



LUCAS SILVEIRA LOPES

**SELEÇÃO DE PROGÊNIES PARA RENDIMENTO DE
AÇÚCARES E SUAS IMPLICAÇÕES NA CORRELAÇÃO
ENTRE CARACTERES EM SORGO SACARINO**

**LAVRAS –MG
2019**

LUCAS SILVEIRA LOPES

**Seleção de progênies para rendimento de açúcares e suas implicações na correlação
entre caracteres em sorgo sacarino**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharelado.

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes
Orientador

MSc. Maiara Oliveira Fernandes
Coorientadora

LAVRAS-MG

2019

RESUMO

O programa de seleção recorrente (SR) de sorgo sacarino tem por objetivo aumentar o rendimento de açúcares (TBH), o qual é influenciado por diversos outros caracteres e está diretamente relacionado com o rendimento de etanol de 1ª geração. O objetivo deste trabalho foi verificar as implicações da seleção num programa de SR para rendimento de açúcares na correlação genética entre caracteres em sorgo sacarino. Foram avaliadas 80 progênies, sendo 40 do ciclo 0 de SR, 40 do ciclo 1 de SR e 1 testemunha, em experimento em látice triplo 9x9 conduzido no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária - Fazenda Muquém da Universidade Federal de Lavras. As características avaliadas foram florescimento (FLOR, dias), altura da planta (ALT, m), produção de massa verde (PMV, t/ha), porcentagem de caldo extraído (EXT), teor de sólidos solúveis (SST, °Brix) e TBH (t/ha). As análises uni e multivariadas foram realizadas em ambiente R. As variâncias genéticas foram significativas para todos os caracteres em algum dos ciclos 0 ou 1 da SR, com exceção do SST. O padrão de associação entre os caracteres foi similar nos dois ciclos de SR, sendo mais expressivas no ciclo 1. Em geral, os caracteres ALT, FLOR, PMV e TBH apresentaram elevadas correlações genéticas entre si, enquanto os caracteres EXT e SST apresentaram baixa correlação com os demais caracteres em ambos os ciclos. O TBH, que é um índice multiplicativo formado a partir dos caracteres SST, EXT e PMV, foi mais fortemente influenciado pela variação no PMV. O programa de SR ao longo dos ciclos 0 e 1 tem gerado progênies com melhor rendimento de açúcares, que, em geral, associaram, maior tempo para florescimento, maior altura e maior produção de biomassa.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, associação entre caracteres, seleção indireta, análise multivariada, modelos mistos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1	Aspectos fisiológicos e agroeconômicos do sorgo sacarino.....	6
2.2	Melhoramento genético do sorgo sacarino.....	7
2.3	Correlações entre caracteres de sorgo sacarino	8
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1	Progênies, plano experimental e condução.....	10
3.2	Caracteres avaliados	11
3.3	Análise estatística	12
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
	REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

Visando atender a políticas de diminuição de gases de efeito estufa, a busca pelo aumento na produção de biocombustíveis é crescente (JONKER et al., 2015). No Brasil, a cana-de-açúcar se destaca como a principal fonte para produção de etanol. Contudo, o aporte de matéria-prima pela exploração de novas culturas bioenergéticas é de grande interesse para uma maior versatilidade na produção de biocombustíveis (SILVA et al., 2017).

O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) destaca-se como uma cultura complementar à cana-de-açúcar na cadeia produtiva do etanol por possuir colmos suculentos com presença de açúcares diretamente fermentáveis, possibilidade de uso da infraestrutura agroindustrial sucroalcooleira para produção de etanol e por seu cultivo poder ocorrer durante a entressafra da cana-de-açúcar. Dessa forma, o sorgo sacarino contribuiria para reduzir o período de ociosidade das usinas e, por consequência, também as oscilações no preço do etanol ao longo do ano (SOUZA et al., 2016). Além disso, o sorgo sacarino pode ser propagado por sementes, apresenta um ciclo mais curto, de 120 a 130 dias, e eficiente no uso de insumos e água quando comparado à cana-de-açúcar (MASSON et al., 2015).

Os programas de melhoramento de sorgo sacarino buscam aumentar a quantidade e qualidade dos açúcares no caldo extraído por unidade de área (SILVA et al., 2017). Neste sentido, o Programa de Melhoramento de Sorgo Sacarino da Embrapa Milho e Sorgo iniciou em 2014 o programa de seleção recorrente visando aumento do rendimento de açúcares (PARRELLA et al., 2016). O caráter-alvo da seleção das progênies a partir do ciclo inicial (ciclo 0) foi o TBH (toneladas de brix por hectare). A partir desta seleção, efetuou-se a recombinação para formar a população base do ciclo seguinte (ciclo 1) (LEITE et al., 2018).

O TBH constitui-se num caráter quantitativo influenciado por diversos outros caracteres agrônômicos e tecnológicos (LEITE et al., 2017), além de apresentar efeito direto no rendimento de etanol (LOMBARDI et al., 2015), principal caráter-alvo de melhoramento em sorgo sacarino. Dessa forma, ao proceder à seleção para TBH espera-se incrementar o rendimento de etanol. Esta expectativa é amparada no conhecimento das correlações existentes, o qual tem grande utilidade no delineamento de estratégias de melhoramento, bem como para avaliar a viabilidade de se promover a seleção em uma característica, visando obter ganhos em outra de difícil avaliação (CARVALHO; CRUZ, 1996; CRUZ; CARNEIRO, 2006). Ademais, é pertinente fazer o monitoramento das correlações genéticas entre os

caracteres ao longo dos ciclos de melhoramento do programa de SR para rendimento de açúcares em sorgo sacarino.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi verificar as implicações da seleção de progênies num programa de SR para rendimento de açúcares nas correlações entre caracteres em sorgo sacarino.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos fenológicos e agroeconômicos do sorgo sacarino

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma espécie da família Poaceae cultivada em ampla faixa de latitude, abrangendo inclusive regiões muito quentes e secas, onde ocorrem veranicos (MAGALHÃES; DURÃES; RODRIGUES, 2008). É uma espécie bem adaptada a ambientes extremos e, ao mesmo tempo, uma espécie bem responsiva a boas práticas agrícolas e a um bom manejo cultural (PURCINO, 2011). A resistência a seca envolve aspectos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos, como um sistema radicular profundo, diminuição do metabolismo e ajustamento osmóticos nas folhas, respectivamente (DINIZ, 2010). É uma planta C4, de dias curtos (DINIZ, 2010), cujo ciclo apresenta entre 110 a 150 dias (WU et al., 2010).

Segundo May et al. (2013), o sorgo é classificado nos grupos graníferos, cujo produto principal é o grão; forrageiros, voltado para produção de forragem; biomassa, voltado para produção de biomassa lignocelulósica para cogeração de energia e/ou produção de etanol de 2ª geração; vassoura, para confecção de vassouras e artesanatos; e o sacarino, com a particularidade de apresentar colmo com caldo rico em açúcares, sendo, dessa forma destinado à produção de etanol de 1ª geração, bem como, em virtude do expressivo rendimento de biomassa, para cogeração de energia.

Segundo Magalhães (2008), o ciclo do sorgo é dividido em 3 fases fenológicas: o estágio de crescimento (EC1) que se estende da germinação até o estabelecimento da plântula, sendo uma fase essencial para o rendimento futuro da lavoura; o estágio EC2 que se inicia com a formação da panícula e vai até o início do florescimento; e o estágio EC3 que vai do florescimento até a maturação fisiológica dos grãos, sendo uma fase relacionada com o enchimento de grãos. O estágio EC3 se caracteriza no sorgo sacarino pelo acúmulo progressivo de açúcares no caldo contido nos colmos, sendo que o máximo do teor de açúcares acumulado ocorre entre o estágio pastoso e a maturidade fisiológica dos grãos (KUMAR et al., 2010).

O sorgo sacarino é uma cultura bioenergética com aptidão para produção de etanol, figurando como uma fonte alternativa de energia renovável. Nos últimos anos, discussões no cenário internacional têm realçado a importância de se buscar alternativas para minimizar os

impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, bem como a diminuição da dependência dos derivados de petróleo (EMYGDIOS, 2010; REZENDE; RICHARDSON, 2016). Nesse sentido, o Brasil tem desempenhado papel exemplar, com a expressiva participação de fontes de energia renováveis na matriz energética, com destaque especial para o etanol, cuja matéria-prima básica é a cana-de-açúcar. O país apresenta ainda grande potencial de exploração de outras culturas bioenergéticas, a exemplo do sorgo sacarino, por apresentar condições climáticas favoráveis, grande quantidade de terras agricultáveis e potencial tecnológico (KOHLHEPP, 2010; REZENDE; RICHARDSON, 2016).

O interesse pelo cultivo do sorgo sacarino parte principalmente do setor sucroalcooleiro por ser uma alternativa para a obtenção de matéria prima de qualidade na entressafra da cana de açúcar (MAY et al., 2013). Além de ser uma cultura propagada por semente, o que torna o plantio mais fácil, possui ciclo curto, é totalmente mecanizável e pode ser processado utilizando-se da mesma infraestrutura das usinas de processamento da cana-de-açúcar (EMYGDIOS, 2010). Vale destacar que os subprodutos do sorgo sacarino, como o bagaço, podem ser utilizados para cogeração de energia por meio da queima direta em caldeira e/ou para a alimentação animal juntamente com os grãos (MAY, et al. 2013). O bagaço do sorgo sacarino também pode ser utilizado na adubação (NEGRO et al., 1999) e na produção de papel (BELAYACHI; DELMAS, 1995). Outra vantagem do sorgo sacarino é o uso eficiente da água, apresentando elevada tolerância a estresses hídricos e menor exigência de fertilizantes relativo a outras culturas (PRASAD, 2007). Dessa forma, produtores e usineiros consideram o cultivo do sorgo uma forma de aumentar sua lucratividade, visto que apresenta muitas vantagens agronômicas e é cultivado na entressafra da cana, quando os preços do etanol estão altos (REZENDE; RICHARDSON, 2016).

2.2 Melhoramento genético do sorgo sacarino

Segundo May et al. (2013), para que a produção de etanol a partir do sorgo sacarino seja considerada economicamente viável, o teor de açúcar mínimo no caldo deve ser de ao menos 14,5°Brix. A partir de uma tonelada de colmo com 14,5°Brix é possível produzir cerca de 60 litros de etanol ou 3.000 litros por hectare, admitindo uma produção de colmos de 50 toneladas por hectare. O Período de Utilização Industrial (PUI) também é uma característica que deve ser levada em consideração num programa de melhoramento. O PUI consiste no período que a cultivar está apta para colheita no campo e mantém seus padrões de rendimento.

Num programa de melhoramento, portanto, se objetiva desenvolver cultivares com maior teor de açúcares no colmo e com o maior PUI possível.

Diversas características, tanto agronômicas quanto industriais, podem ser avaliadas num programa de melhoramento visando maior produção de etanol. Dentre elas, destaca-se a produção de toneladas de brix por hectare (TBH), que apresenta correlação alta e positiva com a produção de etanol (LOMBARDI et al., 2015; LEITE et al., 2017). Tanto o rendimento de etanol como o TBH são caracteres que apresentam arquitetura genética complexa e forte influência de fatores ambientais. Neste caso, o emprego da seleção recorrente é altamente recomendável, pois possibilita o acúmulo gradual da concentração de alelos favoráveis na população sem exaurir a variabilidade genética (FEHR, 1993). Um ciclo de seleção recorrente consiste nas etapas de obtenção de progênies com posterior avaliação, seleção e recombinação das melhores, obtendo-se, por fim, uma população melhorada. Com sucessivos ciclos aumentam-se as possibilidades de se obter progênies que atendam aos padrões desejados e, ao mesmo tempo, mantem-se a variabilidade genética na população para futuros ganhos com seleção (RAMALHO et al., 2012).

A etapa de recombinação pode tornar-se trabalhosa em culturas autógamas, como o sorgo. Porém, a existência da macho-esterilidade genética nuclear e a colheita das sementes das plantas estéreis a cada geração convertem a população de autofecundação em uma população de fecundação cruzada, possibilitando a aplicação de métodos de melhoramento como a seleção recorrente (DOGGETT, H.; EBEHART, S. A. 1968). Parrella et al. (2016) e Leite (2018) descrevem a utilização de macho esterilidade genética nuclear como forma de obtenção de uma população base para se iniciar um trabalho de seleção recorrente em sorgo sacarino para aumento do rendimento de açúcares. Além disso, a existência da macho-esterilidade genético-citoplasmática é uma importante ferramenta para se tornar viável a produção de híbridos em escala comercial (PARRELA, 2016).

2.3 Correlações entre caracteres em sorgo sacarino

As estimativas de parâmetros genéticos orientam os melhoristas no delineamento de estratégias e tomada de decisão num programa de melhoramento, bem como avaliar e comparar diferentes métodos (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012; RAMALHO; SANTOS; ZIMMERMANN, 1993). No melhoramento de sorgo sacarino, o conhecimento das correlações entre caracteres é de grande importância, visto que se objetiva a seleção

simultânea de caracteres, em que a seleção visando o incremento de um caráter pode afetar outro correlacionado.

As correlações genéticas, por exemplo, permitem prever o comportamento de um caráter quando se realiza a seleção em outro correlacionado, auxiliando o melhorista na adoção de estratégias para obtenção de ganhos numa característica de difícil avaliação ou de baixa herdabilidade, através da seleção de outra, de fácil mensuração (CARVALHO; CRUZ, 1996; CRUZ; CARNEIRO, 2006).

Além disso, as correlações quantificam o grau de associação genético e não-genético entre duas ou mais características. A correlação fenotípica é aquela mensurada diretamente a partir de dois caracteres, com causa genética e ambiental. A correlação genética é aquela de natureza herdável, alvo do melhoramento genético e que pode ser fruto de genes pleiotrópicos ou genes ligados (FALCONER; MACKAY, 1996).

Em sorgo sacarino, Lombardi et al. (2015) e Leite et al. (2017) observaram que a variável toneladas de brix por hectare (TBH) apresentou correlação alta e positiva sobre a variável rendimento de etanol por hectare, podendo ser usada como seleção indireta para este caráter. Por outro lado, Leite (2018) observou que ao selecionar progênies com maior valor de TBH, houve um acréscimo no número de dias para o florescimento, o que não é desejável visto que se buscam cultivares mais precoces.

A análise via abordagem de modelos mistos torna-se interessante nesse contexto, pois além de lidar de forma mais adequada com o desbalanceamento de dados, ela possibilita a inclusão de informações na modelagem, resultando em predições mais acuradas, principalmente em programas de melhoramento como o de sorgo sacarino, em que o melhorista considera vários caracteres simultaneamente. Como tais caracteres são, muitas vezes, correlacionados, a análise via modelos mistos multivariada, proposta por Henderson e Quaas (1976) é adequada pois considera tanto a matriz de variâncias quanto a de covariâncias genéticas e residuais, tornando os dados mais acurados e evitando viés devido à seleção baseada num único caráter.

3 MATERIAL E MÉTODOS

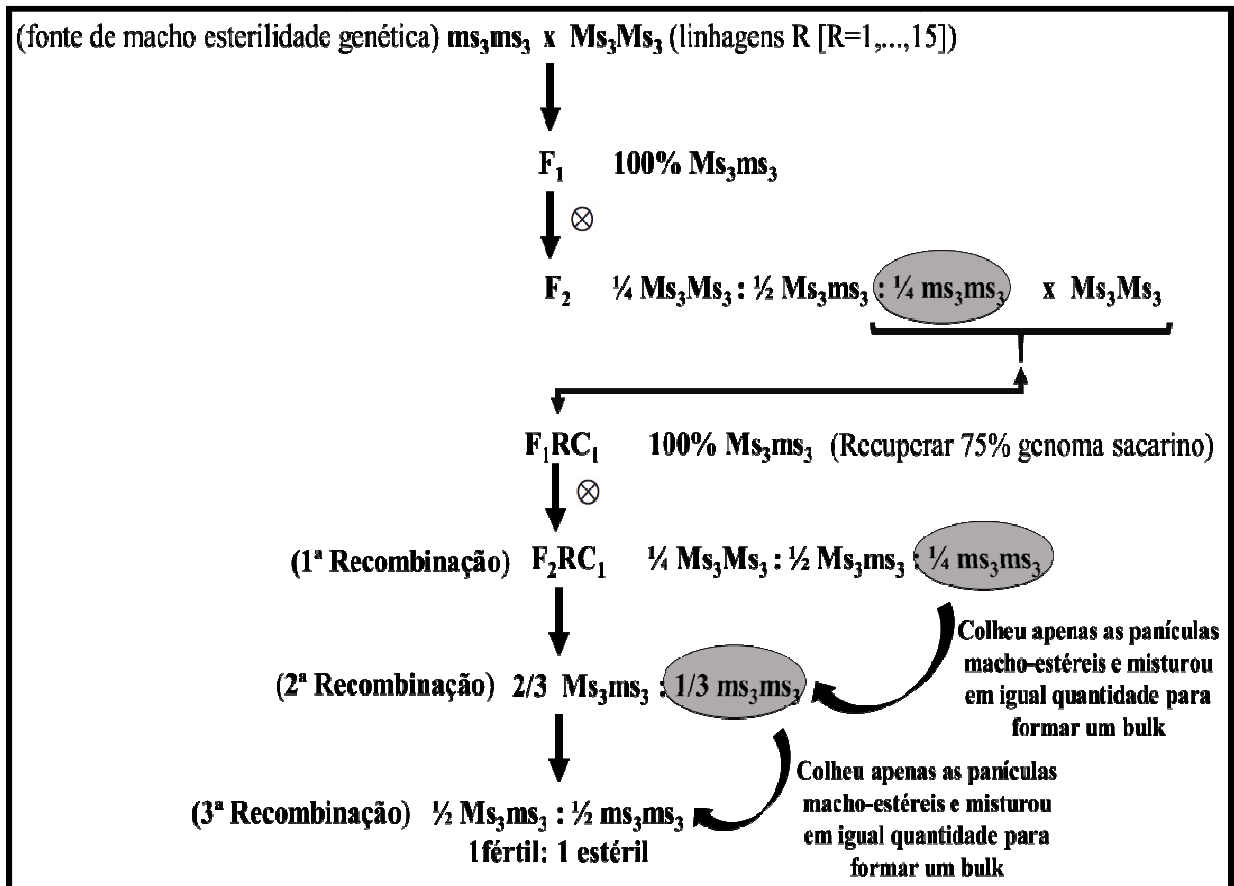
3.1. Progênies, plano experimental e condução

As progênies deste estudo foram oriundas do Programa de Seleção Recorrente em sorgo sacarino para aumento do rendimento em açúcares coordenado pela Embrapa Milho e Sorgo. O esquema empregado para a obtenção da população base do ciclo zero é apresentado por Parrella et al. (2016) e por Leite (2018) (Figura 1). A população do ciclo 1 (C1) foi obtida a partir da recombinação das 40 melhores progênies do ciclo 0 com base no rendimento em toneladas de brix por hectare (TBH).

O experimento de teste das progênies foi conduzido em área sob cultivo mínimo no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária, Fazenda Muquém da Universidade Federal de Lavras – UFLA, localizada no município de Lavras a uma altitude de 918 m, 21°14' Sul e 45°00' Oeste, precipitação média anual de 1530 mm e temperatura média anual de 20,4°C e solo Latossolo Vermelho-Amarelo com textura argilosa. O delineamento experimental foi o látice quadrado triplo 9x9, com parcela de uma linha de 3,0 m e espaçamento entre linhas de 60 cm. Foram testadas 40 progênies de meio-irmãos tomadas aleatoriamente das populações dos ciclos 0 e 1, além de uma testemunha.

O preparo da área experimental constituiu da dessecação em pré-semeadura das plantas daninhas com herbicida à base de glifosato e posterior roçagem da área. Posteriormente foi realizada a sulcagem e simultânea adubação de plantio (350 kg.ha⁻¹ da formulação NPK 8-28-16). A semeadura foi realizada manualmente no mês de novembro de 2017, no início do período chuvoso na região.

Figura 1– Esquema de obtenção da população-base do ciclo zero de seleção recorrente em sorgo sacarino.



Fonte: Parrella et al. (2016)

Cerca de 15 dias após a emergência das plântulas foi realizado o desbaste deixando-se oito plantas por metro linear e, portanto 24 plantas por parcela, de modo a atingir uma densidade de 140.000 plantas.ha⁻¹. A adubação de cobertura foi realizada aos 30 dias após a emergência mediante aplicação de 100 kg de N, utilizando o adubo ureia. O experimento foi conduzido em condições de sequeiro. O controle das plantas daninhas foi realizado mediante aplicação de herbicida à base de atrazina, utilizando-se dosagem de 3,0 kg de ingrediente ativo por hectare, complementado por capina manual. Os demais tratos culturais foram realizados todas as vezes que se fizeram necessários, a exemplo o controle fitossanitário. A colheita foi realizada aproximadamente aos 120 dias após a semeadura, mediante corte dos colmos a 3 - 5 cm da superfície do solo.

3.2. Caracteres avaliados

Foram mensurados os seguintes caracteres:

- i. Florescimento (FLOR) – número de dias desde o plantio até o momento em que 50% das plantas da parcela florescerem.
- ii. Altura de planta (ALT) – altura média (em metros) de seis plantas tomadas aleatoriamente da parcela, sendo medidas da superfície do solo ao ápice da panícula.
- iii. Produção de massa verde (PMV) – peso das plantas com panículas da parcela inteira mensurado por uma balança de suspensão digital, em kg. Os dados foram posteriormente convertidos em toneladas por hectare.
- iv. Extração de caldo (EXT) – porcentagem de caldo extraído calculado pela razão entre o peso do caldo extraído (g) e o peso dos colmos (g) de amostras aleatórias de seis plantas inteiras por parcela, sem panículas, moídas em moenda de cana para extração do caldo.
- v. Sólidos solúveis totais (SST) – determinado a partir do caldo extraído por meio de refratômetro digital de leitura automática, com correção automática de temperatura e resolução máxima de 0,1° Brix.
- vi. Tonelada de Brix por hectare (TBH) – determinado a partir da seguinte expressão:

$$TBH = PMV \times SST \times EXT.$$

3.3 Análise Estatística

Foram realizadas as análises univariada e multivariada via abordagem de modelos mistos. As análises foram realizadas com auxílio do pacote Sommer em ambiente R (R CORE TEAM, 2019; COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016). Na medida que o delineamento em látice apresentou baixa eficiência (<105%), as análises foram realizadas assumindo o delineamento em blocos completos casualizados.

As análises univariadas foram realizadas de acordo com o seguinte modelo misto na forma matricial:

$$y_t = X_t \beta_t + Z_t g_t + e_t,$$

em que: y_t é o vetor de dados fenotípicos da t-ésima característica; β_t é o vetor de efeitos fixos das repetições e dos ciclos somados à média geral; g_t é o vetor de efeitos das progênies, sendo $g_t \sim NMV(0, G_t)$. G_t é a matriz das covariâncias genéticas definida como: $G_t =$

$$\begin{bmatrix} I_{p0} \sigma_{g_{0t}}^2 & 0 \\ 0 & I_{p1} \sigma_{g_{1t}}^2 \end{bmatrix}, \text{ na qual } \sigma_{g_{0t}}^2 \text{ e } \sigma_{g_{1t}}^2 \text{ são as variâncias de progênies dos ciclos zero (C0) e}$$

um (C1) e p_0 e p_1 os número de progênes do C0 e C1, respectivamente. e_t é o vetor de erros, sendo $e_t \sim \text{NMV}(0, I_n \sigma_{e_t}^2)$ e $\sigma_{e_t}^2$ é a variância do erro e n o número de dados. X_t, Z_t são as matrizes de delineamento que associam os efeitos fixos e aleatórios ao vetor de dados y_t , respectivamente.

A análise multivariada envolvendo os seis caracteres mensurados foi realizada de acordo com o seguinte modelo misto multivariado:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{g} + \mathbf{e},$$

em que: \mathbf{y} é o vetor de dados fenotípicos empilhados dos caracteres $\mathbf{y}' = (\mathbf{y}'_1, \dots, \mathbf{y}'_6)$; $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de efeitos fixos das repetições e dos ciclos somados à média geral; \mathbf{g} é o vetor de efeitos das progênes, sendo $\mathbf{g} \sim \text{NMV}(\mathbf{0}, \mathbf{G})$. \mathbf{G} é a matriz das covariâncias genéticas definida como:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_0 & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_1 \end{bmatrix}, \text{ sendo } \mathbf{G}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{g_{01}}^2 & \cdots & \sigma_{g_{01}g_{06}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{g_{01}g_{06}} & \cdots & \sigma_{g_{06}}^2 \end{bmatrix} \otimes I_{p_0} \text{ e } \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \sigma_{g_{11}}^2 & \cdots & \sigma_{g_{11}g_{16}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{g_{11}g_{16}} & \cdots & \sigma_{g_{16}}^2 \end{bmatrix} \otimes$$

I_{p_1} as matrizes de covariâncias de progênes dos ciclos zero (C0) e um (C1), respectivamente.

\mathbf{e} é o vetor de erros, sendo $\mathbf{e} \sim \text{NMV}(0, \mathbf{R})$. \mathbf{R} é a matriz das covariâncias ambientais definida

$$\text{como: } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{e_1}^2 & \cdots & \sigma_{e_1e_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{e_1e_6} & \cdots & \sigma_{e_6}^2 \end{bmatrix} \otimes I_n. \text{ X, Z são as matrizes de delineamento que associam os}$$

efeitos fixos e aleatórios ao vetor de dados \mathbf{y} , respectivamente.

A partir das análises univariadas foram estimados a acurácia para seleção de progênes ($r_{\hat{g}g}$) (RESENDE; DUARTE, 2007) e o coeficiente de variação experimental (CVe). A significância das variâncias foi obtida pelo teste de Wald a 5% de probabilidade. Pela análise multivariada, foram estimadas as correlações genéticas entre os caracteres para cada ciclo da seleção recorrente e avaliadas as significâncias via *bootstrap* por meio do pacote wBoot em ambiente R (WEISS, 2016). Os correlogramas foram plotados mediante uso do pacote corrplot (WEI; SIMKO, 2007).

Foi obtida a representação gráfica biplot das médias BLUP (melhor predição linear não-tendenciosa) das progênes dos ciclos C0 e C1 para todos os caracteres mensurados por meio do pacote factoextra (KASSAMBARA; MUNDT; 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de acurácia e coeficiente de variação ambiental permitem inferir acerca da qualidade do experimento. Em geral os valores de acurácia demonstram que a precisão foi alta (>70%) (RESENDE; DUARTE, 2007), excetuando-se com maior destaque os valores baixos alcançados para o teor de sólidos solúveis totais (SST) em ambos os ciclos e tonelada de brix por hectares (TBH) no ciclo zero (C0) da seleção recorrente (Tabela 1). Neste caso, vale destacar que para o caráter SST, há uma alta variância ambiental e baixa variância genética, o que pode ter influenciado nos baixos valores da acurácia. Os valores do coeficiente de variação experimental (CVe) indicaram a maior estabilidade para os caracteres florescimento (FLOR) e altura da planta (ALT), enquanto os demais caracteres foram mais instáveis (Tabela 1). Alguns trabalhos também têm destacado o pronunciado efeito ambiental na expressão dos caracteres produção de massa verde (PMV), extração (EXT), SST e TBH em sorgo sacarino (TEIXEIRA et al., 1999; LOMBARDI et al., 2015; SOUZA et al., 2016).

Tabela 1 – Estimativas das variâncias genéticas entre progênies dos ciclos zero ($\sigma_{g_0}^2$) e 1 ($\sigma_{g_1}^2$), variância ambiental (σ_e^2), médias dos ciclos zero (\bar{y}_0) e 1 (\bar{y}_1), acurácia para seleção de progênies dos ciclos zero (r_{gg_0}) e 1 (r_{gg_1}) e do coeficiente de variação experimental (CVe) para florescimento (FLOR, dias), altura (ALT, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹), porcentagem de caldo extraído (EXT), teor de sólidos solúveis (SST, °Brix) e toneladas de brix por hectare (TBH).

Parâmetros	FLOR	ALT	PMV	EXT	SST	TBH
$\sigma_{g_0}^2$	8,23*	0,01 ^{ns}	63,49*	14,89*	0,42 ^{ns}	0,21*
$\sigma_{g_1}^2$	5,401*	0,02*	123,74*	24,35*	0,42 ^{ns}	0,84*
σ_e^2	4,41	0,04	99,17	64,91	5,06	1,56
\bar{y}_0	60,3	3,24	64,0	38,4	13,2	3,31
\bar{y}_1	61,4	3,34	71,5	39,3	13,2	3,82
r_{gg_0}	0,91	0,66	0,80	0,63	0,44	0,52
r_{gg_1}	0,86	0,75	0,88	0,72	0,44	0,77
CVe (%)	3,45	6,05	14,70	20,74	17,05	35,08

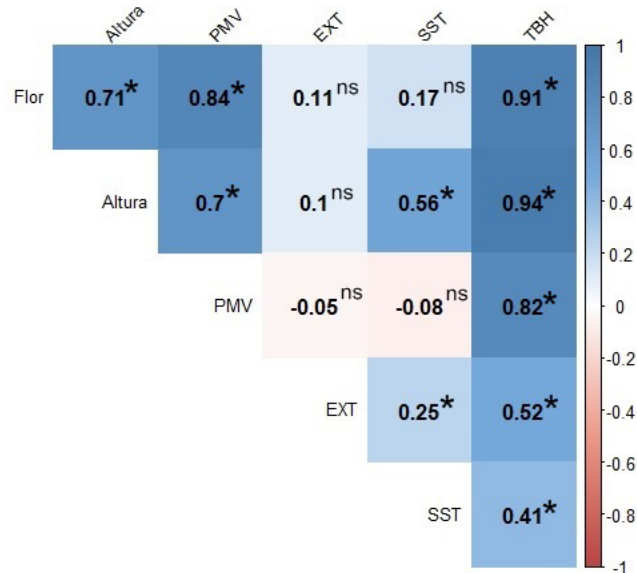
* e ^{ns} significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Wald a 5% de probabilidade.

A variância genética entre progênes de ambos os ciclos de seleção recorrente (C0 e C1) foi significativa ($P < 0,05$) para quase todos os caracteres avaliados, com exceção da altura (ALT) no C0 e o teor de sólidos solúveis totais no caldo (SST) em ambos os ciclos (Tabela 1). A existência de variabilidade genética é uma condição básica para se obter ganhos com a seleção em programas de melhoramento (FALCONER; MACKAY, 1996).

No melhoramento de sorgo sacarino tem-se a produção de etanol de primeira geração como o caráter principal, o qual está relacionado ao processo de fermentação do caldo sacarino (MASSON et al., 2015). Segundo May (2013), o teor mínimo de SST para uma produção viável de etanol é de 14,5° Brix. Para as progênes testadas de ambos os ciclos, os valores médios alcançados foram inferiores a este valor. Dessa forma, estratégias de melhoramento devem ser adotadas pelo melhorista de forma a ampliar a variabilidade genética no sentido de aumentar o ganho em SST. Leite (2018) sugeriu, neste caso, fazer a introdução de linhagens sacarinas com maiores valores de SST nas próximas recombinações do programa de seleção recorrente.

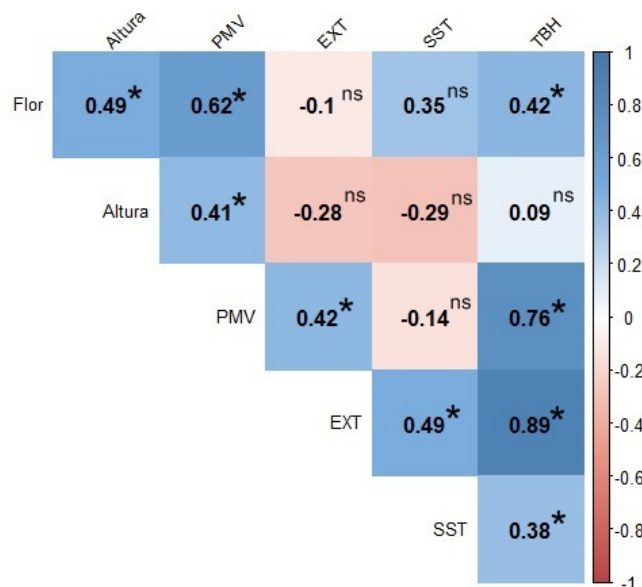
O programa de seleção recorrente intrapopulacional (SRI) no presente trabalho objetiva o aumento do rendimento de açúcares, sendo que a seleção das progênes no C0 da seleção recorrente foi realizada com base no TBH (LEITE, 2018). A SRI preconiza a melhoria da média populacional e a simultânea manutenção da variância genética ao longo dos ciclos (RAMALHO et al., 2012). Contudo, ao se praticar a seleção para TBH, por ser um índice natural formado a partir dos caracteres PMV, SST e EXT, pode-se impactar nas correlações genotípicas entre os caracteres. De modo geral, o padrão de associação dos caracteres foi similar nos ciclos C0 e C1 (Figura 2 e 3). Alteração expressiva foi observada com relação às menores magnitudes de correlações genotípicas no C1. Além disso, outras alterações marcantes ocorreram nos valores das correlações genotípicas entre ALT e SST e entre ALT e TBH (Figuras 2 e 3), porém como a variância genética para ALT não foi significativa no ciclo C0, a estimativa obtida neste ciclo pode ser espúria.

Figura 2 – Correlações genóticas entre caracteres avaliados no ciclo 0 de seleção recorrente em sorgo sacarino. *^{ns} – significativo e não significativo a 5% de probabilidade pelo método *bootstrap* com 9999 repetições.



Fonte: Do autor (2019)

Figura 3 – Correlações genóticas entre caracteres avaliados no ciclo 1 de seleção recorrente em sorgo sacarino. *^{ns} – significativo e não significativo a 5% de probabilidade pelo método *bootstrap* com 9999 repetições.



Fonte: Do autor (2019)

O conhecimento das correlações genóticas entre caracteres pode ser utilizado para fins de seleção indireta, pois este tipo de correlação é devido a genes ligados e/ou pleiotrópicos (FALCONER; MACKAY, 1996). Em estudos realizados por Lombardi et al.

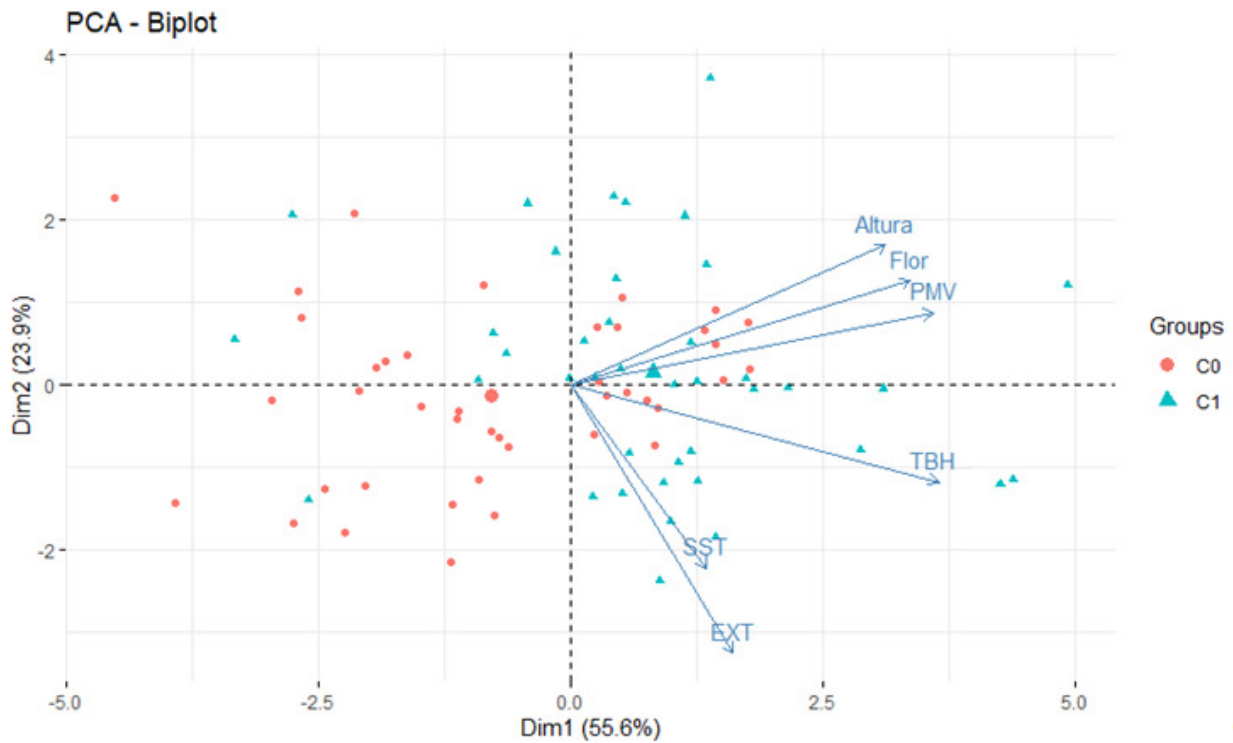
(2015) e Leite et al. (2017) é relatado a elevada associação existente entre TBH e o rendimento de etanol, indicando a possibilidade de uso do TBH para fins de seleção indireta para rendimento de etanol. No presente estudo, é importante destacar que o TBH apresentou correlações positivas e significativas para todos os caracteres avaliados, com exceção da ALT no ciclo 1 (Figuras 2 e 3), sendo mais fortemente e consistentemente correlacionado com o PMV em ambos os ciclos (Figuras 2 e 3). Alguns estudos também têm apontado a elevada associação existente entre PMV e TBH, do que com outras características em sorgo sacarino (FRANÇA et al., 2016; LOMBARDI, et al., 2015; LEITE, et al., 2017). Por outro lado, Teixeira et al. (2017) verificou, que dentre os componentes do TBH, a variável SST foi a que apresentou maior correlação positiva. Este relato difere do que foi observado neste trabalho, em que SST apresentou a menor correlação positiva com o TBH dentre seus componentes, o que pode estar associado com a baixa variação genética para SST (Tabela 1).

Ritter et al. (2008) observaram que a altura da planta está correlacionada positivamente com os teores de açúcar no colmo. Essa correlação só foi observada neste trabalho no ciclo 0, em que altura e SST apresentaram correlação de 0,56 (Figura 2), enquanto no ciclo 1 essa correlação não foi significativa (Figura 3). Por outro lado, Burks et al. (2015) e Shukla et al. (2017) observaram que a altura da planta está diretamente correlacionada à produção de biomassa e dias até o florescimento, sendo que plantas mais altas tendem a possuir maior peso de massa verde e serem mais tardias, assim como observado nesse estudo nos dois ciclos de seleção recorrente (Figuras 2 e 3).

Concernente ao florescimento, o objetivo tem sido direcionado para a obtenção de progênies mais precoces. Como o acúmulo de açúcares no colmo se inicia com o florescimento (GUTJAHR et al., 2013), é desejável que as plantas de sorgo sacarino atinjam a maturidade mais cedo, de forma que permaneçam menos tempo no campo para evitar estresses bióticos e abióticos (LEITE, 2018). Contudo, trabalhos anteriores corroboram ao encontrado no presente trabalho em que a seleção de progênies de sorgo sacarino com maiores valores de TBH apresentaram-se mais tardias (FAGUNDES, 2014; LEITE, 2018). Isso pode ser explicado pela correlação positiva entre florescimento e PMV, em que quanto mais tardia é a planta, mais ela acumula matéria verde, um dos componentes do TBH.

Uma visão geral das correlações genotípicas entre os caracteres e do perfil das progênies dos ciclos C0 e C1 pode ser observado na representação biplot dos escores dos primeiros componentes principais que explicaram 79,5% da variância total observada (Figura 4).

Figura 4 – Biplot dos escores dos dois primeiros componentes principais das médias BLUP das progênies dos ciclos 0 e 1 da seleção recorrente em sorgo sacarino para os caracteres avaliados.



Fonte: Do autor (2019)

É possível verificar pelo perfil das progênies que houve um aumento das médias do ciclo 0 para o ciclo 1 de seleção recorrente, uma vez que as progênies do ciclo 1 se concentraram predominantemente à direita do gráfico, no sentido dos vetores dos caracteres; enquanto os genótipos do ciclo 0 se situaram mais à esquerda (Figura 4). É possível perceber que este ganho com a seleção se deu principalmente nos caracteres FLOR, ALT, PMV e, sobretudo, TBH. Por outro lado, os caracteres EXT e SST não mostraram ganhos expressivos. Pelo biplot, nota-se ainda que, considerando conjuntamente as progênies dos dois ciclos, os caracteres ALT, FLOR e PMV se mostram altamente correlacionados, o que corrobora o descrito pelas correlações genóticas estimadas (Figuras 2 e 3). Pelo biplot, é possível ainda proceder a seleção de progênies do ciclo 1 mais promissoras para dar continuidade ao programa de seleção recorrente de acordo com os perfis observados e com o almejado pelo melhorista.

6 CONCLUSÕES

Houve variabilidade genética entre as progênies para a maioria dos caracteres mensurados nos dois ciclos de seleção recorrente intrapopulacional para aumento do rendimento de açúcares em sorgo sacarino, com exceção do teor de sólidos solúveis totais. Além disso, em geral, o padrão das correlações genótípicas entre os caracteres ao longo dos dois ciclos foi similar. A descrição dos perfis das progênies dos dois ciclos com os caracteres mensurados pelo biplot permitiu verificar que houve ganho para rendimento de açúcares, contudo mais fortemente relacionado ao maior tempo para florescimento, maior altura e maior produção de biomassa.

REFERÊNCIAS

- BELAYACHI, L.; DELMAS, M. Sweet sorghum: a quality raw material for the manufacturing of chemical paper pulp. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 6, p. 411-417, 1995.
- CARVALHO, S.P.; CRUZ, C.D. Diagnosis of multicollinearity: assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Brazilian Journal of Genetics**, Ribeirão Preto, v. 19, p. 479 – 484. Set 1996.
- CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013.
- CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV. 579 p. 2006.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: Ed. UFV. v.1, 2012. 514 p.
- COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome-Assisted Prediction of Quantitative Traits Using the R Package sommer. *Plos One*, jun 2016. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0156744>>.
- DINIZ, G. M. M. **Produção de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)**: Aspectos gerais. 2010. p. 23. Dissertação (mestrado) – UFRPE, Recife, 2010.
- DOGGETT, H. EBERHART, S. A. Recurrent selection in sorghum. **Crop Science**, v. 8, p. 119-120, 1968.
- EMYGDIOS, B. M. Produção de etanol a partir de sorgo sacarino. **Infobios**. 2010. Disponível em: <http://www.infobios.com/Artigos/2010_4/sorgo/index.htm>. Acesso em: 30/1/2019.
- FAGUNDES, T.G. Seleção de genótipos de sorgo sacarino baseado em múltiplos caracteres agroindustriais. Monografia (Bacharel em Agronomia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. 4. ed. Edinburgh? Longman Group Limited, 1996, 464 p.
- FEHR, W. R. **Principles of cultivar development: theory and technique**. Ames: Iowa State University, 1993. 536 p.
- GUTJAHR, S. et al. Grain, sugar and biomass accumulation in photoperiod-sensitive sorghums. **Functional Plant Biology**, n.40, p. 355-368.
- HENDERSON, C. R.; QUAAS, R. L. Multiple trait evaluation using relatives' records. **Journal of Animal Science**, v. 45, n. 6, p. 1188-1197, 1976.
- JONKER, J. G. G. et al. Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies. **Applied Energy**, v. 147, p. 593-610, jan 2015.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra**: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.5. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos avançados**, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

KUMAR, C. G. et al. Characterization of improved sweet sorghum genotypes for biochemical parameters, sugar, yield and its attributes at different phenological stages. **Sugar Tech**, v. 12, p. 322-328, sept./dec. 2010.

LEITE, P. S. S. et al. Association among agro-industrial traits and simultaneous selection in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2017.

LEITE, P. S. S. **Seleção recorrente em sorgo sacarino visando aumento no rendimento de açúcares**. 2018. 87 p. Tese (Doutorado em genética e melhoramento de plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

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

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. Cultivo do Sorgo. **Sistemas de Produção**, v. 2, ed. 4, set. 2008.

MASSON, I. S. et al. Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.45, n.9, p. 1697-1700, set 2015.

MAY, A. et al. Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais. **Circular técnica**. Sete Lagoas MG, n. 186, ed. 14, set 2013.

NEGRO, M. J. et al. Composting of sweet sorghum bagasse with other wastes. **Bioresource Technology**, v.67, n. 1, p. 89-92, jan. 1999.

PARRELLA, R. A. C. et al. Desenvolvimento de Populações de Sorgo Sacarino de Cruzamento ao Acaso para Seleção Recorrente Intrapopulacional. **Circular técnica**, n. 217, p. 1-7, 2016.

PRASAD, S. et al. Ethanol Production from Sweet Sorghum Syrup for Utilization as Automotive Fuel in India. **Energy & Fuels**, v. 21, p. 2415-2420, 2007.

PURCINO, A. A. C. Sorgo sacarino na Embrapa: histórico, importância e usos. **Agroenergia: Sorgo sacarino: Tecnologia agrônômica e industrial para alimentos e energia**, Brasília DF, ed. 3, p. 6, ago 2011.

R Core Team (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da Genética Quantitativa no Melhoramento de Plantas Autógamas**. Lavras: Ed. UFLA, 2012, 522 p.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182–194, 2007.

REZENDE, M. L.; RICHARDSON, J. W. Risk analysis of using sweet sorghum for ethanol production in south eastern Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 100-107, dez 2016.

SILVA, M. J. et al. Phenotypic and molecular characterization of sweet sorghum accessions for bioenergy production. **PLoS ONE**, v. 12, ago 2017.

SOUZA, R. S. et al. Maturation curves of sweet sorghum genotypes. **Ciência e Agrotecnologia**, v.40, p.46-56, fev 2016.

TEIXEIRA, C.G. et al. Influência da época de corte sobre o teor de açúcares de colmos de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília. 1999. n.34, p. 1601-1606.

TEIXEIRA, T.P.M. Estudo da maturação e ponto de colheita em materiais de sorgo destinados à bioenergia. 2017. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

WEI, T.; SIMKO, V. R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). 2017. Disponível em: <https://github.com/taiyun/corrplot>

WEISS, N.A. **wBoot**: Bootstrap Methods. R package version 1.0.3. 2016. <https://CRAN.R-project.org/package=wBoot>.

WU, X. et al. Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. **Industrial Crops and Products**, v. 31, p. 167-170, out 2010.