	38.46 ^a	65.73 ^c	17.13 ^a	16.23 ^a	11.26 ^a	5.88 ^a
CMSXS5504:201717B062	73.67 ^f	82.33 ^e	3.11 ^b	46.83 ^b	45.24 ^a	40.27 ^a	65.43 ^c	11.43 ^a	15.57 ^a	5.37 ^a	7.04 ^a
CMSXS5504:BRS_508	77.00 ^f	82.67 ^e	3.10 ^b	56.86 ^b	46.38 ^a	42.81 ^a	62.06 ^c	16.77 ^a	16.27 ^a	9.64 ^a	7.55 ^a
CMSXS5504:CMSXS5022	120.00 ^b	162.00 ^a	3.09 ^b	82.25 ^a	48.00 ^a	22.41 ^a	53.10 ^d	12.13 ^a	12.27 ^a	10.19 ^a	6.03 ^a
CMSXS5504:CMSX643	74.67 ^f	84.67 ^e	3.09 ^b	57.14 ^b	44.86 ^a	39.26 ^a	67.08 ^a	11.97 ^a	15.03 ^a	6.96 ^a	6.7 ^a
CMSXS5504:CMSX646	74.00 ^f	82.67 ^e	3.09 ^b	53.11 ^b	48.05 ^a	45.42 ^a	66.46 ^a	14.47 ^a	16.27 ^a	7.52 ^a	7.8 ^a
CMSXS5505:201717B062	74.67 ^f	82.67 ^e	3.09 ^b	47.39 ^b	40.10 ^a	41.67 ^a	65.75 ^c	12.33 ^a	15.47 ^a	5.91 ^a	6.2 ^a
CMSXS5505:BRS_508	75.67 ^f	84.33 ^e	3.08 ^b	55.25 ^b	41.14 ^a	37.81 ^a	62.66 ^c	14.77 ^a	16.9 ^a	8.19 ^a	6.95 ^a
CMSXS5505:CMSXS5022	119.67 ^b	161.33 ^a	3.08 ^b	82.67 ^a	54.19 ^a	24.95 ^a	48.23 ^d	13.04 ^a	12.93 ^a	10.52 ^a	7.01 ^a
CMSXS5505:CMSX643	77.33 ^f	87.00 ^e	3.06 ^b	50.00 ^b	47.14 ^a	40.03 ^a	65.69 ^c	15.17 ^a	15.77 ^a	7.47 ^a	7.41 ^a

Médias fenotípicas ajustadas para cada tratamento nas combinações de caráter e local. Onde 'L' significa Lavras e 'S', Sete Lagoas. Onde DPF – dias para florescimento; ALT- altura de plantas; PMV – Produção de matéria verde, EXT – eficiência de extração de caldo, SST – teor de sólidos solúveis totais e TBH – toneladas de brix por hectare.

Genótipos	DPF_L	DPF_S	ALT	PMV_L	PMV_S	EXT_L	EXT_S	SST_L	SST_S	TBH_L	TBH_S
CMSXS5505:CMSX646	74.67 ^f	81.33 ^e	3.06 ^b	60.47 ^b	41.62 ^a	42.23 ^a	65.29 ^c	16.37 ^a	16.37 ^a	9.94 ^a	6.81 ^a
CMSXS5506:201717B062	73.33 ^f	83.00 ^e	3.06 ^b	48.97 ^b	45.19 ^a	43.63 ^a	66.89 ^a	10.22 ^a	14.37 ^a	5.52 ^a	6.48 ^a
CMSXS5506:BRS_508	74.00 ^f	81.33 ^e	3.04 ^b	59.36 ^b	39.48 ^a	46.49 ^a	63.28 ^c	15.07 ^a	16.53 ^a	8.92 ^a	6.51 ^a
CMSXS5506:CMSXS5022	121.00 ^b	161.33 ^a	3.04 ^b	79.11 ^a	56.95 ^a	52.95 ^a	51.17 ^d	12.04 ^a	12.67 ^a	8.45 ^a	7.25 ^a
CMSXS5506:CMSX643	74.00 ^f	85.67 ^e	3.04 ^b	60.97 ^b	41.10 ^a	47.64 ^a	63.48 ^c	13.1 ^a	16.43 ^a	8 ^a	6.72 ^a
CMSXS5506:CMSX646	73.00 ^f	81.33 ^e	3.03 ^b	71.22 ^a	44.24 ^a	43.86 ^a	64.11 ^c	18.07 ^a	16.9 ^a	12.92 ^a	7.47 ^a
CMSXS5507:201717B062	73.00 ^f	79.67 ^e	2.99 ^b	38.56 ^b	42.33 ^a	40.54 ^a	65.42 ^c	13.6 ^a	15.83 ^a	5.33 ^a	6.72 ^a
CMSXS5507:BRS_508	79.00 ^f	86.67 ^e	2.95 ^b	42.50 ^b	44.62 ^a	38.31 ^a	66.27 ^a	15.73 ^a	15.6 ^a	6.6 ^a	6.97 ^a
CMSXS5507:CMSXS5022	119.00 ^b	162.00 ^a	2.94 ^b	85.94 ^a	67.10 ^a	28.60 ^a	52.10 ^d	15.23 ^a	13.63 ^a	13.26 ^a	9.18 ^a
CMSXS5507:CMSX643	75.33 ^f	86.00 ^e	2.93 ^b	48.67 ^b	39.00 ^a	36.47 ^a	65.51 ^c	15.27 ^a	14.77 ^a	7.45 ^a	5.76 ^a
CMSXS5507:CMSX646	74.33 ^f	77.00 ^e	2.90 ^b	65.89 ^b	48.62 ^a	42.85 ^a	65.17 ^c	15.97 ^a	16.5 ^a	10.47 ^a	8 ^a
CMSXS643	88.33 ^c	97.33 ^b	2.89 ^b	49.83 ^b	43.38 ^a	45.05 ^a	66.59 ^a	15.1 ^a	15.03 ^a	7.5 ^a	6.49 ^a
CMSXS646	81.33 ^e	88.67 ^d	2.87 ^b	56.69 ^b	36.19 ^a	37.43 ^a	65.87 ^a	18.83 ^a	16.7 ^a	10.66 ^a	6.05 ^a
CV198	73.00 ^f	89.00 ^d	2.87 ^b	63.81 ^b	47.38 ^a	32.82 ^a	62.97 ^c	16 ^a	15.8 ^a	10.42 ^a	7.48 ^a
N31L5010	83.00 ^e	93.33 ^b	2.85 ^b	60.03 ^b	61.95 ^a	38.99 ^a	62.37 ^c	9.97 ^a	14.4 ^a	5.9 ^a	9.03 ^a
Média geral	84,94^B	99,24^A	3,23	59,02^A	46,16^B	38,03^B	62,51^A	8,42^A	6,92^B	14,25^B	15,22^A

Genótipos seguidos pela mesma letra na vertical pertencem a um mesmo grupo (ScottKnott à 5% de significância). Letras maiúsculas na horizontal comparam o desempenho dos genótipos em cada local pelo teste de F à 5% de significância.

APÉNDICE C – ESTIMATIVAS DE ÍNDICE T

Código	HIBRIDO	T
2	CMSX5501A:CMSXS5021	83.61
30	CMSXS5507:CMSXS5022	67.94
25	CMSXS5506:CMSXS5022	62.24
10	CMSXS5503:CMSXS5022	60.08
20	CMSXS5505:CMSXS5022	57.36
15	CMSXS5504:CMSXS5022	55.02
5	CMSXS5502:CMSXS5022	49.45
33	CMSXS643	-0.84
34	CMSXS646	-5.83
36	N31L5010	-6.32
1	BRS 511	-6.35
27	CMSXS5506:CMSX646	-9.31
35	CV198	-9.64
14	CMSXS5504:BRS_508	-11.23
21	CMSXS5505:CMSX643	-11.46
12	CMSXS5503:CMSX646	-12.28
29	CMSXS5507:BRS_508	-12.59
22	CMSXS5505:CMSX646	-13.71
17	CMSXS5504:CMSX646	-13.73
32	CMSXS5507:CMSX646	-13.76
26	CMSXS5506:CMSX643	-14.09
7	CMSXS5502:CMSX646	-14.32
19	CMSXS5505:BRS_508	-14.49
24	CMSXS5506:BRS_508	-15.88
4	CMSXS5502:BRS_508	-16.32
11	CMSXS5503:CMSX643	-16.73
16	CMSXS5504:CMSX643	-17.61
9	CMSXS5503:BRS_508	-17.77
31	CMSXS5507:CMSX643	-17.91
6	CMSXS5502:CMSX643	-19.21
13	CMSXS5504:201717B062	-21.78
18	CMSXS5505:201717B062	-22.07
23	CMSXS5506:201717B062	-23.78
28	CMSXS5507:201717B062	-24.21
3	CMSXS5502:201717B062	-24.78
8	CMSXS5503:201717B062	-27.70