

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

CRISLENE VIEIRA DOS SANTOS

**HETEROSE E DEPRESSÃO ENDOGÂMICA EM HÍBRIDOS
DE SORGO GRANÍFERO**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

CRISLENE VIEIRA DOS SANTOS

**HETEROSE E DEPRESSÃO ENDOGÂMICA EM HÍBRIDOS
DE SORGO GRANÍFERO**

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

Orientador: Alúzio Borém de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237h
2020 Santos, Crislene Vieira dos, 1994-
Heterose e depressão endogâmica em híbridos de sorgo
granífero / Crislene Vieira dos Santos. – Viçosa, MG, 2020.
50 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Aluizio Borém de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.43-50.

1. *Sorghum bicolor*. 2. Heterose. 3. Melhoramento genético.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Fitotecnia.
Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento.
II. Título.

CDD 22 ed. 633.342

CRISLENE VIEIRA DOS SANTOS

**HETEROSE E DEPRESSÃO ENDOGÂMICA EM HÍBRIDOS
DE SORGO GRANÍFERO**

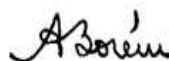
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2020

Assentimento:



Crislene Vieira dos Santos
Autora



Aluizio Borém de Oliveira
Orientador

**Aos meus pais, Marilene e Cristiano,
Aos meus irmãos, Wilder e Wendel,
E aos meus amigos,
Dedico.**

“A formalização do fim é a reinvenção de um novo começo.”

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar como base pessoas inspiradoras, que me acolheram e aconselharam na vida. Agradeço ainda por receber calma, foco, fé e coragem sempre. Agradeço aos meus pais e irmãos, que sempre confiaram nas minhas decisões, mesmo sem compreendê-las.

Deixo aqui meus agradecimentos aos velhos e queridos amigos de infância; Igor, Daniela e Luiza, que me acompanham na caminhada da vida, mesmo que à distância.

Agradeço aos amigos de graduação; Ruane, Celso, Flávio, Júlia, Heider, Savanna, Luciane, João Igore Luiz, pelo companheirismo e carinho que construímos nossa amizade, que se perpetuou mesmo pós-formados.

Agradeço à minha amiga Ruane por todo apoio e amizade que se estenderam ao mestrado e para a vida. Sua presença e do Pedro em Viçosa forama base que eu precisava para ter força, alegria e seguir em frente, na vida e na profissão. Aproveito para agradecer por ter compartilhado seus amigos, que hoje posso chamar de meus também. Danúbia, Arthur, Fran e Laura... Vocês são incríveis! Obrigada por terem me acolhido!

Obrigada à minha amiga Carol, por tê-la encontrado no mestrado, o que deixou os estudos, as provas, e o dia-a-dia das disciplinas um pouco mais leves. Agradeço ainda ao Guilherme e João Paulo pelo reencontro UFSJ/UFV, e por serem meus parceiros de disciplina e até de viagem.

Agradeço aos amigos do galpão de melhoramento de sorgo, que já há alguns anos são minhas referências de dedicação, profissão, e de vida; Isadora, Bebel, Karine, Álvaro, José Maurílio, Dajara, Pedro Cesar, Ana Maria, Elizete, Marcos Paulo e Karla, por manterem nossa amizade ao longo desses anos de encontros e despedidas.

Agradeço em especial à minha amiga Karla Jorge, que desde o primeiro dia na Embrapa me acolheu, compartilhou conhecimentos, histórias, sonhos, e que foi a primeira a me inspirar nessa trajetória acadêmica, e que continua sendo meu grande exemplo.

Agradeço aos funcionários e ex-funcionários do galpão de melhoramento de sorgo, que construíram neste setor uma grande família. Muito obrigada pela atenção, profissionalismo, respeito e amizade: Magela, Rodrigo, Eidinilson, Marcos André, Arlindo, Alexandre, Clarindo e Edmar.

Agradeço aos pesquisadores do melhoramento de sorgo, que sempre estiveram de portas abertas: Cícero, José Avelino, Rafael e Robert. Deixo meu agradecimento mais do que

especial ao Cícero, que sempre me motivou, orientou para os melhores caminhos, apoiou nos momentos decisivos, e que se orgulha de cada passo à frente que seus orientados dão.

Agradeço ao meu orientador Aluízio Borém, pela atenção, respeito, e humildade com que lida com seus orientados. E ainda pela paixão ao melhoramento de plantas que me inspira a cada dia.

Agradeço ao pesquisador Roberto Trindade, pela atenção e por aceitar fazer parte da minha banca. E ao professor Maicon Nardino por toda a atenção e disposição em contribuir com meu trabalho, sendo parte da minha banca.

Agradeço também ao programa de genética e melhoramento, aos docentes, aos colaboradores e secretarias. Em especial ao Marco Túlio e Odilon, pela tranquilidade e paciência com que lidam conosco.

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

RESUMO

SANTOS, Crislene Vieira dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Heterose e depressão endogâmica em híbridos de sorgo granífero.** Orientador: Aluizio Borém de Oliveira.

Os programas de melhoramento de sorgo têm buscado cultivares que resultem em combinações híbridas de alto rendimento de grãos, altura de plantas ideal para colheita mecanizada, e precocidade. Para tal, é importante conhecer a diversidade, o comportamento *per se* das linhagens e o desempenho dos híbridos resultantes dos seus cruzamentos, para a escolha de melhores genitores. Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo estimar a heterose e heterobeltiose de híbridos F_1 e a depressão endogâmica de híbridos F_2 , para identificação daqueles que apresentem resultados promissores para lançamento. Os experimentos foram conduzidos nas safras de 2014/2015 e 2015/2016 na estação experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas - MG. Foram utilizados 25 híbridos de sorgo granífero, sendo 11 em fase experimental e quatro comerciais (BRS330, BRS332, BRS373 e BRS380), desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo, além de outros dez híbridos comerciais de outras empresas, que foram utilizados como testemunhas. Como genitores dos híbridos da Embrapa foram utilizadas 17 linhagens, sendo dez linhagens A (macho estéril) e sete linhagens R (restauradoras). As parcelas experimentais foram compostas por quatro linhas de cinco metros, com espaçamento de 0,5m entre linhas, em que as duas fileiras centrais foram consideradas como área útil. Foram avaliadas as características: florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PROD) e massa de mil grãos (M1000). A análise de variância conjunta foi procedida no programa Genes, e decomposta nos contrastes: Híbridos F_1 vs Testemunhas, Híbridos F_1 vs Pais e Híbridos F_1 vs Híbridos F_2 . Foram gerados boxplots para observação da amplitude das características, gráfico para estudo de correlações, cálculos de heterose, heterobeltiose e depressão endogâmica, e dendrograma para estudo da diversidade genética entre as linhagens com o programa R 3.6.2. Os híbridos 1167048, 1099044, 1170017 e 1169054 se destacaram para heterose em FLOR, com redução de até cinco dias no ciclo, em relação aos seus pais. O híbrido 1170017 apresentou a maior produtividade de grãos ($6,23 \text{ t.ha}^{-1}$), 50,42% de heterose e 43,55% de heterobeltiose. O híbrido 1167048 também se destacou com heterose acima de 60% para PROD, o que significou 2 t.ha^{-1} a mais do que a média de seus genitores. De maneira geral, foi notada baixa diversidade entre as linhagens. No entanto, os híbridos com melhores produtividades e alta heterose foram aqueles de maiores distâncias entre genitores com melhores desempenhos *per*

se. As linhagens L-01, L-06 e L-07 resultaram nos híbridos com as maiores produtividades de grãos. Com isso foi possível concluir que, o uso de sementes de híbridos F₁ é muito mais atrativo para o produtor, visto a acentuada depressão endogâmica que ocorre nos híbridos F₂, com redução de até 40% na produtividade de grãos. Além disso, exploração da variabilidade genética e manifestação da heterose e heterobeltiose nos híbridos F₁ torna seu uso mais vantajoso do que somente o das linhagens, mesmo aquelas com bom desempenho *per se*.

Palavras-chave: Heterobeltiose. *Sorghum bicolor*. Melhoramento genético.

ABSTRACT

SANTOS, Crislene Vieira dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Heterosis and inbreeding depression in grain sorghum hybrids.** Adviser: Aluizio Borém de Oliveira.

Sorghum breeding programs aim to improve cultivars with high grain yield, ideal plant height for mechanical harvesting, and earliness. The study of the germplasm diversity, the performance *per se* of the lines and its hybrid combinations are important to select the best parents, and to achieve genetic gains. The present study aimed to estimate heterosis and heterobeltiosis of F₁ and F₂ sorghum hybrids. Twenty-five grain sorghum hybrids were grown, being 11 in the experimental phase and four commercial (BRS330, BRS332, BRS373 and BRS380), developed by Embrapa Maize and Sorghum, in addition to ten commercial hybrids from other private companies, which were used as checks cultivars. As parental of the Embrapa hybrids 17 lines were used, being ten A lines (male sterile) and seven R lines (restorer). The experimental plots were four rows, 5 m long, with 0.5 m row spacing, in which the two central rows were considered as useful area. The evaluated traits were: flowering (FLOR), plant height (AP), grain yield (PROD) and thousand grain weight (M1000). The joint variance analysis was carried out using Genes program, which was decomposed into contrasts: F₁ hybrids *vs* check cultivars, F₁ hybrids *vs* parental lines and F₁ hybrids *vs* F₂ hybrids. Boxplots were generated to observe the amplitude of the characteristics, graph to study correlations, calculations of heterosis, heterobeltiosis and inbreeding depression, and dendrogram to study genetic diversity between lines with the R 3.6.2 program. The hybrids 1167048, 1099044, 1170017 and 1169054 were the ones that stood out for heterosis in FLOR, with a reduction of up to five days in their cycles, in relation to their parents. The hybrid 1170017 showed the highest grain yield (6.23 t.ha⁻¹), 50.42% heterosis and 43.55% heterobeltiosis. The hybrid 1167048 also stood out with heterosis above 60% for PROD, which meant 2 t.ha⁻¹ more than the average of its parents. In general, low diversity between lines was noted in the dendrogram, even some lines A and R, which tend to be more genetically distant, presented themselves within the same group. However, it was noted that the hybrids with the best yield and high heterosis were those in which the parents showed the best performances *per se*. The lines L-01, L-06 and L-07 resulted in hybrids with the highest grain yields. The use of F₁ hybrid seeds is much more interesting for growers, considering the significant inbreeding depression that occurs in the F₂ hybrids, with a reduction of up to 40% in their grain productivity. In addition, exploration of genetic variability and heterosis and

heterobeltiosis in hybrids makes its use more advantageous than only that of lines, even those with good performance *per se*.

Keywords: Heterobeltiosis. *Sorghum bicolor*. Genetic Breeding.

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Revisão bibliográfica	14
2.1 Sorgo granífero e melhoramento genético	14
2.2 Heterose	15
2.3 Depressão endogâmica	17
2.4 Diversidade genética	18
3. Material e métodos.....	18
3.1 Condução experimental	19
3.2 Avaliações fenotípicas.....	21
3.3 Análises genético-estatísticas	22
3.4 Estimativa de heterose, heterobeliose e depressão.....	23
3.5 Avaliações genotípicas	23
3.6 Diversidade genética	24
3.7 Estimativa de correlação	24
4. Resultados e discussão.....	24
5. Conclusões.....	43
6. Referências bibliográficas.....	43

1. Introdução

O sorgo granífero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é destinado à produção de grãos para alimentação animal, sendo fonte proteica para aves, suínos e bovinos (SAWAZAKI, 1998; MENEZES et al., 2018) e alimentação humana. No Brasil a produção de sorgo granífero atingiu 2,1 milhões de toneladas na safra 2018/19, em uma área de 727,8 mil hectares, e produtividade média de 2,9 t.ha⁻¹ (CONAB, 2019). O sorgo apresenta alto potencial produtivo, mesmo em regiões e épocas do ano em que ocorrem períodos de estiagem. Além disso, seu valor de comercialização chega a 85% do preço do milho, e possui menor custo de produção, o que compensa o cultivo sob ambos os aspectos (MIRANDA et al., 2015).

O melhoramento de sorgo granífero da Embrapa Milho e Sorgo têm como objetivo principal o desenvolvimento de linhagens e híbridos com alto potencial produtivo. Para a eficiência e sucesso do programa, a escolha das linhagens mais promissoras para serem utilizadas como genitoras em cruzamentos deve ser criteriosa. Contudo, em sorgo, o comportamento *per se* dos genitores não permite inferir totalmente sobre seu potencial em gerar progênies também superiores, devido à presença dos desvios de dominância. Considerando o desdobramento do valor genotípico, os desvios de dominância podem ser definidos como a parte não herdável da variação (CRUZ et al., 2012). Para auxiliar na obtenção dos valores genéticos dos híbridos, os cruzamentos dialélicos são realizados considerando a variância genética aditiva como fração herdável da variabilidade, que reflete na capacidade das linhagens se combinarem, resultando em híbridos promissores (MENEZES et al., 2015).

Para a obtenção de híbridos, quatro etapas devem ser conduzidas: a escolha das populações segregantes, a obtenção das linhagens, a avaliação da capacidade de combinação das linhagens e o teste extensivo das combinações híbridas obtidas (RAMALHO et al., 2012). Baseado na seleção e combinações híbridas geradas, o intuito é que seja obtido o máximo de vigor híbrido, também denominado de heterose (ROONEY, 2012).

A heterose é manifestada pela superioridade fenotípica e genotípica das progênies em relação aos seus parentais (TROYER e WELLIN, 2009). A heterose pode ser quantificada em populações segregantes e divergentes, com alta frequência de alelos favoráveis, baixa frequência de alelos deletérios e capacidade de combinação para produção de híbridos. Além disso, a heterose, em conjunto com baixa depressão endogâmica, pode indicar variância genética aditiva, podendo ser fixada nas gerações segregantes (KUMAR et al., 2016).

Premathala et al., (2006), Pandey e Shrotria (2012) e Manish e Ninghot (2015) estudaram a heterose e heterobeltiose em híbridos de sorgo granífero, para as características

de florescimento, altura de plantas, produtividade de grãos e comprimento de panículas. Nesses trabalhos os autores identificaram a manifestação da heterose e heterobeltiose para todas as características, e assim, selecionaram também as melhores combinações entre linhagens. O comportamento geral da heterose para florescimento foi negativo em ambos estudos, indicando redução no ciclo das plantas (-14,29%), o que é desejável nos programas de melhoramento. Para as demais características a heterose foi positiva, expressando incremento de altura de plantas (49,60%), comprimento das panículas (30,01%) e produtividade de grãos (72,09%). Para Manishe Ninghot (2015) predominaram as interações interalélicas de dominância e aditividade para explicar a heterose e heterobeltiose. Contudo, mesmo com os trabalhos apresentados, ainda é comum o uso de variedades. Dessa forma, é importante demonstrar o aumento de produção com a utilização de híbridos F_1 .

De acordo com GoyaleJoshi (1984) e Pandey e Shrotria (2012), a produtividade de grãos em sorgo é afetada pela depressão por endogamia, em média de 50%, durante o avanço de gerações, e, principalmente, de F_1 para F_2 . Porém, ainda hoje variedades são utilizadas por alguns produtores, que conservam o hábito de salvar sementes para a implantação da safra seguinte. Contudo, diversos trabalhos com sorgo granífero (Jain e Patel, 2013; Mahdyet al., 2011; Kenga et al., 2004; Bakheit et al., 2004; Hovny et al., 2005; Mohamed, 2000; e Essa, 2009; Mahdy et al., 2011) já demonstraram a superioridade produtiva e sanitária das sementes F_1 , e, em contrapartida, poucos trabalhos a respeito dos efeitos da depressão endogâmica e a viabilidade econômica da utilização de sementes F_2 e F_3 .

Os estudos sobre a diversidade genética entre linhagens de sorgo podem auxiliar ao melhorista no conhecimento do material, de suas aptidões, e, principalmente, direcionar os cruzamentos com melhor capacidade específica de combinação, para obtenção de híbridos vigorosos (Menezes et al. 2015; Silva et al. 2017). Para isso, tem se empregado as técnicas de genotipagem, que, com uso de marcadores moleculares polimórficos, distribuídos no genoma do sorgo, auxiliam na caracterização dos genótipos e nos estudos de distância genética.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo a estimativa da heterose e heterobeltiose de híbridos de sorgo granífero nas gerações F_1 e F_2 , e determinação da depressão endogâmica na obtenção das populações F_2 , em relação às características fenotípicas de interesse para o programa de melhoramento.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Sorgo granífero e melhoramento genético

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma espécie diploide ($2n = 2x = 20$ cromossomos), autógama, pertencente à família das gramíneas, com centro de origem e diversidade no continente africano (HALAN e DE WET, 1972). De acordo com Halan e De Wet (1972) a cultura chegou às Américas do Norte e Central no fim do século XIX, pelo transporte de escravos, e anos mais tarde à América do Sul. No Brasil, em 1970, os programas de melhoramento de sorgo obtiveram investimento financeiro, que promoveu a expansão dos cultivos de sorgo no país, que primeiramente se tornaram mais expressivos nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul (PURCINO, 2011). Desde então a cultura se expandiu, tornando-se o quinto cereal mais plantado no mundo, atrás apenas do milho, arroz, trigo e cevada, sendo responsável pela alimentação de mais de 500 milhões de pessoas, principalmente nos continentes africano e asiático (MUTISYA et al., 2009).

A produção mundial atual de sorgo granífero é de aproximadamente 62,6 milhões de toneladas (USDA, 2017), sendo seus grãos utilizados na alimentação humana, animal e produção de álcool (MENEZES et al., 2018). O Brasil produziu 2,08 milhões de toneladas de grãos de sorgo na safra 2018/2019 (CONAB, 2020), cultivado em todas as regiões do país, em períodos diferentes, de acordo com o zoneamento de risco agroclimático (LANDAU & GUIMARÃES, 2015). Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, por exemplo, os plantios são realizados entre os meses de janeiro a março. Já na região Sul o sorgo é cultivado no verão, e no Nordeste, no começo do período chuvoso, que ocorre de março a abril (MENEZES et al., 2017).

Atualmente as regiões Centro-Oeste e Sudeste, representadas pelos estados de Goiás e Mato Grosso e Minas Gerais, respectivamente, detêm 90% da produção nacional, com plantios em sucessão à soja, nos meses de fevereiro a março (CONAB, 2019). O sorgo é recomendado principalmente quando é necessário estender o período de safrinha (plantios a partir de meados de fevereiro), pelos riscos de condições adversas ao cultivo do milho no final do seu ciclo (BARROS, 2008; FREITAS et al., 2009). Além disso, apresenta outras características como alta produtividade, resistência ao acamamento e resistência às doenças foliares como antracnose (*Colletotrichum sublineolum*), helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*) e míldio (*Peronosclerospora sorghi*), que podem incidir nessas regiões durante o verão ou safrinha (SANTOS et al., 2005; TARDIN et al., 2013; MENEZES et al., 2017).

Os cultivares de sorgo granífero são selecionados para porte de 100 a 150 cm, adequadas para a colheita mecanizada, com ciclo precoce, inferior aos 60 dias para

florescimento, e alta produtividade de grãos. Seu potencial produtivo ultrapassa sete toneladas por hectare, com elevado valor nutricional, e maior tolerância à seca do que outros cereais, como o milho (MENEZES et al., 2017). Alguns genótipos de sorgo apresentam ainda certa tolerância ao alumínio no solo, bastante característico de solos tropicais e predominantes no bioma cerrado, no qual estão inseridas as principais regiões produtoras de sorgo granífero (SCHAFFERT et al., 2001; PARRELLA et al., 2014; MENEZES et al., 2014). Com isso, os programas de melhoramento de plantas contribuem para desenvolvimento de genótipos de sorgo com características cada vez mais vigorosas para expressão de tolerância aos múltiplos estresses (RODRIGUES, 2010).

Além da precocidade, altura ideal para colheita mecanizada, e elevada produtividade de grãos, outras características importantes para o melhoramento de sorgo granífero têm ganhado importância. Características como *Stay Green*, resistência ao acamamento e quebraimento de plantas são essenciais para o desenvolvimento das plantas e melhoria da rentabilidade da cultura (TARDIN et al., 2013; TEODORO et al., 2016). A queda ou quebraimento das plantas aumenta os custos de produção, já que inviabiliza a colheita mecanizada, e torna necessário aumento da mão-de-obra para a colheita manual.

O “*Stay Green*” caracteriza-se pela manutenção de colmos e folhas verdes mesmo após a maturidade fisiológica, promovendo maior enchimento de grãos pela ampliação do período fotossintético das plantas (GUEDES et al., 2007; SCHAFFERT et al., 2011). Em geral, genótipos que apresentam *Stay Green* possuem certa resistência ao acamamento das plantas, com colmos mais grossos, que suportam a exposição aos ventos fortes, comuns no final do período de safrinha (SILVA et al., 2009; ALBUQUERQUE et al., 2012). Assim, os programas de melhoramento de sorgo tendem a desenvolver híbridos cada vez mais adaptados às amplas condições e épocas de cultivo do país, se tornando sinônimo de segurança nos cultivos em safra e safrinha.

2.2 Heterose

A heterose se manifesta em diversas espécies autógamas, porém, a dificuldade de se produzir híbridos é um fator limitante para a exploração comercial dos ganhos genéticos (BORÉM et al., 2017). Em sorgo, por exemplo, o vigor híbrido foi descrito pela primeira vez em 1927 por Conner e Karper (Apud QUINBY, 1974), que fizeram a emasculação manual para realizar a hibridização. Anos mais tarde, Quinby (1974) explicou a interação entre o gene *Kafir* e o citoplasma *Milo*, como mecanismos responsáveis pela macho esterilidade citoplasmática, permitindo a identificação e classificação de linhagens A (macho estéreis),

linhagens B (mantenedoras) e R (restauradoras), o que possibilitou a hibridação em escala comercial (BAI, 1982).

Para geração de híbridos de sorgo são necessárias três linhagens, sendo essas; linhagem A (macho-estéril), linhagem B (mantenedora), e linhagem R (restauradora). Os híbridos de sorgo são produzidos através do cruzamento de uma linhagem macho-estéril (linhagem A), com uma linhagem restauradora (linhagem R), com esta última possuindo alelos dominantes para restauração de fertilidade. Para multiplicar a linhagem A, macho-estéril, é realizado seu cruzamento com a linhagem B. As linhagens A e B são isogênicas, se diferenciando apenas pelo citoplasma, que expressam a esterilidade ou fertilidade, respectivamente. A linhagem A (*rf1rf1*) apresenta, portanto, genes nucleares recessivos e citoplasma estéril(S), expressando o fenótipo de macho esterilidade. A linhagem B, possui citoplasma normal (N), e mesmo com alelos recessivos nucleares, ela restaura a fertilidade da linhagem A. Por sua vez, a linhagem R, apresenta citoplasma normal(N) com alelos dominantes do gene de restauração da fertilidade *Rf1*. Assim, as linhagens A e R são cruzadas, permitindo a restauração da produção de pólen da linhagem A, possibilitando a produção de sementes pelo híbrido (ROONEY, 2004; HORN et al., 2014).

Segundo Troyer e Wellin (2009), o fenômeno da heterose atua na identificação de populações segregantes e divergentes, com alta frequência de alelos favoráveis e capacidade de combinação para produção de híbridos. Além disso, a alta heterose em conjunto com baixa depressão endogâmica podem indicar variância genética aditiva, que pode ser fixada nas gerações segregantes (KUMAR et al., 2016). As interações intra-alélicas entre locos em heterozigose são fatores primordiais para o vigor híbrido. Neste caso, os alelos responsáveis pela expressão do fenótipo superior seriam aqueles de dominância completa ou parcial. E por consequência os de fenótipo inferior, ou mesmo deletérios, seriam aqueles recessivos (RAMALHO et al., 2012). A manifestação fenotípica da heterose ocorre pela superioridade produtiva dos híbridos, quando comparados com seus parentais, ou com seu melhor parental, no caso da heterobeltiose.

Shull (1952) explicou três possíveis hipóteses para a base genética da heterose. A primeira delas é a dominância, em que, a heterose pode ser explicada por complementariedade dos alelos dos parentais, com dominância dos alelos para superioridade, e recessividade dos alelos deletérios. A segunda hipótese foi relativa à sobredominância, no qual as características superiores expressas pelos híbridos ocorrem por interação alélica entre múltiplos locos em heterozigose. Já a terceira trata-se da epistasia, que relata a expressão fenotípica de genótipos superiores, dada pelas interações epistáticas interalélicas de dois ou múltiplos locos, que

podem ocasionar efeito aditivo x aditivo, aditivo x dominante e dominante x dominante. Em sorgo, por exemplo, a altura de plantas é controlada por quatro genes independentes: $Dw1/dw1$, $Dw2/dw2$, $Dw3/dw3$, $Dw4/dw4$. Para o sorgo granífero, ocorre a seleção de plantas de menor porte, com três alelos anões (3- Dw), que se apresentam em homozigose recessiva. Já para sorgo biomassa, que são plantas de porte alto, ocorrem os genótipos $Dw1/$ __, $Dw2/$ __, $Dw3/$ __, $Dw4/$ __. Neste caso, quando certa linhagem A, com um dos genes em homozigose era avaliada para capacidade de combinação com outra linhagem alta, seus híbridos manifestavam heterose e mesmo heterobeltiose, tendendo à interpretação de que o controle do caráter correspondesse à dominância ou sobredominância. Contudo, quando analisada separadamente foi possível determinar a ação epistática dos genes *Dwarf* presentes nas linhagens fêmeas, que determinavam uma interpretação errônea para explicar os efeitos heteróticos em sorgo biomassa (OLIVEIRA et al., 2019), mostrando a importância dos estudos dialélicos na síntese de novos híbridos de sorgo.

A heterose é muito importante para os programas de melhoramento de alógamas e autógamias, por estar correlacionada com a identificação de populações que são geneticamente diferentes, classificadas em grupos heteróticos (BUNPHAN et al., 2015). Em milho, os programas de melhoramento trabalham com grupos heteróticos bem definidos, sendo realizados cruzamentos entre grupos distintos, que permitem a captura dos efeitos gênicos não aditivos, que promovem a dominância (HALLAUER, 2007). Silva (2016) observou que as linhagens de sorgo granífero, apesar de possuírem diversidade genética estreita, apresentaram uma formação de agrupamentos distintos entre as linhagens B e R. Isso justifica o uso das linhagens B e R como grupos heteróticos em sorgo granífero, a fim de manter a variabilidade genética do programa com cruzamento entre grupos distintos.

2.3 Depressão endogâmica

A heterose e depressão endogâmica são fenômenos opostos, que se completam, sendo essenciais para o desenvolvimento de estratégias para obtenção de híbridos e também para o melhoramento de populações (FALCONER & MACKAY, 1996; BERNINI et al., 2010). Para diversas culturas, como sorgo granífero (MANISH & NINGHOT, 2015), milho (BERNINI et al., 2015) e arroz (VENKANNA et al., 2014) a máxima heterose para produção de grãos é obtida na geração F_1 . Por consequência, nas gerações sucessivas a produtividade de grãos é reduzida em função da depressão por endogamia (RAMALHO, 2012).

Jones (1917) realizou a autofecundação de híbridos de milho até o ciclo F_8 , constatando uma heterose de 81,65% em F_1 e de 7,65% em F_8 , observando um decréscimo

acentuado nos resultados de produtividade. O autor explica que, o aumento da frequência de alelos homozigotos em relação aos heterozigotos, neste caso, seria o responsável por reduzir a média populacional, e evidenciar a depressão endogâmica, considerando-se então o efeito de dominância para a heterose obtida.

No caso do sorgo, o uso da macho esterilidade citoplasmática, possibilitou o desenvolvimento comercial de híbridos, reduzindo os gastos com mão-de-obra qualificada e tempo de execução da emasculação. Assim, estes híbridos F_1 apresentam resultados expressivos de heterose, com médias de produtividade superiores aos de seus progenitores. Em contrapartida, híbridos F_2 , resultantes da autofecundação de F_1 demonstraram redução na produtividade de 15% a 40%, com desuniformidade da lavoura, e impactos negativos na qualidade das sementes (MENEZES et al., 2018).

De acordo com Parra et al. (2010) as populações segregantes já avançadas no programa de melhoramento são bastante eficazes na obtenção de linhagens de sorgo superiores e de híbridos igualmente potenciais. Para isso, a frequência de alelos favoráveis para caracteres de interesse deve ser alta em ambas as linhagens parentais, e que estas ainda apresentem ação gênica, principalmente de dominância, para obtenção do máximo vigor híbrido (SAWAZAKI, 1980). Busbice (1970) mencionou uma relação entre a produtividade e a heterozigosidade, observada nos híbridos F_1 , que pode ser obtida por duas formas. A primeira delas é pela escolha de genitores que possuam menor depressão endogâmica e a segunda é optar por linhagens que apresentem maior porcentagem de heterose quando cruzadas com outras.

2.4 Diversidade genética

O sorgo é classificado em cinco seções botânicas: *Heterosorghum*, *Parasorghum*, *Sorghum*, *Claetosorghum* e *Stiposorghum*. A classe *Sorghum* se divide em três espécies, chamadas de *S. halepense*, *S. bicolor* e *S. propinquum*. *S. bicolor* apresenta outras três subespécies, sendo essas; *drumondii*, *bicolor*, *arundinaceum*. A subespécie *bicolor* foi domesticada ao longo dos anos, por possuir qualidade de grãos, palatabilidade, maior adaptabilidade e tolerância à seca. O *Sorghum bicolor* sp. *bicolor* possui cinco raças (*bicolor*, *caudatum*, *durra*, *guinea* e *kafir*) e mais de 10 raças intermediárias, provindas do cruzamento entre raças (DEU & HAMON, 1994).

Esta classificação foi proposta por Halan e De Wet (1972), de acordo com critérios morfológicos, estruturais e outros, considerados de alta estabilidade. De acordo com Deu e Hamon (1994), as raças *durra* e *kafir* possuem qualidade de farinha, relacionada à

palatabilidade e digestibilidade, que depende dos cultivares, mas que possui boa aceitação, de forma geral, principalmente na África e Índia. As raças *caudatum* e *kafir* apresentam cultivares brancos, recomendados para produção de cerveja. Já a raça *guinea* possui alta adaptação em amplas regiões, e resistência ao mofo branco, além de sua qualidade palatável, e de preparo semelhante ao do arroz. Estas raças foram introduzidas no programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo, e a partir de então, combinadas para a síntese de híbridos simples e produção de variedades.

Estudos sobre a diversidade genética entre linhagens de sorgo podem auxiliar ao melhorista no conhecimento do material, de suas aptidões, e, principalmente, direcionar os cruzamentos com melhor capacidade geral de combinação, para obtenção de híbridos vigorosos (MENEZES et al., 2015; SILVA, 2017). De acordo com Silva (2017), estudos de distância genética entre cultivares contribuem para ampliar o conhecimento sobre o germoplasma disponível e para direcionar as hibridações mais promissoras. Para isso, tem se empregado as técnicas de genotipagem, que, com uso de marcadores moleculares polimórficos (*SNPs*, por exemplo), amplamente distribuídos no genoma do sorgo, auxiliam na caracterização dos genótipos e possibilitam os estudos de distância genética.

3. Material e métodos

3.1 Condução experimental

Os experimentos foram conduzidos nas safras 2014/2015 e 2015/2016 na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, 19°27'57" S e 44°14'49" O, região central de Minas Gerais. As parcelas experimentais foram compostas por quatro linhas de 5 m, com espaçamento de 0,5 m entre linhas, conservando dez plantas por metro de sulco após desbaste, considerando as duas fileiras centrais como área útil da parcela. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com efeitos fixos para todos os componentes de variância.

Foram utilizadas 17 linhagens parentais, que deram origem aos híbridos experimentais F₁. Dentre essas, 10 linhagens A (Macho estéril) e 7 linhagens R (Restauradoras). No total foram avaliados 25 híbridos, sendo 11 em fase experimental, 4 comercial (BRS330, BRS332, BRS373 e BRS380), desenvolvidos pelo programa de melhoramento genético da Embrapa Milho e Sorgo e 10 híbridos comerciais de outras empresas, que foram utilizados como testemunhas (Tabela 1). Estes híbridos foram conduzidos em ciclos F₁, juntamente com as linhagens progenitoras para estudo de heterose (H%) e heterobeltiose (Hb%), e em ciclo F₂ para estudo de depressão endogâmica.

Tabela 1. Codificação dos 25 híbridos de sorgo granífero e seus parentais, avaliados em Sete Lagoas - MG nas safras 2014/15 e 2015/2016.

Cruzamentos	Híbridos	Empresa
L-10 (A) x L-11 (R)	1167048	EMBRAPA
L-07 (A) x L-11 (R)	1167093	EMBRAPA
L-07 (A) x L-12 (R)	1168093	EMBRAPA
L-06 (A) x L-11 (R)	1167092	EMBRAPA
L-01 (A) x L-11 (R)	1167017	EMBRAPA
L-05 (A) x L-11 (R)	1236020	EMBRAPA
L-04 (A) x L-16 (R)	1105661	EMBRAPA
L-02 (A) x L-11 (R)	1236043	EMBRAPA
L-04 (A) x L-17 (R)	BRS 330	EMBRAPA
L-03 (A) x L-17 (R)	BRS 332	EMBRAPA
L-04 (A) x L-11 (R)	BRS 373	EMBRAPA
L-04 (A) x L-14 (R)	BRS 380	EMBRAPA
L-09 (A) x L-11 (R)	1099044	EMBRAPA
L-01 (A) x L-15 (R)	1170017	EMBRAPA
L-08 (A) x L-13 (R)	1169054	EMBRAPA
	1G100	BREVANT
	1G282	BREVANT
	50A50	PIONEER
	AG 1040	ISS
	AS 4625	ISS
	Jade	SEMEALI
	80G80	AGROMEN
	Buster	NUSEEDS
	FOX	NUSEEDS
	A 9735 R	NIDERA

Na Tabela 2 estão apresentados dados descritivos das linhagens progenitoras dos híbridos F₁'s utilizados no presente estudo. Nesta estão contidas informações de raça, origem e tipo ao qual pertence cada uma das linhagens. Estas foram classificadas em 6 raças e sub raças, sendo; C: *Caudatum*, GC: Intermediária entre *Guiné* e *Durra*, KZZ: Intermediária entre *Kafir* e *Zera-Zera*, FTZZ: Intermediária entre *Feterita* e *Zera-Zera*, GC-KZZ: Intermediária entre *Guiné*, *Caudatum* e *Zera-Zera*.

Tabela 2. Dados descritivos das linhagens utilizadas no programa de melhoramento de Sorgo da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas- MG.

Linhagens	Raça	Origem	Tipo
L-01	-	BR	A/B
L-02	GC-KZZ	BR-AFR	A/B
L-03	GC	BR-AFR	A/B
L-04	GC	BR-AFR	A/B
L-05	GC	BR-AFR	A/B
L-06	KZZ	BR-AFR	A/B
L-07	GC-KZZ	BR-AFR	A/B
L-08	-	USA	A/B
L-09	-	USA	A/B
L-10	-	USA	A/B
L-11	GC	BR-AFR	R
L-12	C	BRA	R
L-13	FTZZ	BR-AFR	R
L-14	GC	BR-AFR	R
L-15	GC	BR-AFR	R
L-16	GC	BR-AFR	R
L-17	C	BR-AFR	R

Classificação racial - B: *Bicolor*; C: *Caudatum*; D: *Durra*; G: *Guiné*; K: *Kafir*; FT: *Feterita*; ZZ: *Zera zera*; DC: intermediário D-C; GC: intermediário D-B; FTZZ: intermediário FT-ZZ; FTZZC: intermediário FT-ZZ-C; KZZ: intermediário K-ZZ; ZZC: intermediário ZZ-C; FTZZGC: intermediário FT-ZZ-G-C; P_ATF54: População derivada da linhagem ATF54. Código dos países seguidos por: AFR: África; BRA: Brasil; ETH: Etiópia; IND: Índia; NGA: Nigéria; UGA: Uganda; USA: Estados Unidos da América.

3.2 Avaliações fenotípicas

Os caracteres avaliados foram: dias para o florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PROD) massa de mil grãos (M1000) (Tabela 3).

Tabela 3. Características avaliadas nas safras de 2014/2015 e 2015/2016, em Sete Lagoas - MG.

Características	Unidade de medida	Forma de avaliação
Florescimento (FLOR)	Dias	Mensurado pela contagem de dias decorridos da semeadura até o florescimento de 50% das plantas pertencentes à área útil da parcela
Altura de plantas (AP)	Centímetros (cm)	Mensurada em metros, medida do colo da planta até o ápice da panícula
Produtividade de grãos (PROD)	Toneladas por hectare (t.ha ⁻¹)	Dada pelo peso de grãos da unidade experimental, corrigido para umidade de 13% e extrapolada para t.ha ⁻¹
Massa de mil grãos (M1000)	Gramas (g)	Contagem e pesagem de mil grãos, corrigido para 13% de umidade

3.3 Análises genético-estatísticas

Inicialmente, foi realizada análise de variância conjunta, com a média das duas safras, de acordo com o modelo estatístico descrito a seguir, com efeitos fixos para todos os componentes de variância:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + b_j + a_k + g_{aik} + e_{ijk}$$

em que:

Y_{ijk} = observação feita na parcela do i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

μ = média geral;

g_i = efeito do i-ésimo genótipo;

b_j = efeito do j-ésimo bloco;

a_k = efeito do k-ésimo ambiente;

g_{aik} = interação genótipos ambientes

e_{ijk} = é o erro aleatório associado à observação Y_{ijk} .

Posteriormente, foi realizada a decomposição dos graus de liberdade de tratamentos em graus de liberdade para os efeitos de genitores, de combinações híbridas F_1 e F_2 e de testemunhas, nos seguintes contrastes: 1) combinações híbridas F_1 versus testemunhas; 2) combinações híbridas F_1 versus parentais; 3) híbridos F_1 versus combinações híbridas F_2 .

3.4 Estimativas de heterose, heterobeltiose e depressão

A estimativa da heterose (H%) foi obtida pela seguinte equação (MATZINGER et al., 1962):

$$H (\%) = \left[\frac{\bar{F}_1 - \bar{P}}{\bar{P}} \right] \times 100$$

em que;

\bar{F}_1 = média da geração F₁

\bar{P} = média dos parentais

Para estimar-se a heterobeltiose (Hb%) em porcentagem foi empregada a equação (FONSECA e PATTERSON, 1968):

$$Hb (\%) = \left[\frac{[\bar{F}_1 - \overline{MP}]}{\overline{MP}} \right] \times 100$$

em que, MP = média do melhor parental.

Para estimar-se a depressão por endogamia (I%) em porcentagem foi empregada a equação (MATZINGER et al., 1962):

$$I (\%) = \left[\frac{[\bar{F}_1 - \bar{F}_2]}{\bar{F}_1} \right] \times 100$$

em que:

F₁ = média dos híbridos;

F₂ = média da população F₂ após uma geração de autofecundação do híbrido.

3.5 Avaliações genotípicas

Os dados genotípicos foram utilizados para realizar as análises posteriores de distância genética entre as linhagens parentais dos híbridos em estudo. Assim, os valores de distância entre linhagens podem auxiliar no direcionamento de cruzamentos, que resultem em maior heterose, bem como, diante dessas informações, a proposição de grupos heteróticos para a cultura do sorgo.

Para extração do DNA genômico foram coletadas folhas jovens, de plantas representativas de cada linhagem. Após a coleta as folhas foram liofilizadas, e em sequência foi realizado o procedimento de extração do DNA. Este se baseou no protocolo de uso do *Cetyl trimethyl ammonium bromide* (CTAB). Em gel de trisacetato foi realizada a quantificação e qualificação do DNA. O método de sequenciamento utilizado foi o GBS (*Genotyping By Sequencing*), com uso da enzima de restrição *ApeKI*. A chamada de *SNPs* foi realizada usando o *pipeline* de GBS, disponível no *software* TASSEL 5.0. Em seguida os

marcadores foram filtrados pela menor frequência alélica ($MAP \geq 5\%$) e a perda de genótipos $\leq 20\%$.

3.6 Diversidade genética

A distância genética entre as linhagens foi calculada com base nos dados de 148.395 marcadores *SNPs*, usando o coeficiente de identificação por estado (IBS) (Powell et al., 2010), com o recurso do programa TASSEL 5.0. O método de agrupamento utilizado foi o *Neighbor-Joining* (SAITOU & NEI, 1987) usando o pacote *ape*, do *software* R 3.2.5 (R CORE TEAM, 2016).

3.7 Estimativas de correlação

O coeficiente de correlação de *Pearson* foi utilizado para o estudo de correlações entre a distância genética das linhagens e as estimativas de heterose e heterobeltiose para as características FLOR, AP, PROD e M1000. As análises foram efetuadas utilizando o pacote *psych*, do *software* R 3.2.5.

4. Resultados e discussão

Os resultados das análises de variância conjunta para as características avaliadas nas duas safras apresentaram efeito significativo para híbridos (F_1 's) e testemunhas, para todas as características. Já o efeito da interação entre F_1 's vs testemunhas mostrou-se significativo para altura de planta (AP) e massa de 1000 grãos (M1000) e não significativo para as demais características. De forma geral, os resultados indicaram diferença estatística entre as médias dos híbridos F_1 's experimentais e os comerciais para AP e M1000 (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância conjunta do contraste F_1 's versus Testemunhas, para florescimento (FLOR), em dias; altura de plantas (AP), em cm; produtividade de grãos (PROD), em $t.ha^{-1}$; e massa de mil grãos (M1000), em gramas, das safras 2014/2015 e 2015/2016.

F ₁ 's versus Testemunhas					
FV	GL	FLOR	AP	PROD	M1000
Híbridos (F ₁ 's)	14	37,70**	203,90**	1,98**	16,11*
Testemunhas	9	30,17**	342,26**	3,84**	14,87*
F ₁ 's vs Testemunhas	1	5,78 ^{ns}	1161,62**	2,15 ^{ns}	148,10**
Erro	48	2,59	32,11	0,63	6,78
Média geral		62,51	116,21	5,40	20,73
h ² (%)		93,15	84,25	68,01	57,88
CV(%)		2,57	4,88	14,75	12,57

Teste F: *, **, ns, 5%, 1% e Não significativo, respectivamente.

Para o contraste II (Tabela 5), o efeito de híbridos (F_1 's) foi significativo para FLOR, AP, PROD e não significativo para M1000 ($p \leq 0,01$). A fonte de variação País e o contraste entre F_1 's vs País foram significativas para todas as características. Albuquerque et al. (2010) trabalharam com dois híbridos de sorgo granífero (F_1), e observaram resultados significativos para a característica massa de mil grãos. Esta característica apresentou média de 15,10g, nos trabalhos de Albuquerque et al. (2010) e média de 22,86 g no presente trabalho, sendo um dos componentes de produção que tende a apresentar correlação significativa com a produtividade de grãos.

Tabela 5. Resumo da análise de variância conjunta do contraste F_1 's versus País, para florescimento (FLOR), em dias; altura de plantas (AP), em cm; produtividade de grãos (PROD), em $t.ha^{-1}$; e massa de mil grãos (M1000), em gramas, das safras 2014/2015 e 2015/2016.

F_1's versus País					
FV	GL	FLOR	AP	PROD	M1000
Híbridos (F_1 's)	14	36,45**	733,59**	1,68**	2,65 ^{ns}
País	16	825,97**	842,13**	3,47**	4,32*
F_1 's vs País	1	147,16**	829,04**	51,68**	18,13**
Erro	62	3,30	55,31	0,48	2,35
Média geral		62,77	123,09	4,51	23,97
h^2 (%)		90,95	92,46	71,38	11,18
CV(%)		2,89	6,04	15,38	6,40

Teste F: *,**, ns, 5%, 1% e Não significativo, respectivamente.

No contraste III, os efeitos de híbridos (F_1 's) para FLOR, AP, PROD ($p \leq 0,01$) e M1000 ($p \leq 0,05$) foram significativos. Entre híbridos (F_2 's) todas as características foram significativas, exceto M1000. O efeito da interação entre híbridos (F_1 's) vs híbridos (F_2 's) foi significativo para FLOR e PROD ($p \leq 0,01$) e não significativo para AP e M1000 (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância conjunta do contraste F_1 's versus F_2 's, para florescimento (FLOR), em dias; altura de plantas (AP), em cm; produtividade de grãos (PROD), em $t.ha^{-1}$; e massa de mil grãos (M1000), em gramas, das safras 2014/2015 e 2015/2016.

F_1's versus F_2's					
FV	GL	FLOR	AP	PROD	M1000
Híbridos (F_1 's)	24	39,40**	554,01**	2,29**	12,93*
Híbridos (F_2 's)	21	45,27**	368,00**	1,44**	6,90 ^{ns}
F_1 's vs F_2 's	1	34,18**	143,20 ^{ns}	104,20**	0,47 ^{ns}
Erro	92	4,57	61,97	0,38	7,28
Média geral		63,81	127,85	4,60	23,88
h^2 (%)		88,39	88,81	83,24	43,66
CV(%)		3,35	6,16	13,47	11,30
Depressão endogâmica		1,28	-1,79	-31,88	0,52

Teste F: *,**, ns, 5%, 1% e Não significativo, respectivamente.

Os coeficientes de variação dos caracteres estão dentro dos limites aceitáveis para ensaios de campo, ou seja, a precisão experimental foi aceitável, uma vez que os coeficientes de variação obtidos foram similares aos dos trabalhos de melhoramento já desenvolvidos (MENEZES et al., 2017; ANDRADE et al., 2016).

Para a maioria das características os efeitos de pais, híbridos F₁, híbridos F₂ e seus contrastes foram significativos, o que mostra variabilidade entre os genótipos avaliados e aumenta a possibilidade de ganhos genéticos na seleção dos melhores. Estes resultados são corroborados pelas estimativas altas de herdabilidade (h^2).

A herdabilidade (h^2) para FLOR apresentou nos três contrastes uma variação entre 88,39% e 93,15%. Para AP a h^2 , considerando os três contrastes, a variação foi de 84,25% até 92,46%. Já para PROD a herdabilidade variou entre 68,01% e 83,24%. E a característica M1000 mostrou menor herdabilidade entre as demais, apresentando baixa h^2 entre 11,18% e 57,88%.

Para obter uma alta herdabilidade é importante reduzir os efeitos da variância fenotípica, dada pela interação dos genótipos com os meios. Uma forma de amenizar esta interação é aumentar a precisão experimental com casualização, homogeneidade dos locais de plantio, uniformidade de tratamentos culturais entre os anos de ensaio e uma avaliação acurada das características. As altas herdabilidades indicam que há baixa variância fenotípica e efeito ambiental associado, e que a variância genotípica é superior. Dessa forma, pode-se inferir com maior segurança que, os resultados obtidos são provenientes do desempenho do genótipo, com menor interferência de efeitos alheios, que poderiam subestimar ou superestimar os resultados.

A depressão endogâmica (Tabela 6) foi estimada para a geração de híbridos F₂, provindos da autofecundação dos híbridos F₁. Para as características FLOR, AP, e M1000 houve baixa depressão endogâmica. Entretanto, a característica PROD manifestou alta depressão endogâmica, o que culminou na redução de 31,8% de F₁ para F₂. A redução da produção de grãos em sorgo por depressão por endogamia foi relatada pela primeira vez nos trabalhos de Quinby (1974), mas com menos de 10% de depressão. Nos trabalhos de Geeta e Rana (1987) e Reddy e Joshi (1993) foram avançadas gerações de híbridos de sorgo granífero, para F₂ e F₃, sendo observada depressão endogâmica acentuada para produtividade de grãos, em sorgo granífero, com média de 42% e 50%, respectivamente.

Na Figura 1 estão representadas as médias dos híbridos F₁'s, heterose (H%) e heterobeltiose (Hb%) para as características avaliadas. A amplitude de FLOR (Figura 1, A) foi de 56 a 69 dias, com mediana de 64 dias. Em geral, o grupo de híbridos F₁'s avaliado foi

considerado como precoce, o que é uma vantagem. O produtor deve iniciar o plantio dos híbridos mais tardios, em fevereiro, e finalizar plantando híbridos mais precoces, em março. O mercado atual prefere híbridos cada vez mais precoces, pois o sorgo é plantado na safrinha tardia, podendo o híbrido superprecoce escapar da seca, que normalmente ocorre em junho/julho (MENEZES et al., 2017).

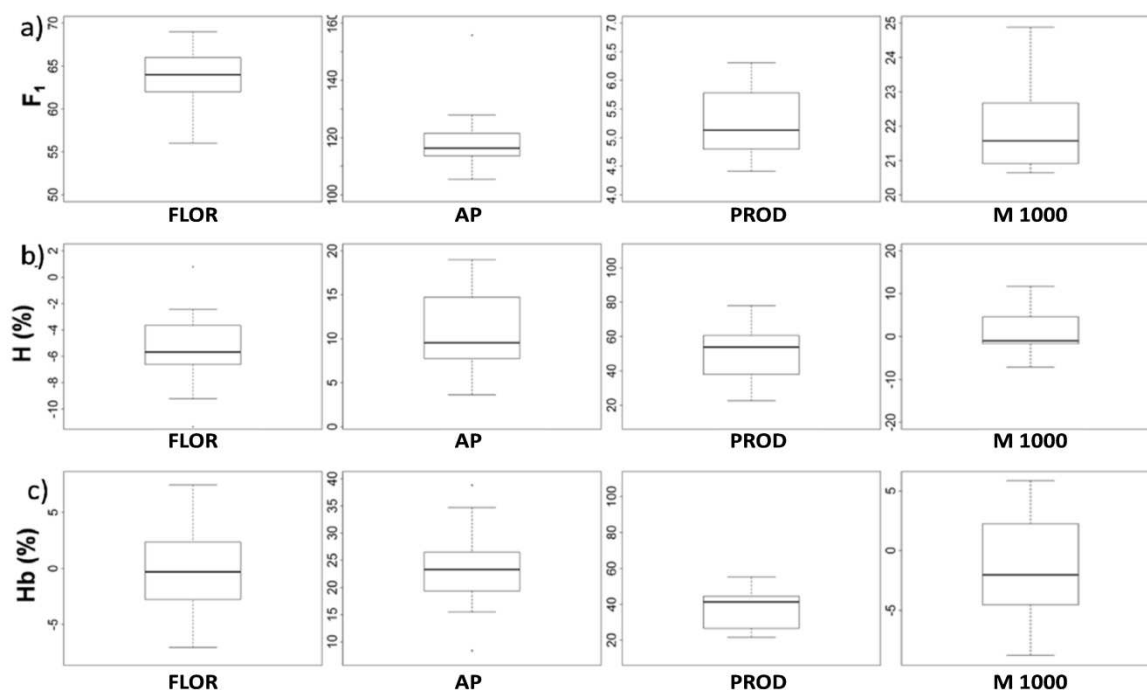


Figura 1. Boxplot com médias dos híbridos F₁'s, heterose (H%) e heterobeltiose (Hb%), para as características florescimento (FLOR), em dias; altura de plantas (AP), em cm; produtividade de grãos (PROD), em ton.ha⁻¹; e massa de mil grãos (M1000), em gramas.

Para FLOR a H% (Figura 1, B) variou de -9%, a -2%, com média de -6%. Portanto, houve redução de 2 a 6 dias na média geral dos híbridos para o florescimento de plantas. Esta redução no ciclo é importante, estando associada, principalmente, à segunda safra, que se estende de fevereiro a julho. Nesta época as temperaturas mais amenas, a falta de chuvas, e os ventos no fim do ciclo, interferem muito na produtividade. Deste modo, optar por genótipos mais precoces pode ser uma medida bastante eficiente para escapar das intempéries e dos patógenos presentes neste período.

A heterobeltiose (Hb%) foi apresentada na Figura 1 C, mostrando resultados negativos e positivos. A heterobeltiose significa que o híbrido teve resultado superior ao de seu melhor progenitor. Para florescimento, a seleção consiste na escolha dos híbridos mais precoces, e dessa forma, o melhor pai foi o que apresentou menor ciclo. A dispersão para Hb foi de -3% e 7%, o que indica que alguns parentais contribuíram de maneira acentuada para reduzir as

médias de florescimento, e outros contribuíram para aumentar as médias de florescimento, respectivamente.

Na Figura 1 A, em relação à característica AP, estão apresentadas as médias dos híbridos F₁'s. A amplitude, entre valores mínimos e máximos foi de 105 a 125 cm, com mediana de 118 cm de altura de plantas. Na Figura 1 B, os resultados de H% demonstraram que, os pais contribuíram para aumentar a altura de plantas, com valores positivos. A magnitude do terceiro quartil indica que, os pais contribuíram para o aumento de 10% a 15% na altura de plantas. Para os resultados de Hb% (Figura 1, C) os híbridos que superaram o melhor de seus pais apresentaram de 20 a 27% de incremento em AP.

A PROD variou de 4,4 a 6,5 ton.ha⁻¹, (Figura 1, A) com mediana 5,1 ton.ha⁻¹. Quanto à H% (Figura 1, B), os intervalos de amplitude foram de 20% a 80% para os resultados dos híbridos. A mediana mostra que os híbridos F₁'s produziram 58% a mais do que a média de seus pais. Na Hb% (Figura 1, C) houve superioridade também destes híbridos em relação ao seu parental com melhor desempenho para essa característica.

Além da produtividade superior, os híbridos de sorgo granífero apresentaram maior adaptabilidade e estabilidade, do que seus parentais, no trabalho de Menezes et al. (2017). A explicação para tal observação é que a estrutura populacional, pode influenciar na interação genótipos x ambientes, podendo resultar em maior adaptabilidade e estabilidade, por causa da maior homeostase populacional e individual desses genótipos (BECKER & LÉON, 1988). Sendo assim, a homeostase populacional pressupõe que cada indivíduo que compõe a população se adapte a faixa de variação ambiental mais restrita, e na homeostase individual cada indivíduo da população apresenta adaptação mais ampla, a diversos ambientes (ALLARD & BRADSHAW, 1964). Dessa forma é possível afirmar que, genótipos heterozigotos (híbridos F₁) e heterogêneos sejam mais resistentes às variações ambientais do que aqueles com elevada homozigose (linhagens) e homogeneidade.

A M1000 (Figura 1, A) apresentou médias de F₁'s de 21,5 g. A variação entre os valores mínimos e máximos foi de 21,9 a 25 g, sendo a maior concentração de médias dos híbridos de 23,8 g. A heterose variou entre -4 a 9%, mostrando que o comportamento da heterose contrastou entre o aumento e a redução da massa de mil grãos dos híbridos em relação aos pais. A Hb% se comportou de maneira semelhante à H%, com um intervalo discreto, que variou entre -10 e 6%.

A figura 2 apresenta as estimativas de custos de produção do sorgo granífero para a segunda safra, formulados a partir dos dados do Instituto de Fortalecimento da Agropecuária de Goiás (IFAG). Com base nesses dados pode-se avaliar a margem percentual de custo de

produtos e serviços que mais contribuem para as despesas da lavoura. Dentre estes, as sementes apresentaram 7,17% dos custos, herbicida roundup (pré-plantio) 2,8%, outros herbicidas, inseticidas e fungicidas com 1,89%, 2,67% e 1,54%, respectivamente. Os defensivos agrícolas, quando somados, representaram 24% dos custos de produção, superando as despesas com sementes. Ainda no estudo referido, a relação entre despesa e receita considerou uma lavoura de alta tecnologia, caracterizada pela qualidade de sementes e tratos culturais, com expectativa de 60 sc/ha de grãos de sorgo, com preço médio de R\$31,88/sc, com uma receita bruta esperada de R\$1912,80 por hectare.

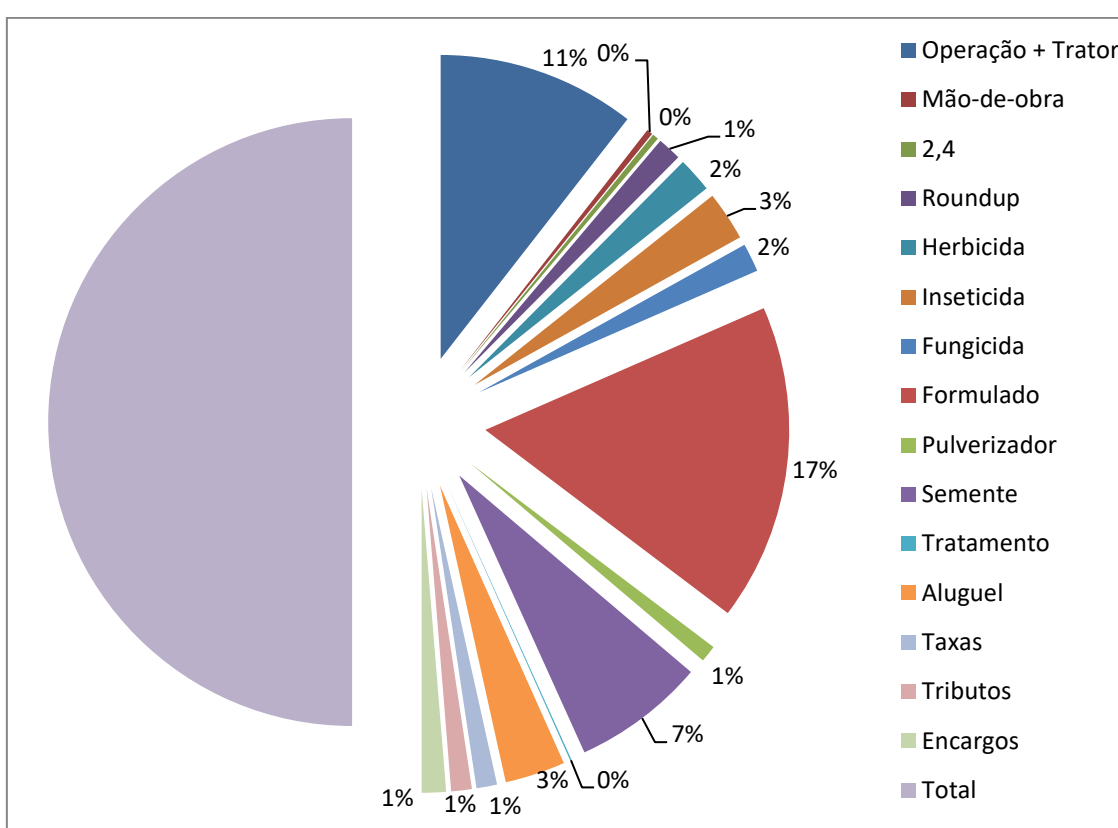


Figura 2. Estimativa de custo de produção de sorgo granífero na 2ª safra, em janeiro de 2020. Fonte: IFAG (2020). Modificado por: Santos (2020).

Como observado anteriormente, adquirir sementes detém pouco mais de um quinto (7,17%) dos gastos brutos da produção de grãos. Decerto este valor é bastante significativo, mas, sabe-se que a qualidade dessas sementes é um dos fatores determinantes para a produção final de grãos de sorgo granífero, devendo compensar estes custos iniciais. Todavia, alguns produtores de médio/baixo nível tecnológico, ainda assim, optam pelo uso de sementes F₂, provenientes de sementes F₁ colhidas na safra anterior. Em curto prazo é compreensível o salvamento de sementes, que reduz 21% dos custos de produção.

De acordo com a IFAG (2020) (figura 2), os custos por hectares ficam em torno de R\$184,50/ha, que quando extrapolados para áreas maiores formam valores ainda mais substanciais. No entanto, quando ocorrem planejamento e projeção de lucro é possível concluir que, os gastos iniciais com sementes são compensados por altas produtividades, e maior volume de produção total.

Para facilitar a visualização, realizou-se uma projeção com os dados do IFAG (2020) para estimar o que ocorreu com a receita *versus* despesa de um produtor X, numa área de 30 hectares, quando este utilizou sementes de híbridos simples (F₁) AG1040, e quando o mesmo produtor salvou sementes e implantou sua lavoura subsequente com sementes F₂, deste mesmo material genético, de acordo com os dados obtidos no presente trabalho. Em condições experimentais, com sementes certificadas (F₁), o híbrido AG1040 produziu 5,6 t.ha⁻¹ (93 sc/ha) (figura 3), com rentabilidade bruta de R\$2.970,00/ha. Quando se utilizou sementes F₂ do mesmo, este atingiu a produtividade de 3,2 t.ha⁻¹ (53 sc/ha) (figura 3), e rentabilidade de R\$174,00/ha, com declínio foi de 43,6% na receita bruta da lavoura. Este híbrido apresentou a maior queda de produtividade registrada nos genótipos avaliados no presente trabalho, sendo um exemplo oportuno para demonstrar as desvantagens econômicas de não adquirir sementes F₁ a cada safra.

Na figura 3, seguem apresentadas as médias dos híbridos em F₁ e F₂, além do Índice de depressão endogâmica (ID%) calculado. Os híbridos com menor ID%: foram 1236043, BRS330, BRS332, 1G100, AS 4625, Buster e Fox, com índice inferior aos 25%. O híbrido AS 4625 apresentou o ID% mais baixo dentre todos os híbridos avaliados, com 14,8% de depressão endogâmica, e ainda no grupo de híbridos com maior produtividade de grãos (5,9 t.ha⁻¹).

Dentre os híbridos comerciais da Embrapa Milho e Sorgo, o BRS332 foi aquele que apresentou menor ID%, com 17,2%, enquanto BRS330, BRS373 e BRS380 tiveram 24,4%, 31,1%, 29,4%, respectivamente. Quanto aos híbridos experimentais, se destacou o genótipo 1236043, que apresentou 16,9% de índice de depressão endogâmica, e segundo menor ID% do conjunto de híbridos utilizados neste trabalho. De maneira geral, os híbridos comerciais da Embrapa apresentaram, em média, menor ID% (25,5%) do que os híbridos experimentais (34,3%).

Os híbridos 1168093, 1167017, 1236020, 1G282, JADE e A9735 R apresentaram as maiores produtividades de grãos, acima de 6,0 t.ha⁻¹, mas, também os maiores ID%. O híbrido 1G282 teve a maior produtividade de grãos (7,52 ton.ha⁻¹), mas também um índice de 35,8% de depressão, demonstrando de maneira expressiva as desvantagens da utilização das

sementes em F₂. Este caso se repetiu com os híbridos A 9735 R (6,3 t.ha⁻¹) e 1167017 (6,2 t.ha⁻¹), que apresentaram a segunda e terceira maiores produtividades, e ID% de 42,4% e 42,8%, respectivamente.

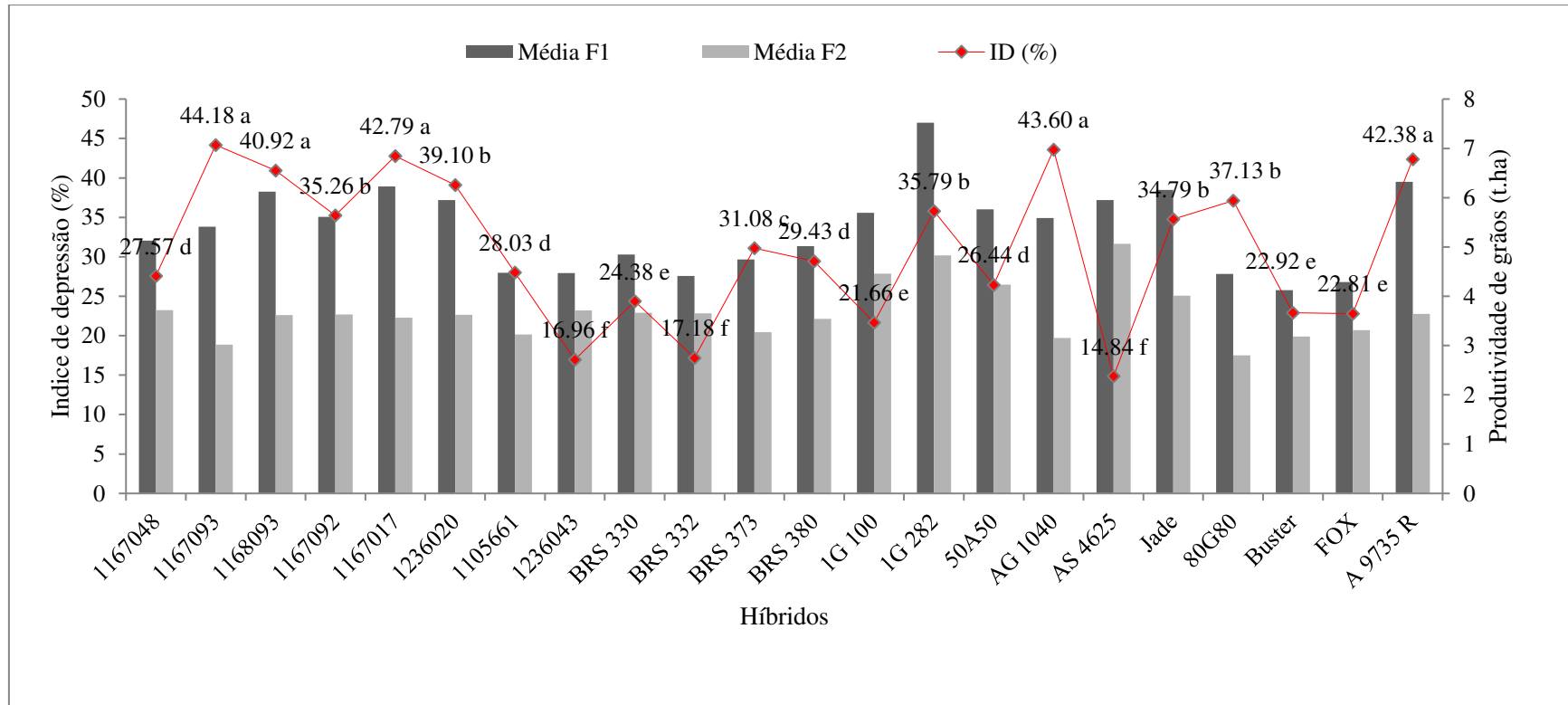


Figura 3. Médias dos híbridos F₁ e F₂, e Índice de depressão por endogamia (ID%) dos híbridos experimentais e comerciais, para produtividade de grãos (PROD).

Na Figura 4 estão apresentadas as correlações entre H% dos F₁'s e distância genética entre os seus genitores para todas as características. Foi observada distribuição normal apenas para a característica FLOR, devida ao número reduzido de observações, sendo uma amostra pequena. Na diagonal inferior é mostrada a dispersão de valores para a heterose correspondente a cada característica.

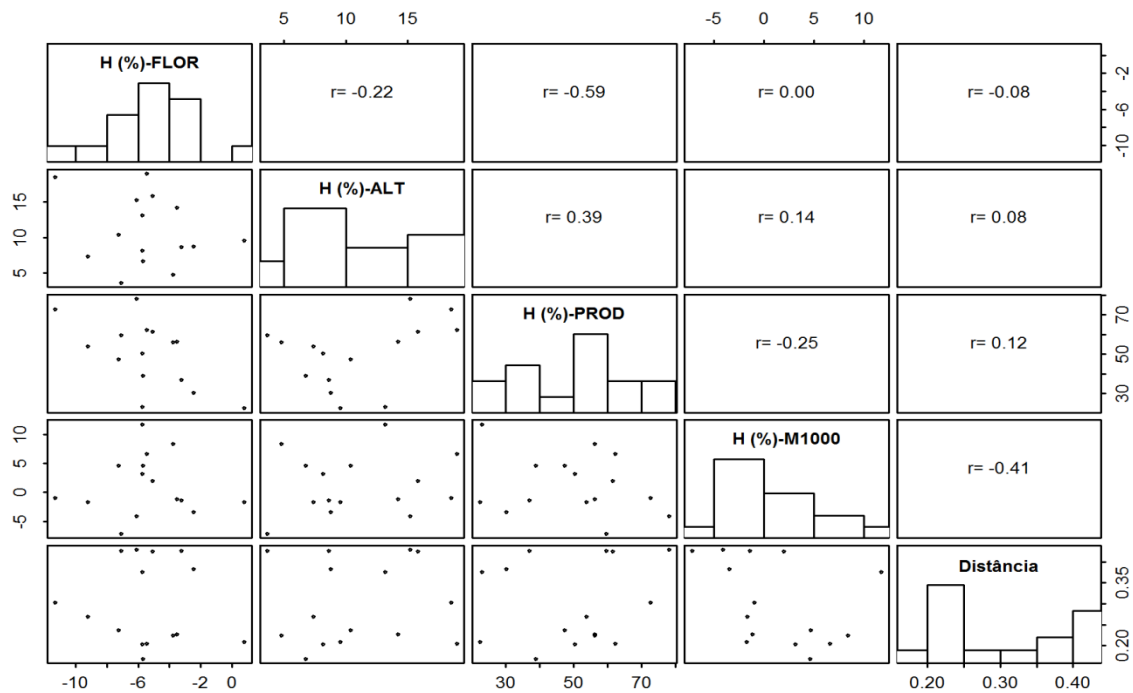


Figura 4. Correlação de Pearson entre heterose (H%) e distância genética, associada às linhagens progenitoras, para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PROD) e massa de mil grãos (M1000).

Para FLOR a correlação com distância foi de -0,8, inferindo que, quanto maiores as distâncias entre os parentais, menor deve ser o resultado de H% para FLOR. A mesma interpretação pode ser dada ao resultado da correlação para M1000 entre H% e distância genética, que foi de -0,41. Para a H% de AP e PROD, as correlações foram baixas e positivas (0,08 e 0,12).

A significância entre FLOR e PROD foi a de maior magnitude observada (-0,59), mostrando uma associação alta e negativa entre essas variáveis, que deve ser considerada com cautela na seleção de híbridos precoces e com alta produtividade de grãos. Para Jordan et al. (2003) esta correlação se mostrou negativa (-0,23), apesar de baixa, mas admitindo que, uma seleção precoce poderia determinar na escolha de híbridos igualmente com bom potencial produtivo. Numa condição sem estresse o rendimento de grãos possui correção positiva com maturidade e altura de plantas. No entanto numa condição de estresse hídrico como ocorre na segunda safra no Brasil, o rendimento é maior em híbridos mais precoces, pois muitas vezes eles escapam da seca por terem ciclo mais precoce. Portanto, é importante selecionar híbridos tardios para o início da segunda safra e híbridos superprecoces para plantios no final da safra.

Quanto à AP a correlação com produtividade foi de 0,39, e similar aos valores encontrados por Jordan et al. (2003), de 0,47. Para M1000 grãos (0,41) a correlação média com PROD foi considerada, e compreendida por M1000 ser um componente de produção. Além disso, a correlação da PROD com distância genética para este estudo foi de 0,12, e não significativa. Já nos trabalhos de Jordan et al., (2003) ($r = 0,42$) a correlação entre PROD (H) e distância foram semelhante às encontradas em milho (LEE et al., 1989).

As baixas correlações observadas entre H% das diferentes características avaliadas e a distância genética podem ter ocorrido devido ao número reduzido de linhagens e híbridos utilizados neste trabalho. Contudo, os desvios de dominância apresentados na cultura do sorgo proporcionam a inferência sobre esta correlação, ocasionada por efeitos aditivos, dominantes, epistáticos e os diferentes tipos de interações gênicas (SCAPIM, 1998; MARCHESAN, 2008; MENEZES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019).

A heterose observada em todos os híbridos era esperada pela existência dos desvios aditivo e de dominância, já relatados em outros trabalhos. Cruz et al. (2012), Menezes et al. (2014) e Menezes et al. (2015) observaram efeitos significativos da capacidade geral de combinação (CGC) de ambos os grupos de linhagens, que foram superiores aos efeitos da capacidade específica de combinação (CEC) observados nos híbridos. Assim, os efeitos aditivos foram predominantes no controle das características florescimento, alturas de plantas e produtividade de grãos.

De acordo com Oliveira et al. (2019) a ação gênica aditiva auxilia na seleção de grupos de indivíduos superiores, que produzirão, conseqüentemente, híbridos igualmente promissores. No entanto, os efeitos não aditivos, de dominância, podem favorecer ainda mais na obtenção de híbridos com expressão da heterose, principalmente daqueles cujos genitores apresentaram alta CGC. Sabe-se ainda que, a CGC e CEC estão relacionadas à variabilidade

genética entre progenitores (KENGA et al., 2004), e dessa forma, é possível inferir sobre os resultados individuais, analisando o híbrido resultante de cada cruzamento.

Na Tabela 7 constam os resultados de médias dos híbridos F_1 's e dos valores de H% e Hb%. Os híbridos mais precoces foram 1167048 (58 dias), 1099044 (61 dias), 1170017 (62 dias), 1169054 (56 dias) e BRS380 (62 dias). Os demais híbridos floresceram, em média, aos 66 dias. Para H% os melhores resultados foram negativos, com redução do ciclo dos híbridos. O híbrido 1167048 ficou entre os mais precoces, e dentre os cinco de menor heterose, com redução de 6%, o que corresponde a aproximadamente quatro dias de ciclo. Os híbridos 1236020 (-7,10%), 1168093 (-7,26%), BRS332 (-9,23%) e BRS330 (-11,33%) apresentaram os valores mais baixos de heterose, com redução de cinco a sete dias de florescimento de plantas, em relação aos seus pais.

Tabela 7. Médias dos F₁'s, heterose (H%) e heterobeliose (Hb%), para florescimento (dias), altura de plantas (cm), produtividade de grãos (ton.ha⁻¹) e massa de mil grãos (g).

Pedigree	FLORESCIMENTO			ALTURA DE PLANTAS			PRODUTIVIDADE			MASSA DE MIL GRÃOS		
	\bar{F}_1	H%	Hb%	\bar{F}_1	H%	Hb%	\bar{F}_1	H%	Hb%	\bar{F}_1	H%	Hb%
1167048	58 d	-6,11	7,45	122,9 c	15,23	34,70	5,130 c	78,06	43,15	20,70b	-4,10	-6,27
1167093	65 b	-5,68	-5,34	112,5 d	6,72	23,29	5,410 b	38,96	28,74	22,42b	4,59	1,49
1168093	64 b	-7,26	-7,04	119,6 c	10,38	23,18	6,124 b	47,43	45,72	22,02b	4,64	3,34
1167092	67 a	-3,25	-3,13	115,4 d	8,63	26,48	5,609 b	36,95	21,74	21,57b	-1,38	-2,35
1167017	64 b	-3,78	0,79	115,4 d	4,77	26,48	6,229 b	56,19	41,81	24,88a	8,36	4,41
1236020	64 b	-7,10	-6,99	112,5 d	3,65	23,29	5,952 b	59,54	53,50	20,88b	-7,14	-8,76
1105661	63 b	0,80	1,61	114,6 d	9,56	22,77	4,478 c	22,49	-7,08	21,05b	-1,71	-2,03
1236043	67 a	-2,44	-0,99	108,8 d	8,75	19,18	4,472 c	30,26	24,78	20,64b	-3,47	-6,56
BRS 330	67 a	-11,33	5,28	120,0 c	18,52	28,57	4,848 c	72,71	55,30	20,65b	-0,98	-3,29
BRS 332	69 a	-9,23	6,17	118,3 d	7,37	8,40	4,412 c	53,83	41,33	20,93b	-1,66	-5,78
BRS 373	64 b	-3,53	1,06	105,4 d	14,22	15,53	4,748 c	56,27	32,48	21,47b	-1,14	-2,79
BRS 380	62 b	-5,44	-1,32	116,3 d	18,98	24,55	5,018 c	62,30	35,94	22,92a	6,59	5,83
1099044	61 c	-5,07	3,11	126,7 c	15,81	38,81	5,501 b	61,48	53,49	21,82b	2,00	-1,21
1170017	62 c	-5,73	-2,37	127,9 c	8,14	18,99	6,306 b	50,42	43,55	24,00a	3,14	0,74
1169054	56 d	-5,75	-0,30	155,8 a	13,16	19,49	4,949 c	23,06	-7,07	24,18a	11,72	3,00
1G 100	60 c			115,9 d			5,690 b			21,04b		
1G 282	65 b			145,0 b			7,523 a			23,14a		
50A50	64 b			125,0 c			5,761 b			22,68a		
AG 1040	67 a			127,5 c			5,589 b			23,35a		
AS 4625	65 b			129,6 c			5,948 b			23,87a		
Jade	63 b			127,1 c			6,155 b			24,78a		
80G80	61 c			113,8 d			4,455 c			20,22b		
Buster	57 d			123,8 c			4,126 c			23,28a		
Fox	58 d			120,0 c			4,290 c			20,93b		
A 9735 R	63 b			139,6 b			6,320 b			24,81a		
Médias	63	-5,39	-0,13	119,5	10,93	23,58	5,279	50,00	33,83	22,01	1,30	-1,35

Na figura 5 encontram-se os resultados individuais dos híbridos para heterobeliose (%), a fim de destacar aqueles materiais que obtiveram resultados superiores ao de seus melhores genitores. Para florescimento de plantas é importante determinar que, a obtenção de heterobeliose negativa implica naqueles híbridos que apresentaram valores mais interessantes para tal. Dentro desse critério se destacaram os híbridos com heterobeliose menor que -3%, que foram 1167093 (-5), 1168093 (-7), 1167092 (-4), 1236020 (-7). Isso significa uma redução que varia entre 3 e 5 dias a menos no ciclo, sendo ainda uma estratégia de escape do híbrido, que poderia ser exposto às intempéries neste intervalo.

No quesito altura de plantas, todos os híbridos apresentaram Hb% positiva, demonstrando padrão de aumento na estatura dos híbridos (Figura 5). A altura de plantas apresentou valores elevados de heterobeliose, o que não é tão favorável para híbridos de sorgo granífero, cuja altura tem-se por finalidade reduzir ao padrão de 1,50m, aproximadamente. A média de heterobeliose para essa característica foi de 24%. Contudo, os híbridos com maior Hb%, que foram 1168048 (34,7%) e 1099044 (38,8%), tiveram porte médio de 123 cm e 127 cm, respectivamente. Ou seja, o porte desses híbridos condiz com os padrões de seleção de genótipos de sorgo granífero. E ainda, indica que a média dos pais para altura de plantas é baixa, e que o melhor dos pais também apresenta porte baixo.

Para produtividade de grãos os resultados individuais determinam híbridos com alto potencial. O híbrido BRS330 apresentou Hb de 55,3%, com produtividade de 4,8 t.ha⁻¹. Já os híbridos com o segundo maior valor de Hb (53,5%) foram 1236020 (6,1 t.ha⁻¹) e 1099044 (5,5 t.ha⁻¹) alcançaram produtividades de grãos maiores, sendo seu melhor genitor recíproco (L-11). O híbrido 1167017 deve ser destacado por também fazer parte do grupo de híbridos provenientes de cruzamentos com a L-11, e ainda por ter apresentado a segunda maior produtividade (6,2 t.ha⁻¹), dentre os híbridos da Embrapa Milho e Sorgo (comerciais e experimentais). No entanto, no caso do híbrido 1167017, o melhor genitor foi a linhagem mãe, L-01, que também foi o melhor genitor do híbrido 1170017 (6,3 t/ha⁻¹), que correspondeu ao híbrido mais produtivo da Embrapa Milho e Sorgo.

A massa de mil grãos é uma característica importante, como um componente principal para produtividade de grãos. Porém, neste experimento tanto a heterose, quando a heterobeliose para tal característica não foram tão representativas, apresentando até mesmo valores negativos.

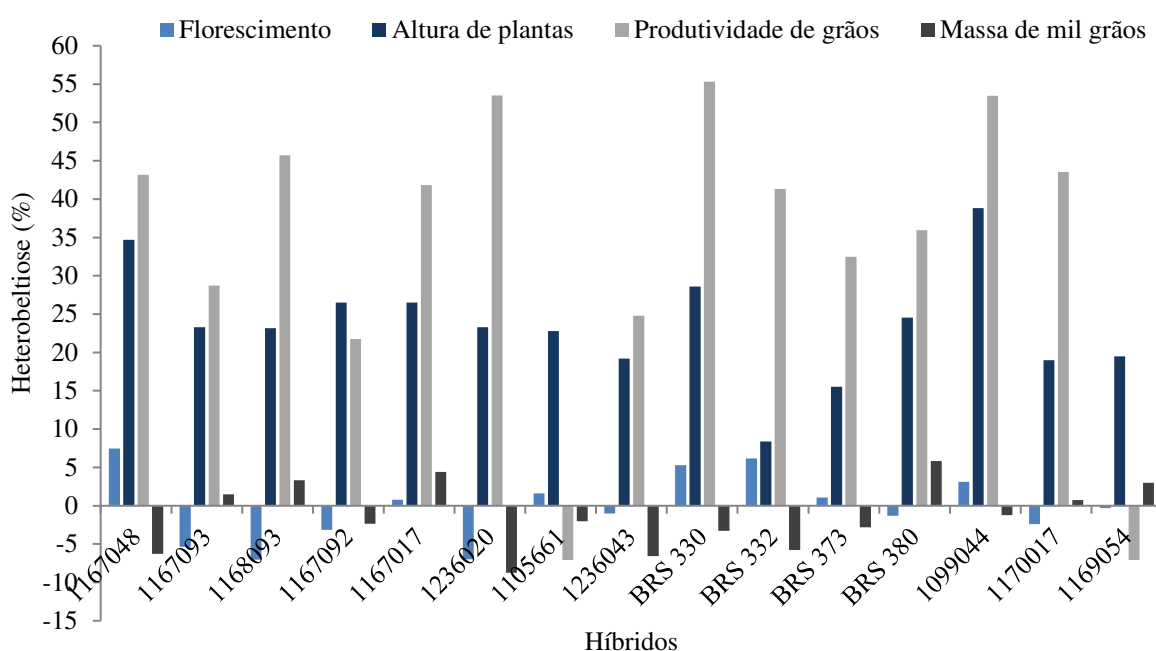


Figura 5. Estimativa de heterobeltiose (Hb%) dos híbridos experimentais e comerciais da Embrapa Milho e Sorgo, para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PROD) e massa de mil grãos (M1000).

Alguns valores foram positivos para Hb% em FLOR, como por exemplo, no híbrido 1167048, indicando ciclo aproximado de 5 dias a mais que seu pai mais precoce. Já os híbridos 1170017 (-2,37%), 1167092 (-3,13%), 1167093 (-5,34%), 1236020 (-6,99%) e 1168093 (-7,04%) apresentaram número de dias para florescimento inferior ao de seu progenitor mais precoce (Tabela 7). Meena et al. (2017) ao avaliar dez linhagens, três testadores, 30 híbridos comerciais e três experimentais, apresentou resultados convergentes aos encontrados neste trabalho, para a H% na característica florescimento em cultivares de sorgo granífero. Para estes autores a heterose teve limite inferior de -26,71% e superior de 16,06%. Ainda neste caso, a maioria dos híbridos apresentou heterose negativa, com redução no ciclo das plantas, e magnitude da heterobeltiose de -24,55%. Jain et al. (2013), Premalatha et al. (2006) apresentaram valores para heterose, que variaram de -0,47 até 14,16%, indicando o potencial da hibridação para reduzir o ciclo dos genótipos F₁. Nestes trabalhos os melhores cruzamentos foram capazes de reduzir em 14,16% e 13,60% o ciclo, respectivamente, superando o parental mais precoce. Os resultados mostram que é possível selecionar híbridos mais precoces do que seus parentais, o que é importante para o sorgo plantado na safrinha tardia.

Quanto à AP o comportamento geral da H% foi de aumento da altura de plantas. Isto é, apesar da seleção sempre por híbridos de porte baixo, o vigor híbrido faz com que esses

sejam mais altos que seus parentais, o que foi visto também para a Hb%. Para heterobeltiose, em média os híbridos superaram em 23,60% a altura de seus pais mais baixos. De forma individual, o híbrido 1170017 apresentou 8,14% de heterose, com acréscimo de 10 cm a mais que a média de altura de seus parentais. Além deste, os híbridos BRS332, 1167093, 1167017 e 1236020 tiveram valores de heterose que representaram aumento na sua altura de plantas, entre 5 e 10 cm. Parmar e Tikka (2005) e Singh e Shrotria (2008) reportaram heterose e heterobeltiose positivas para altura de plantas, com resultados de 3 a 52% de heterose para os híbridos. O comportamento da H% e Hb% dos híbridos para altura de plantas convergem entre os trabalhos, o que indica que, mesmo na seleção de parentais de menor porte, deve-se considerar os ganhos heteróticos para prever aumento na altura dos híbridos.

A média de produtividade dos híbridos foi de 5,28 t.ha⁻¹. Todos os híbridos apresentaram heterose, e, portanto, resultados de produtividade de grãos superiores ao desempenho *per se* de seus parentais. Os híbridos com melhor desempenho foram o 1167093 (5,41 t.ha⁻¹), 1099044 (5,50 t.ha⁻¹), 1167092 (5,61 t.ha⁻¹), 1236020 (5,95 t.ha⁻¹), 1168093 (6,12 t.ha⁻¹), 1167017 (6,23 t.ha⁻¹), 1170017 (6,31 t.ha⁻¹). A H% média foi de 50%, mostrando que os híbridos F₁'s tiveram potencial de produtividade de grãos superior à média dos seus pais. Este resultado converge com os encontrados por Jain e Patel (2013) em que a heterose para produtividade de grãos atingiu 55,43%.

Os híbridos 1099044 (61,48%), BRS380 (62,30%), BRS330 (72,71%) e 1167048 (78,06%) tiveram os mais altos valores de heterose. Mahdy et al. (2011) obtiveram heterose para PROD que variou de 9% a 97%, e mostrou ainda que, todos os híbridos de sorgo granífero tiveram desempenho superior ao de seus pais. Kenga et al. (2004), Bakheit et al. (2004), Hovny et al. (2005), Mohamed (2007) and Essa (2009), Mahdy et al. (2011) também concluíram em seus resultados que, houve vigor híbrido para todos os genótipos de sorgo granífero avaliados.

O híbrido 1167048 apresentou pouco mais de 2,0 t.ha⁻¹ de grãos a mais do que a média de produtividade de seus parentais. Este resultado é significativo para a produtividade de grãos, enfatizando ganhos por hibridação. O híbrido 1099044 também se destacou, por estar classificado no grupo de médias superiores (5,5 t.ha⁻¹) e com heterose de 61,48%. As linhagens parentais desse híbrido já apresentavam médias altas para essa característica, e ainda assim, o híbrido resultante foi 60% mais produtivo do que seus pais, em média. E ainda, 53,49% mais produtivo que seu parental com maior produtividade de grãos, como demonstrado nos valores de Hb%.

O híbrido 1170017 apresentou a maior produtividade de grãos ($6,23 \text{ t.ha}^{-1}$), 50,42% de heterose e 43,55% de heterobeltiose. Os parentais deste híbrido possuem um bom desempenho *per se* para produtividade de grãos. Contudo, a exploração da variabilidade genética por meio da hibridação torna o seu uso simples e vantajoso. Esta superioridade dos híbridos F_1 foi demonstrada para os resultados de todos os híbridos, em relação à produtividade de grãos.

A massa de mil grãos média foi de 22,01 g, e seguindo este parâmetro cinco híbridos 1167093 (22,42 g), BRS380 (22,92 g), 1170017 (24,00 g), 1169054 (24,18 g), 1167017 (24,88 g) foram superiores à média. Dentre estes, quatro apresentaram os melhores resultados de heterose, sendo 4,59% (1167093), 6,59% (BRS380), 11,72% (1169054), 8,36% (1167017). Os híbridos 1167017, BRS380 e 1169054 também foram superiores para médias de F_1 , e resultados de Hb% (4,41%, 5,83% e 3,00%, respectivamente). Jain e Patel (2013) encontraram valores de heterose semelhantes para M1000, que variou entre 4,06 e 19%, e para heterobeltiose variou entre 3,16 e 19,77%.

De forma geral, os híbridos experimentais superaram os resultados de PROD dos híbridos comerciais da Embrapa (BRS330, BRS332, BRS373 e BRS380). Estes materiais comerciais ficaram no segundo grupo de médias, com valores mais baixos de produtividade ($4,85 \text{ t.ha}^{-1}$; $4,41 \text{ t.ha}^{-1}$; $4,75 \text{ t.ha}^{-1}$; $5,02 \text{ t.ha}^{-1}$) do que os experimentais. Contudo, para heterose, os híbridos comerciais apresentaram melhores resultados médios, que variaram entre 53,83% e 72,71%. Estes resultados são importantes para que o melhorista analise o potencial de seus híbridos experimentais, bem como a expectativa de heterose e resultados de combinações entre linhagens.

Com os dados apresentados na Tabela 2 são notadas as similaridade e diversidades no quadro de genitores trabalhados neste estudo. A maior parte das linhagens é derivada de mistura entre raças. Apenas as linhagens L-12 e L-17 são linhagens puras, originárias da raça *Caudatum*. Estas linhagens foram melhoradas no Brasil, originadas da Etiópia, e fazem parte de um importante grupo de genitores nos programas de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo. Para Juarez et al., (2017) e Elangovan et al. (2014), verificar os níveis de homozigose das linhagens e a diversidade genética entre essas, é um objetivo importante nos programas de melhoramento, a fim de promover a diversificação da base genética dos cultivares, com cruzamentos entre as fontes de germoplasma das mais diversas origens, maximizando as expectativas de heterose.

No dendrograma (Figura 6) é observada a formação de três grupos de linhagens, apesar de ser um grupo reduzido de linhagens. No primeiro grupo encontram-se as linhagens

L-09 e L-17. As demais linhagens se enquadraram no grupo 2 e a linhagem L-08 foi separada das demais, no grupo 3. É possível notar que, as linhagens R (restauradoras), de maneira geral, se encontram em grupos distintos, apresentando maior distância genética. Já as linhagens A ficaram próximas, demonstrando menor variabilidade, explicada pelo número reduzido de linhagens macho estéreis existentes. Estes resultados corroboram aos encontrados por Rooney (2012), Silva (2016) e Menezes et al. (2017).

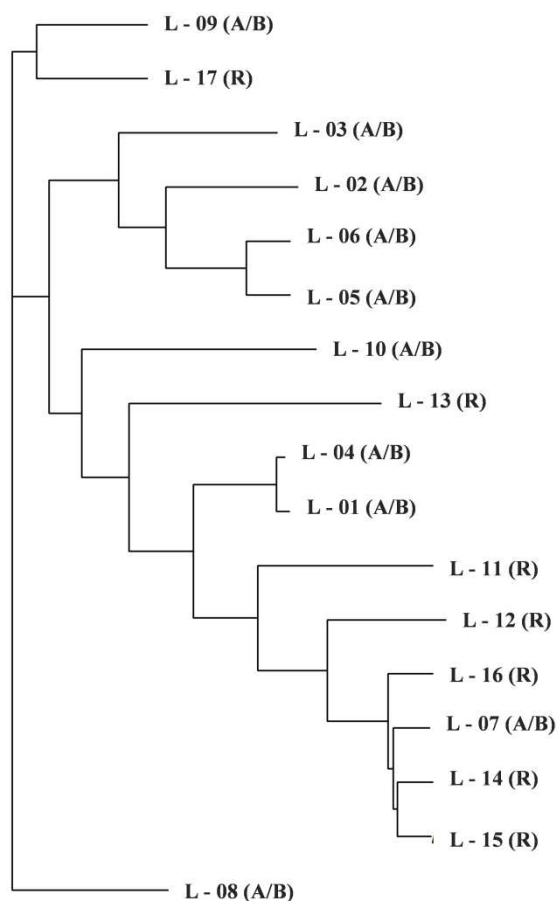


Figura 6. Dendrograma para análise de clusters com base na distância genética entre as linhagens parentais, para estudo de H% e Hb% das características; florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PROD) e massa de mil grãos (M1000).

Na Figura 4 se encontram os resultados das correlações, que apresentaram valores baixos, indicando não haver uma associação significativa entre distância genética das linhagens (Figura 6) e da heterose. Nos trabalhos de Arunachalam et al. (1984) foi descrito que, nem sempre se encontra uma associação significativa e positiva entre diversidade genética e heterose. Assim, não há uma relação clara entre a distância genética e a heterose de características quantitativas, portanto, não se deve generalizar uma associação significativa para todos os casos. Contudo, no trabalho de Silva (2016), o estudo de distância genética entre linhagens parentais dos principais híbridos de sorgo granífero da Embrapa, mostrou média de distância superior (0,35) à média geral do trabalho. Neste caso, os híbridos mais produtivos foram também, aqueles com maior distância genética entre parentais. Dessa forma é possível pressupor que linhagens mais divergentes podem gerar híbridos com maiores produtividades de grãos.

O híbrido F₁ 1236020 (PROD = 5,95 t.ha⁻¹; d = 0,4303), apresentou desempenho superior, e ainda, a maior distância genética entre linhagens progenitoras observada neste trabalho. Os híbridos 1167048 (H%=78,06; d=0,4285) e 1099044 (H%=61,48; d=0,4248) apresentaram os maiores resultados de heterose e também as maiores distâncias entre linhagens parentais. Um fato importante para explicar estes resultados é que, os híbridos com maiores produtividades e maiores valores de heterose possuem um dos parentais recíprocos (L-11) (Tabela 1). A L-11 foi utilizada como parental de onze híbridos. Dentre estes híbridos, sete se destacaram, sendo classificados como os de maiores produtividades de grãos e/ou maiores valores de heterose, sendo eles; 1167048, 1167093, 1167092, 1167017, 1236020, BRS 373, 1099044. híbrido 1167017 (PROD = 6,23 t.ha⁻¹, H% = 56,19), segundo mais produtivo, 1236020 (PROD = 5,95 t.ha⁻¹, H% = 59,54), e 1099044 (PROD = 5,50 t.ha⁻¹, H% = 61,48), provenientes de cruzamentos com L-11, apresentaram maiores médias de PROD e os maiores valores de H%.

Observa-se também que, a linhagem L-01 foi progenitora dos híbridos com maiores produtividades de grãos (1170017 e 1167017). Além de seu potencial como progenitora, o desempenho *per se* dessa linhagem foi de alto potencial produtivo (4,39 t.ha⁻¹). É importante que o ponto de partida para a escolha de genitores seja considerar os seus resultados individuais para a característica que se deseja melhorar. E ainda que, estas linhagens tenham boa capacidade de combinação, resultando em híbridos igualmente promissores, que expressem heterose. Dessa forma, pode-se destacar que as linhagens L-01 (4,39 t.ha⁻¹), L-06 (4,61 t.ha⁻¹) e L-07 (4,20 t.ha⁻¹) utilizadas como progenitores femininos, obtiveram os

melhores resultados individuais, mas, também originaram os híbridos superiores, que culminaram em heterose, e ainda os mais produtivos deste estudo.

5. Conclusões

Houve a manifestação da heterose e heterobeltiose em todas as características avaliadas para todos os híbridos F₁.

O florescimento apresentou, em geral, heterose e heterobeltiose negativas, indicando a redução no ciclo dos híbridos F₁ em relação aos seus pais.

Para a altura de plantas, produtividade de grãos e massa de mil grãos a heterose e heterobeltiose foram positivas, mostrando incremento da característica para os híbridos F₁.

A depressão endogâmica afetou com maior intensidade a produtividade de grãos, com redução média de 50%, de acordo com as médias dos híbridos em F₂.

Os híbridos 1170017 (6,31 t.ha⁻¹), 1167017 (6,23 t.ha⁻¹) e 1099044 (5,50 t.ha⁻¹) se destacaram com os melhores resultados de produtividade, heterose acima de 50%, além de heterose negativa para a característica florescimento, que culminou em redução do ciclo, em relação à média de seus genitores.

A diversidade genética mostrou variabilidade estreita entre as linhagens, mas foi notada a separação em clusters principalmente entre as linhagens A (macho estéreis) e R (restauradoras). As linhagens L-01, L-06 e L-07 apresentaram produtividade acima de 4 t.ha⁻¹ no seu desempenho *per se*, sendo estas também aquelas que resultaram nos híbridos com maior produtividade de grãos.

6. Referências Bibliográficas

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE GRÃOS: safra 2019/20: quinto levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 7, n. 5, 2020. 29 p.

ALBUQUERQUE, C. J. B.; TARDIN F. D.; PARRELLA, R. A. C.; GUIMARÃES, A. D.; OLIVEIRA, R. M.; SILVA, K. M. J. Sorgo sacarino em diferentes arranjos de plantas e localidades de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. 39(1): 69-85, 2012.

ALLARD, R.W.; BRADSHAW, A.D. Implications of genotypes-environmental interactions in applied plant breeding. **Crop Science**, Madison, v.4, n.5, p.503-508, 1964.

ALMEIDA FILHO, J. E.; TARDIN, F. D.; RESENDE, M. D. V.; SILVA, F. F.; GRANATO, I. S. C.; MENEZES, C. B. Genetic evaluation of grain sorghum hybrids in Brazilian environments using the REML/BLUP procedure. **Scientiaagricola**. (Piracicaba, Braz.) vol.71 no.2 Piracicaba Mar./Apr. 2014.

ANDRADE, L. C.; MENEZES, C. B.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V.; EMYGDIO, B. M.; TARDIN, F. D. Avaliação de produtividade, adaptabilidade e estabilidade genotípica de sorgo granífero em três ambientes. **Revista AGROTEC** – v. 37, n. 1, p. 36-43, 2016.

ARUNACHALAM, V.; BANDYOPADHYAY, A.; NIGAN, S.N.; GIBBONS, R.W. Heterosis in relation to genetic divergence and specific combining ability in groundnut (*Arachis hypogea* L.). **Euphytica**, Wageningen, v.33, p.33- 39, 1984.

BAKHEIT, B.R., A.H. GALAL, M.R.A. HOVNY AND A.A. ABD-EL-MOTTALEB, 2004. Heterosis and combining ability in grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Assiut. J. Agric. Sci.** 35: 165-183.

BARROS, A.S. Viabilidade agrônômica de híbridos de milho e sorgo em safrinha no município de Rio Verde, GO. Dissertação de mestrado, Universidade de Rio Verde. 2008. 74p

BECKER, H.C.; LÉON, J. Stability analysis in plant breeding. **Plant Breeding**, Berlin, v.101, n.1, p.1-23, 1988.

BUSBICE, T.H. Predicting yield of synthetic varieties. **Crop Science**, v.10, p.265-269, 1970. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1970.0011183X001000030017x>

BERNARDO R. Genomewide selection with minimal crossing in self-pollinated crops. **Crop Science**. 50: 624-627. 2010.

BUNPHAN, D.; JAISIL, P.; SANITCHON, J.; KNOLL, J.E.; ANDERSON, W.F. Heterosis and combining ability of F1 hybrid sweet sorghum in Thailand. **Crop Science**, v.55, p.178-187, 2015. DOI: 10.2135/cropsci2014.05.0363.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. & FRITSCHÉ-NETO, R. Endogamia e heterose. In: Borém, A. Melhoria de plantas. Viçosa: UFV, 2017, 543p.

CLIFFORD, H.; STEPHENSON, W. An introduction to numerical classification. Academia Press, London, 1975.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE GRÃOS: safra 2018/19: nono levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 6. 1-113 junho 2019.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S and REGAZZI, A. J. (2014). Modelos biométricos aplicados ao Melhoramento Genético. 3rd edn. Editora UFV, Viçosa.

CRUZ, C.D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.35, p.271-276, 2013. DOI: 10.4025/actasciagron.v3.5i3.21251.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ED. VIÇOSA, MG: UFV, 2012. 514 P.

DEU, M. e HAMON, P. The genetic organization of sorghum. **Agriculture et développement**. Special issue - December 1994.

DURÃES, F. O. M.; MENEZES, C. B.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E.; TARDIN, F. D.; QUEIROZ, V. A. V.; RIOS, SARA DE ALMEIDA; GARCIA, J. C.; COELHO R. R. O mercado de sorgo para usos alimentares, biomassa energética e condicionadora de solos: histórico, situação atual e perspectivas. 1821. Resumos: XXXII Congresso Nacional de Milho e Sorgo.

ELANGO VAN, M.; PERUMALLA, K. B.; SEETHARAMA, N.; PATIL, J. V. Genetic Diversity and Heritability Characters Associated in Sweet Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Sugar Tech* 16 (2): 200-210. April (2014).

ESSA, H.M.H., 2009. Breeding grain sorghum for drought tolerance. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Ain Shams University, Egypt.

FALCONER, D.S.; MacKAY, T.F.C. Introduction to quantitative genetics. 4.ed. London: Longman, 1996. 464p.

FREITAS, R. S.; DUARTE, P. D.; BORGES, W. L. B.; STRADA, W. Produtividade de grãos de milho safrinha e sorgo no noroeste do Estado de São Paulo. In: X SEMINÁRIO DE MILHO SAFRINHA. Rio Verde Goiás, 2009b. Anais Rio Verde Goiás.

FONSECA, S.; PATTERSON, F. L. Yield components heritabilities and interrelationships in winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Science*. Madison. v.8. p 614-617. 1968.

GEETA, S.; RANA, B.S. Genetic changes over six generations in a pedigree breeding programme in sorghum. **Indian Journal of Genetic and Plant Breeding**. v.41, p.61-66, 1987.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 13. ed. Piracicaba: Livraria Nobel S.A, 1990.

GOYAL, S.N. and JOSHI, P. Genetics of yield and panicle components in grain sorghum hybrids. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**. 44: 96-101. 1984.

GUEDES, F. L.; TARDIN, F. D.; MAGALHAES, J. V.; NASCIMENTO, J. M. S.; SANTOS, F. G.; SCHAFFERT, R. E. Avaliação fenotípica de linhagens de sorgo granífero quanto a tolerância a seca em pós-florescimento. In: Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 4., 2007, São Lourenço. Melhoramento de plantas e agronegócio: Anais... Lavras: UFLA: SBMP, 2007.

HALLAUER, A. R. 2007. History, contribution, and future of quantitative genetics in plant breeding: Lessons from maize. **Crop Science**. 47(S3):S5–S19.

HARLAN J. R.; DE WET, J. M. 1972. A simplified classification of cultivated sorghum. **Crop Science**, 12:1 72-1 76

HORN, R.; GUPTA, K. J.; COLOMBO, N. Mitochondrion role in molecular basis of cytoplasmic male sterility. *Mitochondrion*, v. 19, p. 198-205, 2014.

- HOVNY, M.R.A.; MAHMOUD, K.M.; ALI, M.A. and ALI, H.I. (2005). The effect of environment on performance, heterosis and combining ability in grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Proceedings of the 11th Conference of Agronomy, Nov. 15-16, Agronomy Dept., Faculty Agriculture, Assiut University, 689-699.
- IFAG. Instituto para Fortalecimento da Agropecuária de Goiás. Estimativa de custo de produção. Sorgo 2ª Safra. 2020.
- JAIN, S. K. and PATEL, P. R. Heterosis studies for yield and its attributing traits in Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Forage Research**, 39 (3) : pp. 114-117 (2013).
- JONES, D.F. Dominance of linked factors as a means of accounting for heterosis. Proc. Natl. Acad. Sci., USA, v.3, p.310-312. 1917.
- JORDAN, D. R.; TAO, Y.; GODWIN, I. D.; HENZELL, R. G.; COOPER, M.; MCINTYRE, C. L. Prediction of hybrid performance in grain sorghum using RFLP markers. **Theory Applied Genetics** (2003) 106:559–567 DOI 10.1007/s00122-002-1144-5
- JUÁREZ, M. G.; ONOFRE, L. E. M.; HERNÁNDEZ, V. A. G.; LÓPEZ, M. E. C.; RIQUELME, I. B.; E TÉLLEZ, L. C. Heterosis and combining ability of seed physiological quality traits of single cross vs. three-way sorghum hybrids. **Acta Scientiarum**. Agronomy. Maringá, v. 39, n. 2, p. 175-181, Apr.-June, 2017.
- KENGA, R.; ALABI, S. O.; GUPTA, S. C. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 88, n. 2/3, p. 251-260, 2004.
- KULKARNI, N.; SHINDE, V.K. Heterosis and inbreeding depression in grain sorghum. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.55, p.505-509, 1985.
- KUMAR, A.A.; REDDY, B.V.S.; SHARMA, H.C.; HASH, C.T.; RAO, P.S.; RAMAIAH, B.; REDDY, O.S. Recent advances in sorghum genetic enhancement research at ICRISAT. **American Journal of Plant Sciences**.2: 589-600, 2011.
- KUMAR, S; SRINIVASA, RAO P; REDDY, B.V.S; RAVINDRABABU, V; REDDY, K.H.P. (2016) Heterosis and Inbreeding Depression in Tropical Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Crop Res** 51:1.
- LANDAU E. C. e GUIMARÃES D. P. Clima, época de plantio e zoneamento agrícola. Sorgo: O produtor pergunta, a Embrapa responde. Embrapa. Brasília, DF. 2015.
- LIU, K.; MUSE, S.V. PowerMarker: an integrated analysis environment for genetic marker analysis. *Bioinformatics*, v. 21, p. 2128-2129, 2005.
- LOMBARDI, G. M. R.; NAVEGANTES, P. C. A.; PEREIRA, C. H.; FONSECA, J. M. O.; PARRELLA, R. A. C.; CASTRO, F. M. R.; ROCHA, M. J.; ORNELAS, D. O.; BRUZI, A. T.; AND NUNES, J. A.R. Heterosis in sweetsorghum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.53, n.5, p.593-601, May 2018 DOI: 10.1590/S0100-204X2018000500008.

MAHDY, E.E.; ALI, M.A.; and MAHMOUD, A. M. The Effect of Environment on Combining Ability and Heterosis in Grain Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Asian Journal of Crop Science**. Volume 3 (1): 1-15, 2011

MARCHESAN, C.B. Análise genética de um cruzamento dialélico parcial em pimentão visando caracteres agronômicos e resistência ao oídio. Dissertação (Mestrado). Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2008.

MATZINGAR, D. F.; MANN, T. J.; COCKERHAM, C. C. Diallel crosses in *Nicotiana tabacum*. *Crop Science*. 1962; 2:383-386.

MEENA, B.L.; RANWAH, B.R.; DAS, S.P.; MEENA, S.K.; KUMARI, R.; KHAN, R.; BHAGASARA, V.K. AND DEVIA, G. Estimation of Heterosis, Heterobeltiosis and Economic Heterosis in Dual Purpose Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. ISSN: 2319-7706 Volume 6 Number 5 (2017) pp. 990-1014.

MENEZES, C. B. de; COELHO, A. M.; SILVA, A. F. da; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; RODRIGUES, J. A. S. XXXII Congresso Nacional de Milho e Sorgo “Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil”. 2018.

MENEZES, C. B.; SANTOS, C. V.; SALDANHA, D. C.; JÚLIO, M. P. M.; SILVA, K. J.; RODRIGUES, J. A. S. Capacidade combinatória de linhagens e seleção de híbridos de sorgo granífero. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 509-523, 2017.

MENEZES, C.B.; SANTOS, C.V.; JÚLIO, M.P.M.; SILVA, K.J.; SALDANHA, D.C.; TUMA, E.; SILVA, C.H.; TARDIN, F.D.; RODRIGUES, J.A.S. Capacidade combinatória de linhagens de sorgo granífero cultivados em segunda safra. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 127, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 2015.

MENEZES, C.B.; CARVALHO JUNIOR, G.A.; SILVA, L.A.; BERNARDINO, K.A.; SOUZA, V.F.; TARDIN, F.D.; SCHAFFERT, R.E. Combining ability of grain sorghum lines selected for aluminum tolerance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 14: 42-48, 2014.

MIRANDA, R. A.; GARCIA, J. C.; DUARTE, J. O. Economia. In: FILHO, I A. P. e RODRIGUES, J. A. S. 500 perguntas 500 respostas Sorgo. O produtor pergunta, a Embrapa responde. Embrapa. 2015.

MOHAMED, M. E. 2007. Genetic studies on some grain sorghum genotypes. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Minia University, Egypt.

MONTEIRO, M. C. D.; FILHO, C. J. A.; OLIVEIRA, F. J.; TABOSA, J. N.; BASTOS, G. Q.; REIS. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.3, n.3, p.203-208, jul.-set., 2008

MUTISYA, J.; SUN, C.; ROSENQUIST, S.; BAGUMA, Y.; JANSSON, C. Diurnal oscillation of SBE expression in sorghum endosperm. *Journal of Plant Physiology*, Stuttgart, v. 166, p. 428-9.; 434, 2009.

MURTY, D. S.; TABO, R.; AJAYI, O. Sorghum hibrid seed production and management. Hyderabad: ICRISAT, 1994. 67p. (ICRISAT, Information Bulletin, 41).

OLIVEIRA, I. C. M.; MARÇAL, T. M.; BERNARDINO, K. C.; RIBEIRO, P. C. O.; PARRELLA, R. A.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, J. E. S. Combining Ability of Biomass Sorghum Lines for Agroindustrial Characters and Multitrait Selection of Photosensitive Hybrids for Energy Cogeneration. **Crop Science**. Accepted Paper, posted 04/18/2019. doi:10.2135/cropsci2018.11.0693.

PACHECO, C. A. P.; SANTOS, M. X.; CRUZ, C. D.; PARENTONI, S. N.; GUIMARÃES, P. E. O.; GOMES E GAMA, E. E.; SILVA, A. E.; CARVALHO, H. W. L.; VIEIRA JÚNIOR, P. A. Inbreeding depression of 28 maize elite open pollinated varieties. **Genetics and Molecular Biology**, v.25, p.441-448, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-47572002000400014>.

PANDEY, S., AND P. K. SHROTRIA. Heterosis and inbreeding depression in forage *Sorghum* [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] **Forage Research**. 38 (1) : pp. 35-39 (2012).

PARMAR, H. D., AND S. B. S. TIKKA. Heterosis and combining ability analyses in forage sorghum (2005) **Forage Research**.v. 30: p. 209.

PARRA, J. R.; RIVERA, M. M. M.; GONZÁLEZ, J. J. S.; LARIOS, L. L. C.; MÁRQUES, M. R.; DÍAZ, R. J. L. Heterosis and combining ability among maize narrow-base populations. **Maydica**, v.55, p.75- 83, 2010.

PARRELLA, R. A. da C.; MENEZES, C. B. de; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; PARRELLA, N. N. L. D.; SCHAFFERT, R. E. Cultivares. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. da C. (Ed.). Sorgo: do plantio à colheita. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap. 7, p. 169-187.

PATERNIANI, E.; CAMPOS, M. S. Melhoramento do milho. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: UFV, 2005. p. 491-552.

PREMALATHA, N.; KUMARAVADIVEL, N. AND VEERABADHIRAN, P. Heterosis and combining ability for grain yield and its components in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Indian Journal Genetics**.66(2):123-126(2006).

PURCINO, A. A. C. Sorgo sacarino na Embrapa: histórico, importância e usos. Agroenergia. Ano II, nº: 3, Agosto de 2011.

QUINBY, 1. R. Sorghum improvement and the genetics of growth. Texas, College Station, Texas A. M. University Press, 1974. 108p.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. **Aplicação da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA, 2012. 522 p.

RAMALHO, M. A. P. Genética Quantitativa. In: Ramalho, M. A. P. Genética na Agropecuária. Lavras: UFLA, 2012. 272 - 316 p.

R CORE TEAM (R version 3.1.1). The R project for statistical computing. Disponível em: < <http://www.r-project.org/index.html>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

REDDY, J.N.; JOSHI, P. Heterosis, inbreeding depression and combining ability in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**. v.53, p.138-146, 1993.

RODRIGUES, J. A. S. Macroprograma 2 - Competitividade e Sustentabilidade: Desenvolvimento de cultivares de sorgo dos tipos granífero, forrageiro e para bioenergia tolerantes a múltiplos estresses e adaptados às diferentes regiões do País. 2010.

RODRIGUES, J. A. S. Sistema de produção do sorgo. Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção. v. 2, 2010.

ROONEY, W. Sorghum breeding. In: ACQUEAH, G. (Ed.). Principles of plant genetics and breeding. 2nd ed. Chichester: Wiley-blackwell, 2012. Cap. 34, p. 617-627.

ROONEY, W.L. Sorghum improvement – integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in Agronomy**, v.83, p.37-109, 2004.

SAITOU N.; NEI M. The Neighbor-Joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology Evolution*. v.4, p. 406-425. 1987.

SANTOS, F.G.; CASELA, C.R.; WAQUIL, J.M. Melhoramento de Sorgo. In: BORÉM, A. Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: Editora UFV – Universidade Federal de Viçosa. 2ª ed., p.605-658. 2005.

SAWAZAKI, Eduardo. Sorgo (*Sorghum bicolor*, Moench). In: FAHL, J. I. et al. (Ed). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6. ed. Campinas: Institutoagronômico; 1998. p. 44-49.

SCAPIM, C. A.; RODRIGUES, J. A. S.; CRUZ, A. D.; CECON, P. R.; JÚNIOR, J. I. R.; BRACCINI, A. DE L. Efeitos gênicos, heterose e depressão endogâmica em caracteres de sorgo forrageiro. **Bragantia**, Campinas, 57(1):81-94, 1998.

SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; PITTA, G.; BAHIA, A.; SANTOS, F. Genetic variability in sorghum for efficiency and responsiveness. In: Developments in Plant and Soil, Symposium. Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems. Netherlands: Academics, 2001. p. 72-73.

SCHAFFERT, R. E.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; GOMIDE, R. L.; GUIMARAES, C. T.; MAGALHAES, P. C.; MAGALHAES, J. V.; QUEIROZ, V. A. V. Phenotyping sorghum for adaptation to drought. In: MONNEVEUX, P.; RIBAUT, J.-M. (Ed.). Drought phenotyping in crops: from theory to practice. México, DF: CGIAR: CIMMYT, 2011. pt. 2, p. 287-299.

SILVA, A. G.; BARROS, A. S.; SILVA, L.H. C. P.; MORAES, E. B.; PIRES, R.; TEIXEIRA, I. T. Avaliação de cultivares de sorgo granífero na safrinha no sudoeste do estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 39(2): 168-174, 2009.

SILVA, K. J. da. Diversidade genética entre linhagens de sorgo granífero utilizando descritores morfoagronômicos e marcadores moleculares. 2016 46 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

SILVA, K. J.; TEODORO, P. E.; MENEZES, C. B.; JÚLIO, M. P. M.; SOUZA, V. F.; SILVA, M. J. PIMENTEL, L. D.; and BORÉM, A. Contribution of morphoagronomic traits to grain yield and earliness in grain sorghum. **Genetics and Molecular Research**. v. 16 (2). 2017.

SINGH, R. K., AND SHROTRIA, P. K. Combining ability analyses for forage yield and its components in sorghum forage (*Sorghum bicolor* L. Moench) (2008). **Forage Research**. v. 34 (2). p. 79

SHULL, G. H. Beginnings of the heterosis concept. In: GOWEN, J. W. **Heterosis**. Ames: Iowa State College Press, p. 14-48, 1952.

TAMURA, K., D. PETERSON, N. PETERSON, G. STECHER, M. NEI. Mega5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Mol. Biol. Evol.* v.28, p. 2731-2739. 2011.

TARDIN, F. D.; ALMEIDA FILHO, J. E.; OLIVEIRA, C. M.; LEITE, C. E. P.; MENEZES, C. B.; MAGALHÃES, P. C.; RODRIGUES, J. A. S.; SCHAFFERT, R. E. Avaliação agronômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. 12: 102-117, 2013.

TEODORO, P. E.; SILVA, K. J.; ZANATTO, I. B.; SPONCHIADO, S.; MENEZES, C. B.; TARDIN, F. D. Correlações canônicas na identificação de caracteres relacionados à precocidade e produtividade em híbridos de sorgo granífero. XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2016, Bento Gonçalves.

TROYER, A. F. and WELLIN, E. J. Heterosis Decreasing in Hybrids: Yield Test Inbreds. **Crop science**, VOL. 49, November–December. 2009.

USDA. United States Department of Agriculture. World agricultural production. Washington, 2017. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/>>. Acesso em: 11 fevereiro de 2020.

VENKANNA, V.; RAJU, CH. S.; LINGAIAH, N. and RAO, V. T. Studies on heterosis and inbreeding depression for grain yield and grain quality traits in rice (*Oryza Sativa* L.). **International Journal of Science, Environment and Technology**, Vol. 3, No 3, 2014, 910 – 916.