

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E
MUCURI – UFVJM

PAULO SÉRGIO CARDOSO BATISTA

TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM SORGO GRANÍFERO

DIAMANTINA - MG
2018

PAULO SÉRGIO CARDOSO BATISTA

TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM SORGO GRANÍFERO

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Produção Vegetal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, área de concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador: Prof. Dr. José Sebastião Cunha
Fernandes

Coorientador: Dr. Cicero Beserra de Menezes

DIAMANTINA - MG
2018

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B333t

Batista, Paulo Sérgio Cardoso

Tolerância ao estresse hídrico em sorgo granífero / Paulo Sérgio Cardoso Batista, 2018.

90 p. : il.

Orientador: José Sebastião Cunha Fernandes

Coorientador: Cicero Beserra de Menezes

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

1. Sorgo. 2. Restrição hídrica. 3. Tolerância à seca.
3. Grãos – Rendimento. I. Fernandes, José Sebastião Cunha.
II. Menezes, Cicero Beserra de. III. Título. IV. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

CDD 633.1

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecário Anderson César de Oliveira Silva, CRB6 – 2618.

PAULO SÉRGIO CARDOSO BATISTA

TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM SORGO GRANÍFERO

Tese apresentada ao DOUTORADO
EM PRODUÇÃO VEGETAL, nível de
DOUTORADO como parte dos
requisitos para obtenção do título de
DOUTOR EM PRODUÇÃO VEGETAL

Orientador (a): Prof. Dr. Jose
Sebastiao Cunha Fernandes
Co-orientador: Cicero Bezerra
Menezes

Data da aprovação : 30/11/2018


Prof.Dr. JOSE SEBASTIAO CUNHA FERNANDES - UFVJM


Dr. CICERO BEZERRA MENEZES - EMBRAPA


Prof.Dr. ANDRE CABRAL FRANÇA - UFVJM


Prof.Dr. JOSE BARBOSA DOS SANTOS - UFVJM


Dr. PAULO CESAR MAGALHAES - EMBRAPA

DIAMANTINA

OFEREÇO

A Deus, pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado, me guiando com saúde e perseverança. Aos meus pais pelo amor e compreensão. A minha noiva pelo amor, companheirismo e ajuda nos momentos mais importantes. A todos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, pelo Dom da vida, por me dar saúde e a oportunidade de concluir mais esta etapa em minha vida;

Aos meus pais, Geraldina Aparecida Cardoso e Odilom Batista da Silva, e aos meus irmãos, Marcos Luan, Odilom Júnior e Luciane, pelo imenso amor e apoio em todos os momentos. A vocês os meus mais sinceros e profundos agradecimentos;

À minha noiva Luanna Vanessa de Souza Cangussú, pelo amor, companheirismo, amizade, ajuda e apoio em todos os momentos. Agradeço também à sua família pela receptividade que tive, bem como pelo grande apoio que recebi;

Aos meus avós paternos e maternos, tios, padrinhos e primos, pelos conselhos, ajuda, amizade. Sou muito grato a todos vocês, pois sempre estão do meu lado me apoiando;

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pela oportunidade concedida para realização do doutorado;

À EMBRAPA Milho e Sorgo, pela oportunidade de desenvolvimento dos experimentos e utilização dos equipamentos que foram fundamentais para finalizar com êxito todos os experimentos;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudo;

Ao meu orientador José Sebastião Cunha Fernandes, pelos ensinamentos, paciência, conselhos e confiança, imprescindíveis para a conclusão do doutorado;

Ao meu coorientador Cicero Beserra de Menezes, pelos ensinamentos, amizade e confiança depositada para condução dos experimentos desde o mestrado até o doutorado;

Aos pesquisadores da EMBRAPA Milho e Sorgo, Arley Figueiredo Portugal e Paulo César Magalhães, pela ajuda durante a condução dos experimentos;

Aos professores André Cabral França e José Barbosa dos Santos, pelas sugestões apresentadas e disponibilidade;

Aos professores da UFVJM, pelos ensinamentos durante a realização do curso;

Aos professores da Escola Estadual Núcleo Colonial Vale do Urucuia, do IFNMG – Campus Janaúria e da UNIMONTES - Campus Janaúba. Vocês foram minha base para chegar até esse nível acadêmico;

Aos funcionários e estagiários da EMBRAPA Milho e Sorgo de Nova Porteirinha-MG e Sete Lagoas-MG, pela ajuda fundamental na condução e avaliação dos experimentos da minha Tese;

Aos pesquisadores Edson Alves Bastos e Milton José Cardoso, responsáveis pela condução dos ensaios em Teresina-PI.

Ao professor Anderson pelo auxílio em análises cruciais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus grandes e valiosos amigos, em especial Carlos Henrique, Márcio Marques, Igor, Luan e Jomas pelo apoio que me deram em um momento muito importante;

A Dona Titita, Sr. Jorge, Ildevan e Família que me acolheram no momento mais difícil do doutorado. Vocês foram fundamentais para minha continuidade no curso.

A todos aqueles de quem, no momento, não me recordei, mas que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho,

Muito Obrigado!

RESUMO

PAULO SÉRGIO CARDOSO BATISTA. **Tolerância ao estresse hídrico em sorgo granífero**. 2018. 90p. (Tese - Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é o quinto cereal mais importante do mundo, apresentando importância na alimentação humana e produção de rações para animais em várias regiões do planeta. O estresse hídrico é um dos maiores problemas para a agricultura mundial, pois provoca danos significativos ao desenvolvimento das plantas. Dessa forma torna-se muito importante a realização de trabalhos para seleção de genótipos tolerantes ao estresse hídrico. Este trabalho teve como objetivo selecionar híbridos de sorgo granífero para tolerância ao estresse hídrico, buscando determinar o comportamento das plantas de sorgo sob estresse hídrico, bem como selecionar características que auxiliem na seleção dos genótipos mais tolerantes. O trabalho foi instalado em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI. Foram avaliados 20 híbridos de sorgo granífero em ambientes sem estresse hídrico e com estresse hídrico em pré e pós-florescimento. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três repetições. O estresse hídrico provoca redução nos parâmetros de crescimento do sorgo, com conseqüente redução no rendimento de grãos. O estresse hídrico pós-florescimento causa maior redução na produtividade de grãos de sorgo do que o estresse hídrico pré-florescimento. Os híbridos mais produtivos nos ambientes com e sem estresse hídrico são 1G 282 e A9904. O índice de colheita de panícula, a massa de mil grãos e o índice de área foliar fotossinteticamente ativa podem ser utilizados para auxiliar na seleção de genótipos de sorgo para produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; restrição hídrica; tolerância à seca; rendimento de grãos.

ABSTRACT

PAULO SÉRGIO CARDOSO BATISTA. **Tolerance to water stress in grain sorghum.** 2018. 90p. (Thesis in Plant Production) – Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valley, Diamantina, 2018.

Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) is the fifth most important cereal in the world, with importance mainly in human food and animal feed production in various regions of the world. Water stress is one of the biggest problems for world agriculture, as it causes significant damage to the development of plants. Thus, it is important to carry out studies to select genotypes tolerant to water stress. The objective of this work was to carry out the phenotypic selection of sorghum genotypes for tolerance to water stress, in order to determine the behavior of sorghum plants under water stress, as well as to select characteristics that aid in the selection of the most tolerant genotypes. The work was installed in Nova Porteirinha-MG and Teresina-PI. Twenty hybrids of sorghum were evaluated in environments without water stress and with water stress in pre and post flowering. The experimental design was a randomized complete block design, with three replications. Water stress causes reduction in sorghum growth parameters, with a consequent reduction in grain yield. Post-flowering water stress causes a greater reduction in sorghum grain yield than pre-flowering water stress. The most productive hybrids in environments with and without water stress are 1G 282 and A9904. The panicle harvest index, the mass of a thousand grains and the leaf area index can be used to aid the selection of sorghum genotypes for grain yield.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, water restriction, drought tolerance, grain yield.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO I. Estresse hídrico em sorgo granífero nos estádios de pré e pós-florescimento		Pág.
Figura 1	Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima (°C), durante o período de condução do experimento em Nova Porteirinha-MG, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).	20
Figura 2	Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima (°C), durante o período de condução do experimento em Teresina-PI, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).	20
Figura 3	Análise Boxplot para altura de planta (a), número de dias para o florescimento (b), massa de mil grãos (c) e rendimento de grãos (d) de vinte híbridos de sorgo avaliados nos ambientes: TSE: Teresina-PI, sem estresse hídrico; TPOS: Teresina-PI, com estresse hídrico pós-florescimento; NPSE: Nova Porteirinha-MG, sem estresse hídrico; NPPRE: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pré-florescimento; NPPOS: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pós-florescimento.	24
Figura 4	Setores e mega-ambientes obtidos pelo modelo GGE biplot para a produtividade de grãos de 20 genótipos de sorgo granífero avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.	28
Figura 5	Média <i>versus</i> estabilidade segundo o modelo GGE Biplot para a produtividade de grãos de 20 genótipos de sorgo granífero avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.	29
Figura 6	Classificação de 20 genótipos de sorgo granífero segundo o modelo GGE Biplot com base na produtividade de grãos avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.	30
ARTIGO CIENTÍFICO II. Crescimento de híbridos de sorgo granífero sob estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento da planta		
Figura 1	Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima (°C), durante o período de condução do experimento em Nova Porteirinha-MG, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).	40
Figura 2	Altura de plantas (a), índice de área foliar fotossinteticamente ativa - IAF (b), massa seca da parte aérea - MSPA, (c) e índice SPAD (d) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—), e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento ("""). Nova Porteirinha-MG, 2018.	43

Figura 3	Taxa de crescimento absoluto - TCA (a) e taxa de crescimento relativo - TCR (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento ("""). Nova Porteirinha-MG, 2018.	46
Figura 4	Razão de área foliar - RAF (a) e razão de massa foliar - RPF (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento ("""). Nova Porteirinha-MG, 2018.	46
Figura 5	Área foliar específica - AFE (a) e taxa assimilatória líquida - TAL (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento ("""). Nova Porteirinha-MG, 2018.	48
Figura 6	Produtividade de grãos em híbridos de sorgo cultivados sob três condições de água (sem estresse hídrico, estresse hídrico pré-florescimento e estresse hídrico pós-florescimento). Nova Porteirinha-MG, 2018.	49
 ARTIGO CIENTÍFICO III. Correlação e análise de trilha em sorgo granífero na presença e ausência de estresse hídrico		
Figura 1	Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima (°C), nos anos de 2014, 2015 e 2017, em Nova Porteirinha-MG (Fonte: INMET, 2018).	57
Figura 2	Relação entre os 10 caracteres agrônômicos pelo modelo GGE biplot de 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados nas condições sem estresse hídrico (a) e com estresse hídrico (b), nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	62
 ARTIGO CIENTÍFICO IV. Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico		
Figura 1	Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C), nos anos de 2014, 2015 e 2017, em Nova Porteirinha-MG (Fonte: INMET, 2018).	71
Figura 2	Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2014, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.	81
Figura 3	Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2015, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.	82
Figura 4	Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2017, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.	82

- Figura 5 Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2014. 83
- Figura 6 Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2014. 84
- Figura 7 Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2014. 84

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO I. Estresse hídrico em sorgo granífero nos estádios de pré e pós-florescimento		Pág.
Tabela 1	Altura de plantas, dias para o início do florescimento, massa de mil grãos e produtividade de grãos de 20 híbridos de sorgo granífero, em cinco ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.	25
Tabela 2	Média da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 20 híbridos de sorgo granífero, cultivados em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.	26
Tabela 3	Porcentagens individual (PI) e acumulada (PA) da soma de quadrados da interação ($\text{SQ}_{\text{G} \times \text{A}}$) associada aos cinco primeiros componentes principais (PC), estimados por análise GGE Biplot para produtividade de grãos em sorgo, em ambientes com e sem estresse hídrico.	27
ARTIGO CIENTÍFICO III. Correlação e análise de trilha em sorgo granífero na presença e ausência de estresse hídrico		
Tabela 1	Coeficiente de correlação fenotípica entre os caracteres agronômicos, em 16 genótipos de sorgo granífero, nas condições sem estresse hídrico (acima da diagonal) e com estresse hídrico (abaixo da diagonal), em 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	59
Tabela 2	Estimativas dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres explicativos sobre a produtividade de grãos da análise de trilha com 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados na condição com estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	63
Tabela 3	Estimativas dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres explicativos sobre a produtividade de grãos da análise de trilha com 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados na condição sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	64
ARTIGO CIENTÍFICO IV. Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico		
Tabela 1	Índices de seleção para tolerância à seca e fórmulas. Nova Porteirinha-MG, 2018.	73
Tabela 2	Análise de variância conjunta para o rendimento de grãos de genótipos de sorgo, em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	74

Tabela 3	Análise de variância do rendimento de grãos, nos ambientes com e sem estresse hídrico e dos índices de seleção para tolerância à seca, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.	75
Tabela 4	Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2014. Nova Porteirinha-MG.	77
Tabela 5	Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2015. Nova Porteirinha-MG.	78
Tabela 6	Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2017. Nova Porteirinha-MG.	79

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ARTIGO CIENTÍFICO I. Estresse hídrico em sorgo granífero nos estádios de pré e pós-florescimento	16
1 Resumo.....	16
2 Abstract.....	17
3 Introdução.....	18
4 Material e métodos.....	19
5 Resultados	23
6 Discussão	30
7 Conclusões	33
8 Agradecimentos.....	33
9 Referências bibliográficas	33
ARTIGO CIENTÍFICO II. Crescimento de híbridos de sorgo granífero sob estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento da planta	36
1 Resumo.....	36
2 Abstract.....	37
3 Introdução.....	38
4 Material e métodos.....	39
5 Resultados e discussão.....	42
6 Conclusões.....	50
7 Agradecimentos.....	50
8 Referências bibliográficas	50
ARTIGO CIENTÍFICO III. Correlação e análise de trilha em sorgo granífero nas condições com e sem estresse hídrico	53
1 Resumo.....	53
2 Abstract.....	54
3 Introdução.....	55
4 Material e métodos.....	55
5 Resultados e discussão.....	58
6 Conclusões.....	65
7 Agradecimentos.....	66
8 Referências bibliográficas	66
ARTIGO CIENTÍFICO IV. Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico	68
1 Resumo.....	68
2 Abstract.....	69
3 Introdução.....	70
4 Material e métodos.....	71
5 Resultados e discussão.....	74
6 Conclusões.....	85
7 Agradecimentos.....	85
8 Referências bibliográficas	85

INTRODUÇÃO GERAL

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é o quinto cereal mais importante no mundo, ficando atrás apenas do trigo, arroz, milho e cevada, possuindo grande importância na alimentação humana e animal em várias regiões do planeta (FAO, 2016). A produção brasileira na safra 2017/18 foi de 2,136 milhões de toneladas, em uma área de 782,2 mil hectares, com rendimento médio de 2.731 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

Os estresses abióticos, dentre eles o estresse hídrico, ameaçam a disponibilidade global de alimentos, pois causam redução drástica no crescimento e rendimento das culturas (XIONG et al., 2006), por ocasionar danos nos processos fisiológicos e metabólicos em todas as fases de desenvolvimento das plantas (TAIZ et al., 2017).

Para reduzir as perdas na produtividade ocasionadas pelo estresse hídrico e possibilitar o cultivo em regiões com baixa disponibilidade hídrica, é de grande importância a utilização de culturas tolerantes, como o sorgo. A boa adaptação do sorgo ao cultivo em ambientes com baixa disponibilidade hídrica está associada ao seu sistema radicular denso e profundo, a capacidade de reduzir a transpiração através do enrolamento foliar e fechamento estomático e pela capacidade de reduzir o seu metabolismo durante o período de deficiência hídrica (REDDY et al., 2009; LANDAU; SANS, 2012).

Contudo, mesmo sendo um dos cereais mais tolerantes à seca, sob forte restrição hídrica, o sorgo pode sofrer danos significativos durante o desenvolvimento (REDDY et al., 2011). O desequilíbrio da disponibilidade de água em diferentes estádios de crescimento da planta afeta diretamente o rendimento do sorgo, pois interfere em vários processos fisiológicos da planta (ALI et al., 2011). A magnitude dos efeitos da restrição hídrica depende muito da sua intensidade, duração e, principalmente, do estágio de desenvolvimento da cultura em que ocorre (PRASAD et al., 2008).

Os impactos ocasionados pela seca no sorgo podem ser reduzidos pelo melhoramento genético para tolerância ao estresse hídrico, com base na variabilidade genética que essa espécie apresenta (ROSENOW; DAHLBERG, 2000).

Para seleção de genótipos de sorgo tolerantes ao estresse hídrico deve-se considerar a imprevisibilidade do ambiente durante o cultivo. Dessa forma, é de grande importância a avaliação em diferentes ambientes para possibilitar a identificação dos genótipos mais adaptados e estáveis. Além disso, de acordo com Menezes et al. (2015) e Batista et al.

(2017), a interação entre genótipos e ambientes (GxA) assume importante papel na manifestação fenotípica do caráter tolerância à seca em sorgo.

O objetivo deste estudo foi selecionar híbridos de sorgo granífero para tolerância ao estresse hídrico, buscando determinar o comportamento das plantas de sorgo sob estresse hídrico, bem como selecionar características que auxiliem na seleção dos genótipos mais tolerantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M. A.; ABBAS, A.; AWAN, S. I.; JABRAN, K.; GARDEZI, D. A. S. Correlated response of various morpho-physiological characters with grain yield in sorghum landraces at different growth phases. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 21, n. 4, p. 671-679, 2011.

BATISTA, P. S. C.; MENEZES, C. B.; CARVALHO, A. J.; PORTUGAL, A. F.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; SANTOS, C. V.; JULIO, M. P. M. Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n. 3, p. 1-12, 2017.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 5, Safra 2017/18, n.12. Décimo Segundo Levantamento, Brasília, 2018. 148 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A. **Clima**. In: RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). Cultivo do sorgo. 8. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Sistema de produção, 2).

MENEZES, C. B.; RIBEIRO, A. S.; TARDIN, F. D.; CARVALHO, A. J.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; PORTUGAL, A. F.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V.; ALMEIDA, F. H. L. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo em ambientes com e sem restrição hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.1, p. 101-115, 2015.

PRASAD, P. V. V.; PISIPATI, S. R.; MUTAVA, R. N.; TUINSTRA, M. R. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. **Crop Science**, v. 48, p. 1911- 1917, 2008.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S.; KUMAR, A. A. Genetic enhancement for drought tolerance in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 31, p. 189-222, 2009.

REDDY, B. V. S.; KUMAR A. A.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. **Sorghum genetic enhancement for climate change adaptation**. In: Crop Adaptation to Climate Change. 1 ed. (YADAV, S. S. et al., eds.). Wiley-Blackwell, Oxford, 2011.

ROSENOW, D. T.; DAHLBERG, J. A. Collection, conversion and utilization of sorghum. In: SMITH, C.W.; FREDERIKSEN, R. A. (Eds.). **Sorghum: Origin, History, Technology and Production**. New York, USA, 2000. p. 309–328.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 5. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

XIONG, L.; WANG, R.; MAO, G.; KOCZAN, J. M. Identification of drought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid. **Plant Physiol**, v. 142, p. 1065-1074, 2006.

ARTIGO CIENTÍFICO I

ESTRESSE HÍDRICO EM SORGO GRANÍFERO NOS ESTÁDIOS DE PRÉ E PÓS-FLORESCIMENTO

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do estresse hídrico em pré e pós-florescimento no sorgo granífero e verificar a adaptabilidade e estabilidade de híbridos de sorgo granífero, por meio da análise GGE Biplot. Foram conduzidos ensaios em cinco ambientes, três ambientes em Nova Porteirinha-MG (sem estresse hídrico, com estresse hídrico em pré-florescimento e com estresse hídrico em pós-florescimento) e dois ambientes em Teresina-PI (sem estresse hídrico e com estresse hídrico em pós-florescimento). Os tratamentos constaram de 20 híbridos comerciais de sorgo granífero. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. As características avaliadas foram altura de plantas, número de dias para o florescimento, massa de mil grãos e produtividade de grãos. Os dados foram submetidos à análise de variância individual e conjunta. Como a interação genótipo x ambientes para produtividade foi significativa realizou-se a análise de adaptabilidade e estabilidade pelo método GGE Biplot. O estresse hídrico pré-florescimento reduziu principalmente a altura de plantas. O estresse hídrico pós-florescimento afetou principalmente a massa de grãos. O estresse hídrico após o florescimento causa maior redução na produtividade de grãos de sorgo granífero. Os híbridos mais produtivos nos ambientes com e sem estresse hídrico são 1G 282 e A9904.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, estresse abiótico, tolerância à seca, interação genótipo x ambientes, rendimento de grãos.

HYDRICAL STRESS IN GRAIN SORGHUM IN PRE-AND POST-FLOWERING STADIUMS

2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effects of pre and post-flowering water stress in the sorghum and to verify the adaptability and stability of sorghum hybrids by means of GGE Biplot analysis. The trials were conducted in five environments , three environments in Nova Porteirinha-MG (no water stress, pre-flowering water stress and post-flowering water stress) and two environments in Teresina-PI (no water stress and post-flowering water stress). The treatments consisted of 20 commercial hybrids of grain sorghum (G). The experimental design was a randomized block design, with four replicates. The characteristics evaluated were plant height, number of days for flowering, one thousand grain mass and grain yield. Data were submitted to individual and joint analysis of variance. As the genotype x environments interaction for productivity was significant, the adaptability and stability analysis was performed by the GGE Biplot method. Pre-flowering water stress mainly reduced plant height. Post-flowering water stress mainly affected the grain mass. Water stress after flowering causes greater reduction in grain yield of sorghum. The most productive hybrids in environments with and without water stress are 1G 282 and A9904.

Key words: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; abiotic stress; drought tolerance; interaction genotype x environments; grain yield.

3 INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é o quinto cereal mais importante do mundo, apresentando importância principalmente na alimentação humana e produção de rações para animais em várias regiões do planeta. A produção brasileira na safra 2017/18 foi de 2,136 milhões de toneladas, em uma área de 782,2 mil hectares, com rendimento médio de 2.731 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

O sorgo apresenta boa adaptação em ambientes com pouca disponibilidade hídrica em decorrência de um sistema radicular denso e profundo, da capacidade de reduzir a transpiração através do enrolamento foliar e fechamento estomático e pela capacidade de redução do seu metabolismo no período de estresse (BLUM, 2004; REDDY et al., 2009).

Porém, mesmo sendo um dos cereais mais tolerantes à seca, sob forte restrição hídrica, o sorgo pode sofrer danos significativos durante o desenvolvimento da planta (REDDY et al., 2011). A redução dos impactos proporcionados pela seca pode ser obtida por meio da seleção de genótipos com desenvolvimento satisfatório em condições de estresse hídrico.

Para seleção de genótipos de sorgo tolerantes ao estresse hídrico deve-se considerar a imprevisibilidade do ambiente durante o cultivo. Dessa forma, é de grande importância a avaliação em diferentes ambientes para possibilitar a identificação dos genótipos mais adaptados e estáveis. Além disso, de acordo com Menezes et al. (2015) e Batista et al. (2017), a interação entre genótipos e ambientes (GxA) assume importante papel na manifestação fenotípica do caráter tolerância à seca em sorgo.

Para avaliação da interação GxA e determinação da adaptabilidade e estabilidade fenotípica foram descritos vários métodos, baseados em diferentes princípios, sendo exemplos os métodos de Lin e Binns (1988), AMMI (ZOBEL et al., 1988), Annicchiarico (1992) e GGE biplot (YAN et al., 2000). Dentre esses métodos, o GGE Biplot, que utiliza técnicas multivariadas, aliadas a análises gráficas, em complemento ou até mesmo em substituição a análises univariadas, facilitam a observação das interações complexas que envolvem os resultados obtidos na pesquisa (YAN, 2014).

A análise GGE Biplot (Genotype and Genotypes by Environments Interaction), agrupa o efeito aditivo do genótipo com o efeito multiplicativo da interação GxA e submete estes à análise de componentes principais. O modelo GGE Biplot não separa o genótipo da interação GxA, mantendo-os juntos em dois termos multiplicativos (YAN et

al., 2000). Assim, o modelo GGE Biplot é mais indicado para a identificação de mega-ambientes, seleção de ambientes representativos e discriminativos e indicação de genótipos mais adaptados e estáveis a ambientes específicos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do estresse hídrico pré e pós-florescimento no sorgo granífero e verificar a adaptabilidade e estabilidade de híbridos de sorgo granífero, em ambientes sem estresse hídrico e com estresse hídrico em pré e pós-florescimento, por meio da análise GGE Biplot.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição dos ambientes

O experimento foi instalado em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, no ano de 2017. A escolha desses locais foi em função da concentração do período chuvoso, que geralmente ocorre de novembro a março, e da estação seca bem definida entre os meses de maio a outubro, favorecendo a condução de ensaios de tolerância à seca, uma vez que o fornecimento de água durante a condução do experimento é realizado apenas pela irrigação.

Foram conduzidos ensaios em cinco ambientes, três em Nova Porteirinha-MG (sem estresse hídrico, com estresse hídrico em pré-florescimento e com estresse hídrico em pós-florescimento) e dois ambientes em Teresina-PI (sem estresse hídrico e com estresse hídrico em pós-florescimento).

Nova Porteirinha está inserida na mesorregião do Norte de Minas, na área mineira do Semiárido brasileiro. As coordenadas geográficas são 15°48'10" de latitude Sul e 43°18'03" de longitude Oeste. O clima, segundo Köppen, é do tipo Aw (tropical, com inverno seco). O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Vermelho-amarelo de textura média.

Teresina-PI possui as coordenadas geográficas de 05° 05' de latitude Sul e 42° 48' de Longitude Oeste. O clima do município, de acordo com a classificação climática de Thornthwaite e Mather, é C₁sA'a', caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão. O solo da área experimental é um Argissolo Amarelo Distrófico de textura franco arenosa.

As principais ocorrências climáticas verificadas durante o período de condução do

ensaio nos dois locais de cultivo são apresentadas nas Figuras 1 e 2.

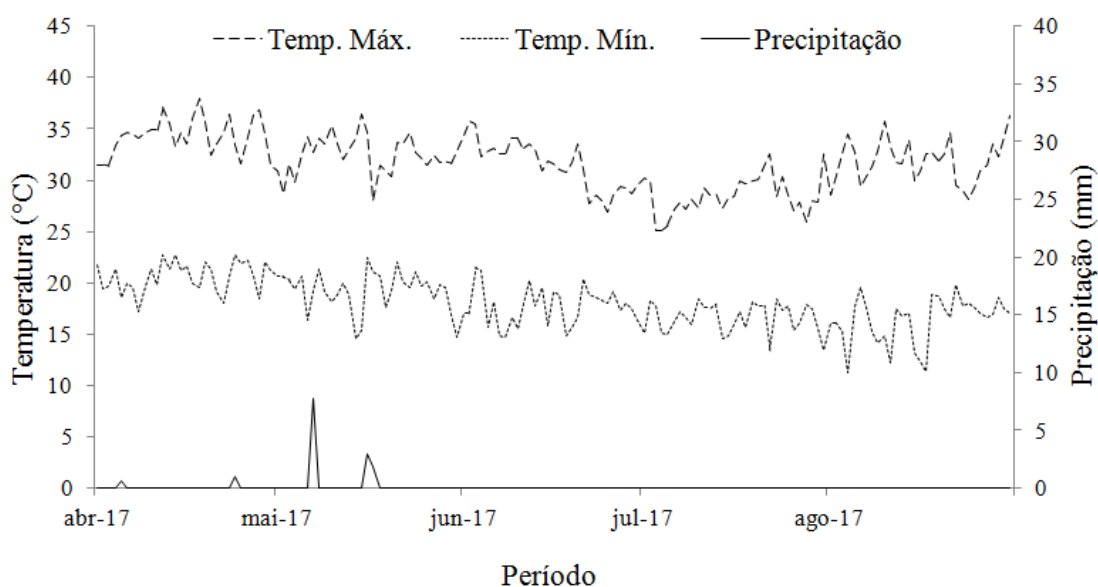


Figura 1. Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), durante o período de condução do experimento em Nova Porteirinha-MG, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).

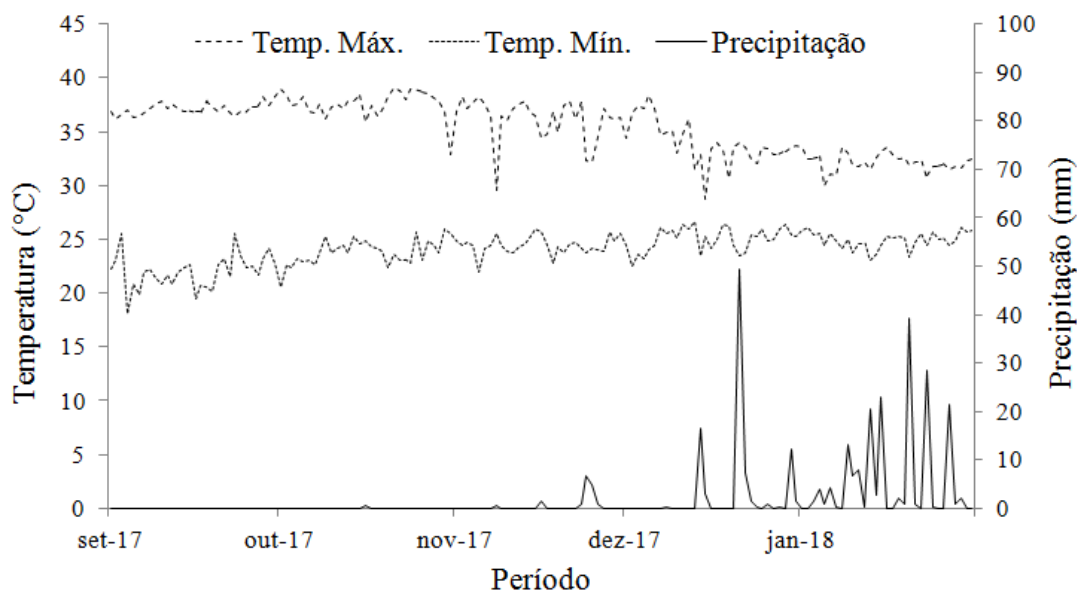


Figura 2. Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), durante o período de condução do experimento em Teresina-PI, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).

4.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos constaram de 20 híbridos comerciais de sorgo granífero, selecionados por pertencerem às principais empresas de sementes do Brasil e por serem, na atualidade, os mais plantados no país.

No ambiente com estresse hídrico pré-florescimento, a irrigação foi cortada aos 28 dias após a semeadura no estágio 2 (lígula da quinta folha visível) e retornada aos 55 dias no estágio 5 (entre o emborrachamento e a antese). Nos ambientes com estresse hídrico pós-florescimento, a irrigação foi cortada aos 45 dias após a semeadura, na época em que a maioria dos híbridos se encontravam no estágio de emborrachamento (estádio 5), para que o estresse hídrico ocorresse no início ou após o florescimento. Já, nos ensaios sem estresse hídrico, a irrigação foi realizada até a maturação fisiológica dos grãos.

Em todos os ensaios utilizou-se irrigação por aspersão convencional, com os aspersores espaçados 12,0 x 12,0 m, pressão de serviço de 250 kPa, bocais de 4,0 x 2,6 mm de diâmetro e com vazão de 1,6 m³ h⁻¹. O manejo da irrigação foi realizado com base na evapotranspiração da cultura. As lâminas de irrigação somadas à precipitação pluvial nos ambientes com estresse hídrico pós-florescimento foram de 337,6 mm em Teresina-PI e 345,0 mm em Nova Porteira-MG, no ambiente com estresse hídrico pré-florescimento a lâmina foi de 400 mm e nos ambientes sem estresse hídrico as lâminas foram de 500,8 mm em Teresina-PI e 600,0 mm em Nova Porteira-MG.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 20 (ambientes x híbridos), com quatro repetições. As parcelas foram compostas de quatro fileiras de 3 m de comprimento, sendo considerada área útil às duas fileiras centrais.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens em pré-plantio. Logo após, a área foi sulcada com o auxílio de uma plantadora-adubadora, regulada para o espaçamento 0,5 m entre linhas. A adubação foi realizada de acordo com os resultados de análise de solo e a exigência da cultura. Em Nova Porteira-MG foram aplicados 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 20 kg ha⁻¹ de N e 40 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio, além de 72 kg ha⁻¹ de N em cobertura, usando como fonte nitrogenada a ureia, aos 30 dias após o plantio, no estágio 2 (lígula da quinta folha visível). Em Teresina-PI, a adubação de plantio constou de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 35 kg ha⁻¹ de N, 35 kg ha⁻¹ de K₂O e 3 kg ha⁻¹ de Zn. Aos 32 dias após o plantio, no estágio 2 (lígula da quinta folha visível), foi realizada a adubação de cobertura com 75 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O.

A semeadura foi realizada de forma manual, semeando-se 20 sementes m^{-1} , em uma profundidade de 3 cm. A semeadura foi realizada no dia 06 de abril de 2017 em Nova Porteirinha-MG e no dia 28 de setembro de 2017 em Teresina-PI. A diferença de data na semeadura está relacionada com o período sem chuvas em cada local, considerando-se que não pode ocorrer precipitação volumosa durante o período em que o estresse é induzido. Aos 20 dias após a semeadura foi realizado um desbaste deixando 10 plantas m^{-1} , para obtenção de um estande final de 200.000 plantas ha^{-1} .

Os tratos culturais constituíram-se de duas capinas manuais e aplicações de inseticidas para o controle de lagarta do cartucho. Logo após o florescimento, as panículas das plantas da área útil foram cobertas com redes de polietileno para impedir que pássaros consumissem os grãos.

4.3 Características avaliadas

As características avaliadas foram: altura de plantas, número de dias para floração, massa mil grãos e produtividade de grãos. A altura das plantas foi obtida pela medida da distância entre o solo e o ápice da panícula na maturação fisiológica dos grãos. O número de dias para o florescimento foi estimado pela contagem do número de dias entre a semeadura e o momento em que mais de 50% das plantas na parcela atingiram a antese. A massa de mil grãos foi obtida a partir de duas amostras de grãos retiradas aleatoriamente de cada parcela. A produtividade foi obtida pela pesagem dos grãos colhidos na área útil de cada parcela, corrigindo-se a umidade para 13% e convertendo-se os dados para $kg ha^{-1}$.

4.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância individual, tendo-se por finalidade a determinação da variância residual de cada ensaio para posterior teste de homogeneidade de variâncias. Quando significativos os efeitos, os ambientes foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Essas análises foram realizadas com o software Sisvar 5.3 (FERREIRA, 2011).

A análise gráfica Box-Plot foi utilizada para avaliar a distribuição dos dados nos cinco ambientes. Esta análise consiste em montar gráficos em formas de caixas onde são representados parâmetros descritivos como a mediana, quartil inferior, quartil superior e os

valores mínimos e máximos. Esta análise permite avaliar a simetria e dispersão dos dados, e a existência de pontos discrepantes (*outliers*), sendo especialmente adequada para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável (MCGILL et al., 1978). Os gráficos Box-Plot foram apresentados usando figuras boxplots, produzidas usando o pacote R (R Development Core Team, 2016).

Para realização da análise conjunta dos ambientes a relação entre o maior e o menor quadrado médio do resíduo da análise de variância individual não deve ser superior a 7:1 (BANZATTO; KRONKA, 2006). Como no presente trabalho essa relação foi de 4,8, realizou-se a análise conjunta dos dados de produtividade de grãos. Logo após, os dados foram submetidos à análise de adaptabilidade e estabilidade por meio do modelo GGE Biplot.

O modelo GGE Biplot utilizado foi:

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = y_1 \epsilon_{i1} \rho_{j1} + y_2 \epsilon_{i2} \rho_{j2} + \epsilon_{ij}$$

Onde: Y_{ij} representa a produtividade de grãos média do genótipo i no ambiente j ; μ é a média geral das observações; β_j é o efeito principal do ambiente; y_1 e y_2 são os escores associados ao primeiro (PC1) e segundo componente principal (PC2), respectivamente; ϵ_{i1} e ϵ_{i2} são os valores do PC1 e PC2, respectivamente, do genótipo de ordem i ; ρ_{j1} e ρ_{j2} são os valores do PC1 e PC2, respectivamente, para o ambiente de ordem j ; e ϵ_{ij} é o erro associado com o modelo do i -ésimo genótipo e j -ésimo ambiente (YAN et al., 2000). A análise foi desenvolvida com auxílio do pacote GGEGui implementado no software R (R Development Core Team, 2016).

5 RESULTADOS

5.1 Altura de plantas

A altura dos híbridos de sorgo granífero foi afetada pelo estresse hídrico, principalmente no ambiente com estresse pré-florescimento em Nova Porteirinha-MG (NPPRE). A maior média de altura foi observada no ambiente sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG (NPSE). Analisando os boxplots observam-se pontos atípicos (*outliers*) nos ambientes Teresina-PI sem estresse hídrico (TSE), Nova Porteirinha-MG

sem estresse hídrico (NPSE) e Nova Porteirinha-MG com estresse hídrico pós-florescimento (NPPOS). Esses pontos atípicos representam híbridos que apresentaram altura muito superior aos demais, como o híbrido 1G 282 (Figura 3a).

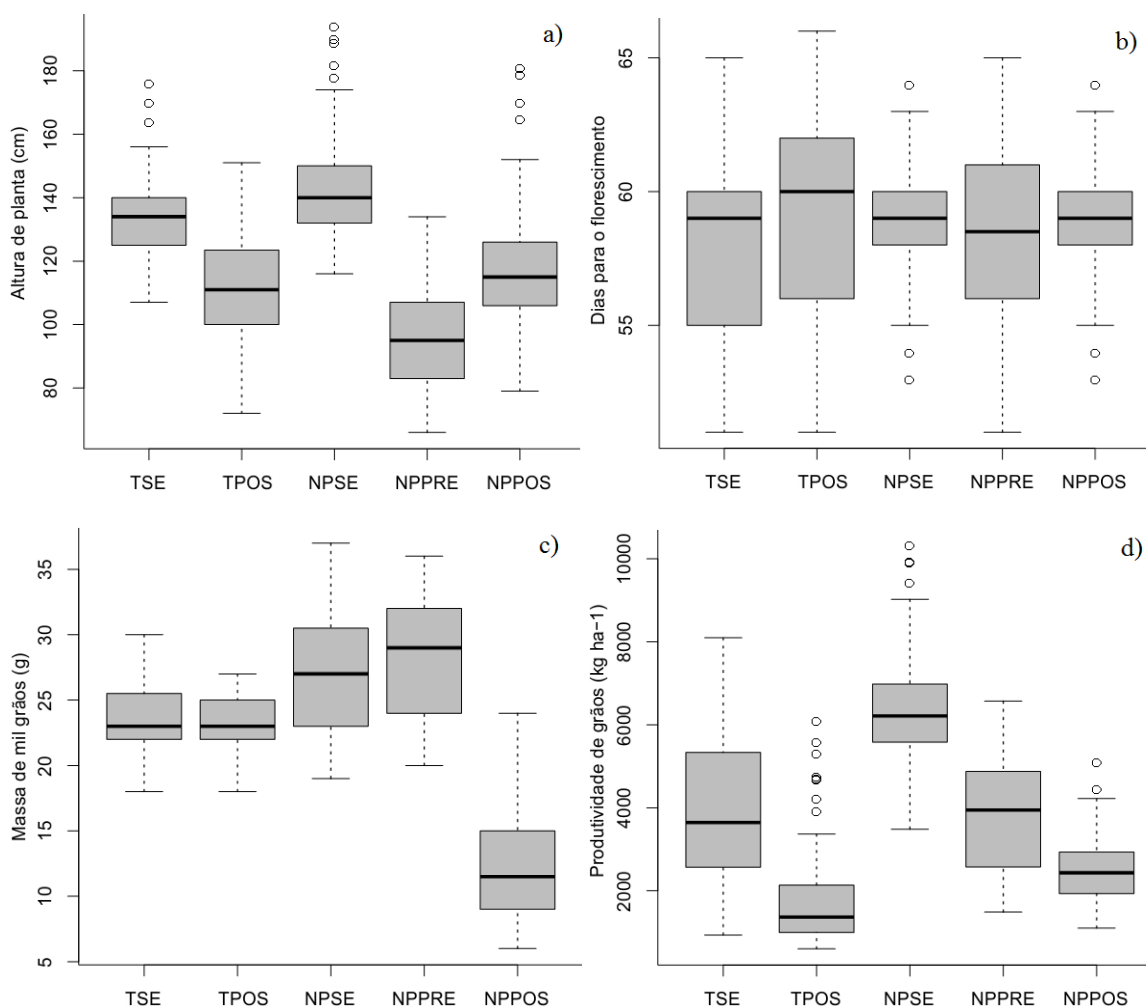


Figura 3. Análise Boxplot para altura de planta (a), número de dias para o florescimento (b), massa de mil grãos (c) e rendimento de grãos (d) de vinte híbridos de sorgo avaliados nos ambientes: TSE: Teresina-PI, sem estresse hídrico; TPOS: Teresina-PI, com estresse hídrico pós-florescimento; NPSE: Nova Porteirinha-MG, sem estresse hídrico; NPPRE: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pré-florescimento; NPPOS: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pós-florescimento.

5.2 Número de dias para florescimento

Os híbridos de sorgo granífero apresentaram alta variabilidade para o número de dias para o florescimento, principalmente nos ambientes conduzidos em Teresina-PI (TSE e TCE) e no ambiente Nova Porteirinha-MG com estresse hídrico pré-florescimento (NPPRE) (Figura 3b). Os híbridos foram, no geral, mais precoces nos ambientes TSE, NPPRE e NPPOS (Tabela 1).

Tabela 1. Altura de plantas, dias para o início do florescimento, massa de mil grãos e produtividade de grãos de 20 híbridos de sorgo granífero, em cinco ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.

Ambiente	Altura (cm)	Florescimento (dias)	Massa de mil grãos (g)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
NPSE	142,8 a	58,9 ab	26,6 b	6413,6 a
NPPRE	95,0 e	58,3 bc	28,5 a	3774,7 b
NPPOS	117,9 c	58,6 abc	12,5 d	2465,8 c
TSE	133,7 b	57,9 c	23,8 c	3959,5 b
TPOS	111,2 d	59,1 a	23,4 c	1825,4 d
CV (%)	10,53	2,77	10,11	25,79

¹Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

5.3 Massa de mil grãos

A massa de grãos foi muito prejudicada pelo estresse hídrico pós-florescimento em Nova Porteirinha-MG (Figura 3 c). A maior média de massa de grãos foi observada no ambiente NPSE, seguida do ambiente NPPRE. Em Teresina-PI, não houve diferença significativa para os ambientes sem e com estresse hídrico pós-florescimento (Tabela 1).

5.4 Produtividade de grãos

A média geral da produtividade de grãos em todos os ambientes avaliados foi de 3687,8 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Os híbridos de sorgo granífero cultivados sob estresse hídrico foram, no geral, mais produtivos em Nova Porteirinha-MG do que em Teresina-PI (Tabela 1). Esse comportamento também foi observado na condição sem estresse hídrico. A

produtividade dos híbridos foi mais afetada pelo estresse hídrico pós-florescimento (Tabela 2 e Figura 3d).

Tabela 2. Média da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 20 híbridos de sorgo granífero, cultivados em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.

Tratamento	Genótipo	TSE	TPOS	NPSE	NPPRE	NPPOS	Média
1	BRS 310	2275,0	1366,7	6287,2	3517,9	2394,0	3168,2
2	BRS 330	3933,4	1511,1	5716,9	5381,7	2891,9	3887,0
3	BRS 332	2833,3	1166,7	5828,2	4913,7	1845,3	3317,4
4	BRS 373	2537,1	822,2	4164,1	2302,0	2989,6	2563,0
5	1167048	2583,3	1066,7	6013,5	4125,2	1813,7	3120,5
6	1167092	4933,4	2655,6	6110,5	4662,2	2032,0	4078,7
7	1105661	2033,4	988,9	5136,8	4727,6	2460,8	3069,5
8	1G 100	1155,6	888,9	7201,9	3375,5	2812,4	3086,9
9	1G 220	3316,7	988,9	5562,9	4035,5	2348,1	3250,4
10	1G 282	7291,7	3940,7	8716,0	4106,8	2845,7	5380,2
11	50A10	3933,3	1577,8	6892,1	2227,7	1959,8	3318,1
12	50A70	5375,0	951,9	5761,9	4357,8	2303,7	3750,0
13	BM 737	4866,7	2388,9	6517,0	2966,8	2038,3	3755,5
14	A9904	7250,0	5311,1	9915,0	3505,7	3396,3	5875,6
15	AG 1040	3655,6	1333,3	4952,2	3924,1	2392,8	3251,6
16	AG 1080	3425,0	1896,3	5663,6	4012,6	3356,3	3670,8
17	AG 1090	5266,7	1544,4	7444,8	3118,2	2159,0	3906,6
18	AS 4625	4191,7	1666,7	6974,9	2983,2	2700,0	3703,3
19	AS 4639	4650,0	3108,4	6798,8	3717,4	2032,4	4061,4
20	DKB 590	3683,3	1333,4	6613,6	3532,4	2544,2	3541,4
Média		3959,5	1825,4	6413,6	3774,7	2465,8	3687,8

TSE: Teresina-PI, sem estresse hídrico; TPOS: Teresina-PI, com estresse hídrico pós-florescimento; NPSE: Nova Porteirinha-MG, sem estresse hídrico; NPPRE: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pré-florescimento; NPPOS: Nova Porteirinha-MG, com estresse hídrico pós-florescimento.

Comparando-se as médias de produtividade de grãos obtidas nos ensaios com e sem estresse hídrico em cada localidade, observa-se que o estresse hídrico pré-florescimento reduziu a produtividade de grãos em 41% em Nova Porteirinha-MG e o estresse hídrico

pós-florescimento reduziu a produtividade de grãos em 62% em Nova Porteirinha-MG e 54% em Teresina-PI (Tabela 2).

5.5 Análises GGE Biplot para produtividade de grãos

Na tabela 3 estão apresentadas as porcentagens de explicação dos eixos do modelo GGE Biplot, onde se observa que nos primeiros dois primeiros componentes principais ocorrem maior captação da porcentagem de variação dos dados, com diminuição nos componentes subsequentes (Tabela 3). Quanto maior a explicação da variação dos dados nos primeiros eixos, maior é o poder de predição da análise (YAN, 2014). Neste estudo, os dois primeiros componentes explicam 84,78% da variação total no modelo GGE Biplot (Tabela 3).

Tabela 3. Porcentagens individual (PI) e acumulada (PA) da soma de quadrados da interação ($SQ_{G \times A}$) associada aos cinco primeiros componentes principais (PC), estimados por análise GGE Biplot para produtividade de grãos em sorgo, em ambientes com e sem estresse hídrico.

Componente principal (PC)	GGE Biplot	
	PI (%)	PA (%)
PC1	72,02	72,02
PC2	12,76	84,78
PC3	8,51	93,29
PC4	4,22	97,51
PC5	2,49	100

Na Figura 4 (Setores e mega-ambientes), obtidos pelo modelo GGE Biplot, observa-se a formação de um polígono, pela conexão dos vértices mais afastados da origem do Biplot, sendo formado pelos híbridos BRS 373 (4), 1105661 (7), BRS 330 (2), 50A70 (12), 1G 282 (10), A9904 (14) e 1G 100 (8). O gráfico foi dividido em sete setores que são separados pelos vetores provenientes do centro biplot (0; 0), perpendicular aos lados do polígono.

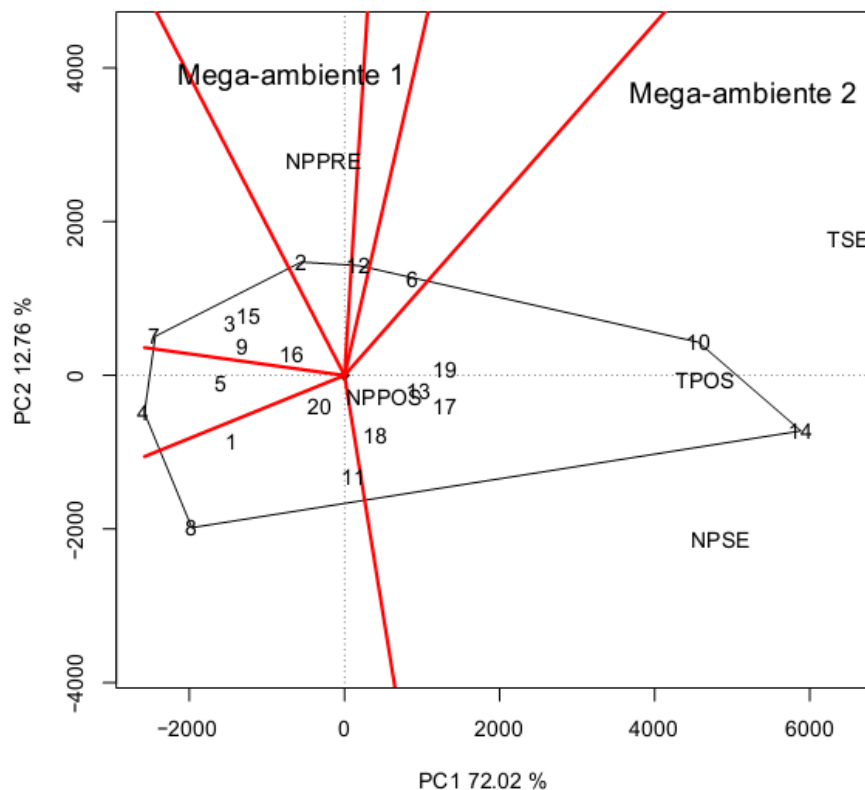


Figura 4. Setores e mega-ambientes obtidos pelo modelo GGE biplot para a produtividade de grãos de 20 genótipos de sorgo granífero avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.

Os mega-ambientes são formados nos setores que contém um ou mais ambientes. Dessa forma, no presente estudo houve a formação de dois mega-ambientes. O mega-ambiente 1 é formado apenas pelo ambiente Nova Porteirinha-MG com estresse hídrico pré-florescimento (NPPRE). Já, o mega-ambiente 2 é formado pelos ambientes Teresina-PI sem estresse hídrico (TSE), Teresina-PI com estresse pós-florescimento (TPOS), Nova Porteirinha-MG sem estresse (NPSE) e Nova Porteirinha-MG com estresse pós-florescimento (NPPOS) (Figura 4).

Os híbridos que estão localizados nos vértices de cada setor apresentam o melhor ou o pior desempenho nesse setor (YAN; TINKER, 2006). O híbrido BRS 330 (2), foi o vértice do mega-ambiente 1, sendo portanto o que apresentou maior desempenho produtivo no ambiente NPPRE (Figura 4).

Os híbridos 1G 282 (10) e A9904 (14) foram os vértices do mega-ambiente 2, onde estão localizados quatro dos cinco ambientes avaliados (NPSE, TSE, NPPOS e TPOS) sendo, portanto, os mais produtivos nos ambientes sem estresse hídrico e com estresse

hídrico pós-florescimento. Os híbridos BM 737 (13), AS 4639 (19), AG 1090 (17), e AS 4625 (18) que também estão localizados no mega-ambiente 2, apresentaram alto desempenho produtivo para esses ambientes (Figura 4). Os híbridos que foram agrupados em setores que não contêm ambientes, não estão entre os mais produtivos em nenhum dos ambientes, sendo considerados desfavoráveis aos ambientes avaliados (YAN, 2014).

No Biplot “Média *vs* Estabilidade” (Figura 5) é possível identificar os híbridos que apresentam alta produtividade média e alta estabilidade. Para isso, os híbridos de sorgo foram ranqueados ao longo de uma reta que passa pela origem do Biplot. Nesta reta observa-se a presença de uma seta, que aponta para a direção de maior produtividade de grãos. A estabilidade é determinada através da distância de projeção do híbrido em relação a essa reta. Logo, quanto mais próximo da reta o híbrido de sorgo estiver plotado maior será a sua estabilidade (YAN, 2011). Assim, os híbridos mais produtivos e que apresentaram média superior à média de todos os ambientes avaliados foram A9904 (14) e 1G 282 (10), seguidos pelos híbridos AS 4639 (19), AG 1090 (17), 1167092 (6) e BM 737 (13).

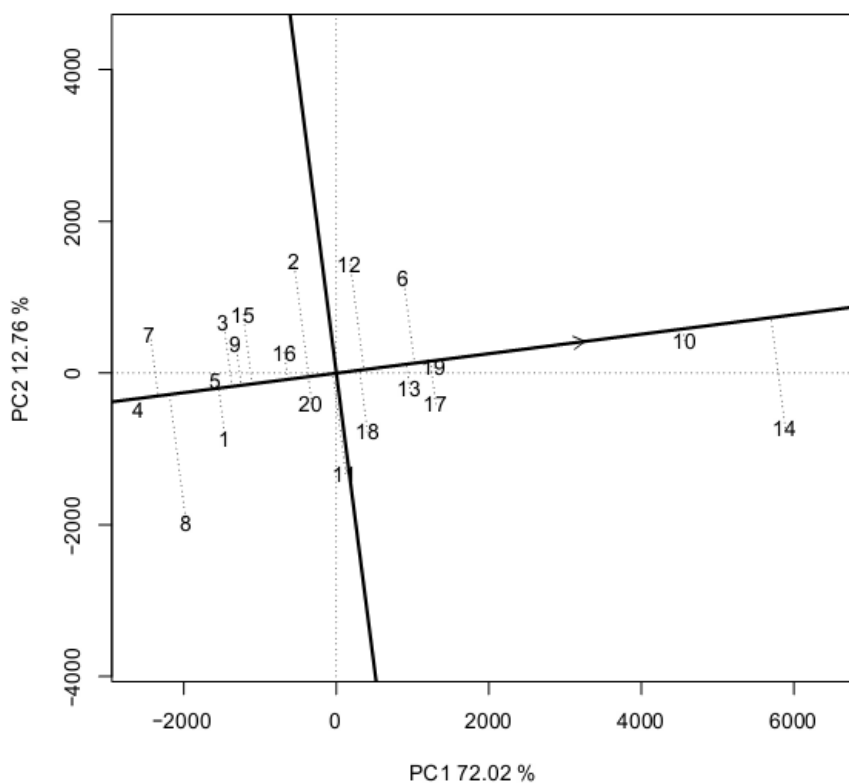


Figura 5. Média *versus* estabilidade segundo o modelo GGE Biplot para a produtividade de grãos de 20 genótipos de sorgo granífero avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.

No Biplot “Classificação dos genótipos de sorgo” (Figura 6) observa-se a formação de círculos concêntricos em torno do eixo do ambiente-média. O genótipo que está posicionado mais próximo do centro dos círculos concêntricos é mais desejável, ou seja, apresenta o melhor desempenho médio. A partir desse Biplot é possível avaliar os híbridos de sorgo, conciliando a adaptabilidade e estabilidade com a produtividade obtida por cada genótipo (YAN, 2011). Neste sentido, o híbrido mais desejável nos ambientes avaliados foi o 1G 282 (10), seguido pelo híbrido A9904 (14) (Figura 6).

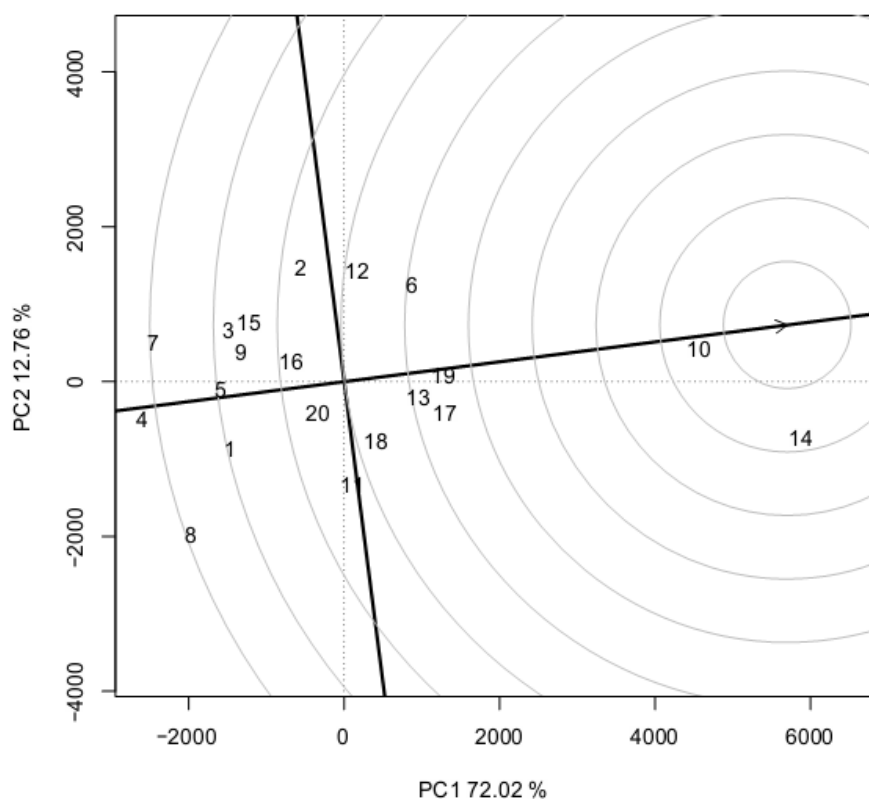


Figura 6. Classificação de 20 genótipos de sorgo granífero segundo o modelo GGE Biplot com base na produtividade de grãos avaliados nos ambientes com e sem estresse hídrico em Nova Porteirinha-MG e Teresina-PI, na safra de 2017.

6 DISCUSSÃO

Os híbridos mais produtivos apresentaram média de altura superior a 100 cm em todas as condições hídricas avaliadas. A altura da planta de sorgo superior a 100 cm é recomendada, por essa característica está positivamente correlacionada com a produtividade de grãos (TARDIN et al., 2013), pois, plantas mais altas apresentam colmo

maior, e o colmo além de suportar as folhas e as partes florais, também serve como importante órgão de reserva de produtos fotoassimilados que serão translocados para os grãos, durante o período de enchimento dos grãos (ALVIM et al., 2011).

Os híbridos de sorgo foram mais baixos no ambiente com estresse hídrico pré-florescimento porque a deficiência hídrica ocorreu na fase de maior crescimento e acúmulo de matéria seca da planta de sorgo. De acordo com Ramazanzadeh; Asgharipour (2011), o déficit hídrico afeta a altura da planta, pois a insuficiência de água proporciona redução na expansão e divisão das células.

A alta variabilidade para o início do florescimento é devida a diferença de ciclo dos híbridos e a reação desses às condições hídricas avaliadas. O número de dias para o início do florescimento é uma característica muito importante na seleção de um genótipo para locais com possibilidade de estresse hídrico pós-florescimento. O sorgo é utilizado principalmente como cultura de entressafra, semeado no final da chuva, e os genótipos de maturidade mais precoce podem escapar do estresse hídrico (TARDIN et al., 2013).

Os híbridos de sorgo produziram menos no ambiente com estresse hídrico em Teresina-PI principalmente pela redução do número de grãos formados, pois a massa de grãos foi semelhante nos ambientes com e sem estresse hídrico (Figura 3c). A semelhança da massa de grãos nos dois ambientes ocorreu devido ao poder compensatório, pois, como o número de grãos formado foi baixo, a competição de drenos foi muito inferior.

A redução do número de grãos em Teresina-PI ocorreu devido ao abortamento de flores, pois na época do florescimento a temperatura máxima estava muito alta (Figura 2). Temperaturas mais altas geralmente tendem a antecipar a antese, assim como pode causar aborto floral, inibição da formação dos micrósporos, diminuição da longevidade e germinação do grão de pólen (BARNABÁS et al., 2008).

A diferença na redução da produtividade proporcionada pelo estresse hídrico pré e pós-florescimento em Nova Porteirinha-MG é explicada pela fase de desenvolvimento do sorgo em que ocorreu a deficiência hídrica. No ambiente com estresse hídrico pré-florescimento a deficiência hídrica ocorreu quando os híbridos estavam na fase de emborrachamento, pouco antes da floração, afetando principalmente a quantidade de grãos formados, com consequente redução na quantidade de grãos por planta. No ambiente com estresse hídrico pós-florescimento, a deficiência hídrica ocorreu no momento de enchimento de grãos, afetando principalmente a formação e a massa de grãos, proporcionando dessa forma, maior redução da produtividade de grãos.

A diferença de produtividade dos híbridos nos dois locais, quando submetidos às mesmas condições hídricas, pode ser explicada, principalmente, pela elevada temperatura em Teresina-PI (temperatura máxima próxima de 40°C), especialmente na fase de iniciação da panícula até o florescimento (Figura 2). Essa elevada temperatura pode ter afetado o potencial produtivo do sorgo, principalmente nas condições de estresse hídrico, pois, os efeitos do déficit hídrico nas plantas são agravados pelas altas temperaturas.

Os híbridos de sorgo com alto desempenho produtivo no mega-ambiente 2 apresentam maior tolerância ao estresse hídrico pós-florescimento e são responsivos a melhores condições hídricas, pois esse mega-ambiente é formado por todos ambientes sem estresse hídrico e com estresse pós-florescimento. A tolerância ao estresse hídrico e a responsividade à melhorias do ambiente são fatores muito importantes na recomendação de genótipos de sorgo granífero ao produtor para plantio em épocas de alta instabilidade pluviométrica, como no cultivo safrinha nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Dentre os híbridos mais produtivos, 1G 282 (10), BM 737 (13), AS 4639 (19) e AG 1090 (17) são os mais estáveis, enquanto os híbridos A9904 (14) e 1167092 (6) apresentam menor estabilidade. Os híbridos BRS 373 (4) e 1167048 (5) são muito estáveis, porém, apresentam baixo desempenho produtivo para os ambientes avaliados, o que inviabiliza a seleção desses híbridos para tolerância ao estresse hídrico, pois, na seleção, busca-se genótipos que possuam alta estabilidade e alto desempenho produtivo.

O híbrido 1G 282, apesar de ter apresentado um rendimento médio geral menor que o híbrido A9904, é o mais desejável nas condições avaliadas neste estudo, pois apresenta maior estabilidade da produtividade de grãos, mesmo em ambientes muito contrastantes como os avaliados neste estudo. Um alto desempenho médio do híbrido 1G 282 também foi relatado em trabalho realizado por Batista et al. (2017) avaliando híbridos de sorgo sob estresse hídrico nos mesmos locais. Esses resultados demonstram o potencial desse híbrido para cultivo em condições de estresse hídrico e a possibilidade de utilizá-lo como testemunha em ensaios para avaliação de novos genótipos tolerantes ao estresse hídrico.

O GGE Biplot apresenta-se como um importante modelo para avaliação de genótipos em diferentes ambientes, pois explicou com eficiência as variações da produtividade de grãos dos genótipos de sorgo nos ambientes testados com os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2). Logo, as interpretações dos gráficos do GGE Biplot são confiáveis para representar os padrões nos dados sobre genótipos e ambientes, em sorgo granífero, em condições com e sem estresse hídrico. Além do mais, as

figuras obtidas pela análise GGE Biplot possibilitam fácil visualização dos resultados da análise de adaptabilidade e estabilidade, permitindo uma interpretação mais rápida e com maior precisão.

7 CONCLUSÕES

O estresse hídrico pós-florescimento reduziu principalmente a altura de plantas. O estresse hídrico pós-florescimento afetou principalmente a massa de grãos.

O estresse hídrico após o florescimento causa maior redução na produtividade de grãos de sorgo granífero.

Os híbridos mais produtivos nos ambientes com e sem estresse hídrico são 1G 282 e A9904.

8 AGRADECIMENTOS

A Embrapa Milho e Sorgo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos recursos financeiros e bolsas para execução do projeto.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, K. R. T.; BRITO, C. H.; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Redução da área foliar em plantas de milho na fase reprodutiva. **Revista Ceres**, v.58, n.4, p.413-418, 2011.

ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. **Journal of Genetics and Breeding**, v. 46, p. 269-278, 1992.

BATISTA, P. S. C.; MENEZES, C. B.; CARVALHO, A. J.; PORTUGAL, A. F.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; SANTOS, C. V.; JULIO, M. P. M. Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n. 3, p. 1-12, 2017.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.

Barnabas, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. **Plant, Cell & Environ**, v. 31, p. 11-38, 2008.

BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. editors. **Physiology and Biotechnology Integration for Plant Breeding**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 141-223.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 5, Safra 2017/18, n.12. Décimo Segundo Levantamento, Brasília, 2018. 148 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 68, p. 193-198, 1998.

MCGILL, R.; TUKEY, J. W.; LARSEN, W. A. Variations of box plots. **The American Statistician**, v. 32, n. 1, p. 12-16, 1978.

MENEZES, C. B.; RIBEIRO, A. S.; TARDIN, F. D.; CARVALHO, A. J.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; PORTUGAL, A. F.; SILVA, K. J.; SANTOS, C. V.; ALMEIDA, F. H. L. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo em ambientes com e sem restrição hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.1, p. 101-115, 2015.

RAMAZANZADEH, S.; ASGHARIPOUR, M. R. Physiological growth responses of sorghum genotypes to impairment of plant photosynthesis using potassium iodide. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1884-1890, 2011.

R Development Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 08 fev. 2018.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S.; KUMAR, A. A. Genetic enhancement for drought tolerance in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 31, p. 189-222, 2009.

REDDY, B. V. S.; KUMAR A. A.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. **Sorghum genetic enhancement for climate change adaptation**. In: Crop Adaptation to Climate Change. 1 ed. (YADAV, S. S. et al., eds.). Wiley-Blackwell, Oxford, 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**, v.12, p.102-117, 2013.

YAN, W.; HUNT, L. A.; SHENG, Q. L.; SZLAVNICS, Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE Biplot. **Crop Science**, v. 40, p. 597-605, 2000.

YAN, W.; TINKER, A. Biplot analysis of multi environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006.

YAN, W. GGE Biplot vs. AMMI Graphs for Genotype-by-Environment Data Analysis. **Journal of the India Society of Agricultural Statistics**, v. 65, n. 2, p. 181-193, 2011.

YAN, W. **Crop variety trials: Data management and analysis**. John Wiley & Sons, New York. 2014. 361p.

ZOBEL, R. W.; WRIGHT, M. J.; GAUCH, H. G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy Journal**, v. 80, p. 388-393, 1988.

ARTIGO CIENTÍFICO II

CRESCIMENTO DE HÍBRIDOS DE SORGO GRANÍFERO SOB ESTRESSE HÍDRICO EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA PLANTA

1 RESUMO

O estresse hídrico afeta o crescimento das plantas e a produção das culturas em vários estádios de desenvolvimento. O objetivo deste estudo foi analisar o crescimento de híbridos de sorgo granífero sob estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. Vinte híbridos de sorgo foram avaliados em condições sem estresse hídrico e com estresse hídrico no pré e pós-florescimento. O delineamento experimental foi blocos casualizados, com quatro repetições. As características avaliadas foram a altura da planta, índice de área foliar fotossinteticamente ativa, massa seca da parte aérea, índice de clorofila SPAD e os parâmetros de crescimento, taxa de crescimento absoluto, taxa de crescimento relativo, razão de área foliar, razão de massa foliar, área foliar específica e taxa assimilatória líquida. A redução na eficiência fotossintética da planta causada pelo estresse hídrico afetou os parâmetros de crescimento dos híbridos de sorgo granífero. O estresse hídrico pré-florescimento afetou principalmente a altura de plantas, o índice de área foliar e a massa seca da parte aérea. O estresse hídrico pós-florescimento afetou principalmente o índice de área foliar, o índice de clorofila SPAD e a taxa assimilatória líquida. O estresse hídrico após o florescimento foi o que mais afetou a cultura em termos fisiológicos e de produção.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* L., restrição hídrica, parâmetros de crescimento.

GROWTH OF GRAIN SORGHUM UNDER WATER STRESS IN DIFFERENT STAGES OF PLANT DEVELOPMENT

2 ABSTRACT

Water stress affects plant growth and crop production at various stages of development. The objective of this study was to analyze the growth of sorghum hybrids under water stress at different stages of development. Twenty hybrids of sorghum were evaluated in conditions without water stress and with water stress in pre and post flowering. The experimental design was randomized blocks, with four replications. The evaluated characteristics were plant height, leaf area index, photosynthetically active area (LAI), dry shoot mass, SPAD chlorophyll index and growth parameters, absolute growth rate (TCA), relative growth rate (TCR) , foliar area ratio (RAF), foliar mass ratio (FMR), specific leaf area (AFE) and net assimilation rate (TAL). The reduction in the photosynthetic efficiency of the plant caused by water stress affected the growth parameters of the sorghum hybrids. Pre-flowering water stress mainly affected plant height, leaf area index and dry shoot mass. Post-flowering water stress mainly affected the leaf area index, the SPAD chlorophyll index and the net assimilation rate. Water stress after flowering was the one that most affected the crop in terms of physiology and production.

Keywords: *Sorghum bicolor* L., water restriction, growth parameters.

3 INTRODUÇÃO

O estresse hídrico é um sério problema para a agricultura em muitas regiões do mundo. Afeta a planta em todos os estádios de desenvolvimento, reduzindo significativamente o rendimento da cultura (TUBEROSA, 2012). No cenário atual de escassez de água, é importante cultivar culturas que sejam tolerantes à seca e que tenham alto rendimento, como o sorgo.

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma cultura muito importante na alimentação em várias áreas do globo, sendo o quinto cereal mais importante do mundo (FAO, 2016). Sua adaptabilidade ao cultivo em locais com baixa disponibilidade hídrica está associada às suas características xerófitas e mecanismos eficientes de tolerância à seca (BLUM, 2004).

O desequilíbrio da disponibilidade de água em diferentes estádios de crescimento da planta afeta diretamente o rendimento do sorgo, pois interfere em vários processos fisiológicos da planta (ALI et al., 2011), reduzindo principalmente a sua eficiência fotossintética. A magnitude dos efeitos da restrição hídrica depende muito da sua intensidade, duração e, principalmente, do momento de sua indução, com relação ao ciclo fenológico da cultura (PRASAD et al., 2008).

No Brasil, o sorgo granífero é cultivado durante períodos sujeitos a estresse hídrico, especialmente em dois estádios de desenvolvimento da planta. Durante o primeiro estágio, o estresse hídrico ocorre antes do florescimento, causado por uma distribuição irregular e com pouca precipitação. No segundo estágio, a escassez de água pode ocorrer após o florescimento, principalmente no sorgo cultivado no período da safrinha nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Estresse hídrico muito severo no período de safrinha interfere na produção total de sorgo no Brasil, pois esta é a principal época de cultivo de sorgo granífero no país.

No sorgo granífero, o estresse hídrico pré-florescimento reduz o tamanho da panícula, o número de grãos e a produtividade de grãos. Já, o estresse hídrico pós-florescimento afeta principalmente o tamanho de grãos, a área foliar fotossinteticamente ativa e a produtividade de grãos (TOLK et al., 2013; BORRELL et al., 2014; MENEZES et al., 2015).

A análise de crescimento é uma técnica que detalha as mudanças morfofisiológicas da planta ao longo do tempo, além de possibilitar avaliar a eficiência fotossintética, por

meio do acúmulo de matéria seca. Apesar da complexidade que envolve o crescimento das plantas, a análise de crescimento é uma forma muito precisa para avaliar o desenvolvimento e mensurar a contribuição de diferentes processos fisiológicos sobre o comportamento vegetal por meio de avaliações periódicas da quantidade de fitomassa produzida pela planta durante o seu desenvolvimento (BENINCASA, 2003; PAUL et al., 2017), podendo ser executada com equipamentos simples e menos sofisticados.

A avaliação do crescimento de genótipos de sorgo em condições de estresse hídrico é de grande importância, pois possibilita identificar os principais efeitos do déficit hídrico sobre as características morfofisiológicas das plantas ao longo do ciclo, bem como auxiliar os programas de melhoramento na seleção de genótipos tolerantes a estresse hídrico. O objetivo deste estudo foi realizar a análise do crescimento de plantas em híbridos de sorgo granífero cultivados sob estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento da planta.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram instalados na área experimental localizada em Nova Porteirinha, no Estado de Minas Gerais (MG), a 15°48'10" S e 43°18'03" W. O solo é caracterizado como um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. O clima é semiárido com chuvas irregulares, sendo uma região recomendada para ensaios de tolerância à seca, pois seu maior índice de chuvas se concentra de novembro a março, com uma estação seca bem definida entre maio e outubro, portanto o controle hídrico durante o estudo foi realizado apenas por irrigação. Os dados referentes à temperatura máxima e mínima e precipitação durante o experimento são mostrados na Figura 1.

Foram avaliados 20 híbridos de sorgo granífero (BRS 310, BRS 330, BRS 332, BRS 373, 1167048, 1167092, 1105661, 1G 100, 1G220, 1G 282, 50A10, 50A70, BM 737, A9904, AG 1040, AG 1080, AG 1090, AS 4625, AS 4639, DKB 590), selecionados por pertencerem as principais empresas produtoras de sementes do país e por serem os mais plantados na atualidade.

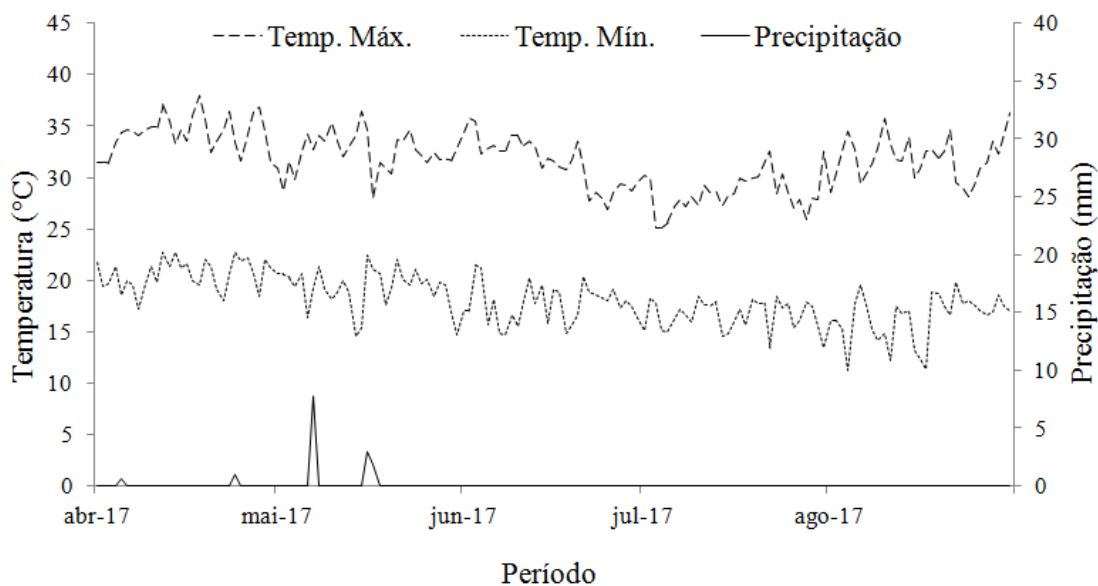


Figura 1. Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima (°C), durante o período de condução do experimento em Nova Porteirinha-MG, no ano de 2017 (Fonte: INMET, 2018).

Os híbridos foram cultivados em condições sem estresse hídrico, e com estresse hídrico em pré e pós-florescimento. No ensaio com estresse hídrico pré-florescimento, a irrigação foi cortada aos 28 dias após a semeadura no estágio 2 (lígula da quinta folha visível) e retornada aos 55 dias no estágio 5 (entre o emborrachamento e a antese). No ensaio com estresse hídrico em pós-florescimento a irrigação foi cortada aos 45 dias após a semeadura, época em que a maioria dos híbridos se encontravam no estágio de emborrachamento, para que o estresse hídrico ocorresse no durante o florescimento. No ensaio sem estresse hídrico a irrigação foi realizada até a maturação fisiológica dos grãos. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 3 x 20 (regime hídrico x híbridos), com três repetições. As parcelas foram compostas de quatro fileiras de 3 m de comprimento, sendo considerada área útil às duas fileiras centrais. No ambiente.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens em pré-plantio. Logo após, a área foi sulcada com o auxílio de uma plantadora-adubadora, regulada para o espaçamento 0,5 m entre linhas. A adubação foi realizada de acordo com os resultados de análise de solo e a exigência da cultura, sendo utilizados 250 kg ha⁻¹ da fórmula 8-28-16 (NPK), além de 72 kg ha⁻¹ de N em cobertura, usando como fonte nitrogenada a ureia, aos 30 dias após o plantio, quando as plantas se encontravam no

estádio 2 (lígula da quinta folha visível). A semeadura foi realizada em abril de 2017, sendo semeadas, de forma manual, 20 sementes m^{-1} . Aos 20 dias após a semeadura foi realizado um desbaste deixando 10 plantas m^{-1} , para obtenção de um estande final de 200.000 plantas ha^{-1} . A irrigação do experimento foi realizada por aspersão convencional.

Os tratos culturais constituíram de duas capinas manuais e aplicações de inseticidas para o controle de lagarta do cartucho. Logo após o florescimento as panículas da área útil das parcelas foram cobertas com redes de polietileno, sendo estas grampeadas para impedir que pássaros consumissem os grãos.

As avaliações foram realizadas aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS), sendo coletadas três plantas na área de trabalho de cada parcela. As características avaliadas foram altura da planta, índice de área foliar fotossinteticamente ativa (IAF), massa seca da parte aérea (MSPA) e índice de clorofila SPAD. A altura da planta foi determinada pela medida da distância entre o solo e o ápice da panícula. A área foliar fotossinteticamente ativa foi estimada pelo produto do comprimento e largura de cada folha, multiplicado pelo coeficiente de 0,75 (Petty et al., 2007). O índice de área foliar fotossinteticamente ativa (IAF) foi então calculado a partir da razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa total da planta e a superfície do solo que ela cobre. Para determinação da MSPA, foi coletada a parte aérea das plantas separando as folhas do colmo, em seguida foram colocadas para secar em estufa de circulação de ar forçado a 65°C por 72 horas e, posteriormente, pesadas com balança analítica. O índice de clorofila SPAD foi medido com um medidor SPAD-502, no terço médio de cada folha, evitando-se os bordos foliares, a região da nervura central e áreas com clorose ou necrosadas. A produtividade de grãos foi avaliada pela pesagem da massa de grãos, corrigida para 13% de umidade, transformando os resultados para $kg\ ha^{-1}$.

A partir da área foliar fotossinteticamente ativa, massa seca da folha e massa seca da parte aérea total, foram calculados os parâmetros taxa de crescimento absoluto (TCA): variação da massa seca da parte aérea num intervalo de tempo; taxa de crescimento relativo (TCR): variação da massa seca da parte aérea em função da massa seca inicial num intervalo de tempo; razão de área foliar (RAF): quociente entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a massa seca total da parte aérea; razão de massa foliar (RMF): razão entre a massa seca das folhas e a massa seca total da parte aérea da planta; área foliar específica (AFE): razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a massa seca da parte aérea da planta; e taxa assimilatória líquida (TAL): expressa a massa seca produzida por

unidade de área foliar por unidade de tempo. Esses parâmetros da análise de crescimento foram calculados segundo Benincasa (2003).

Os dados para as características de crescimento foram submetidos à análise de regressão, selecionando o modelo que melhor se ajusta ao crescimento das plantas de sorgo sob o estresse hídrico nos diferentes estádios de desenvolvimento. Os valores do boxplot para o rendimento de grãos foram produzidos usando o pacote R (R Development Core Team 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

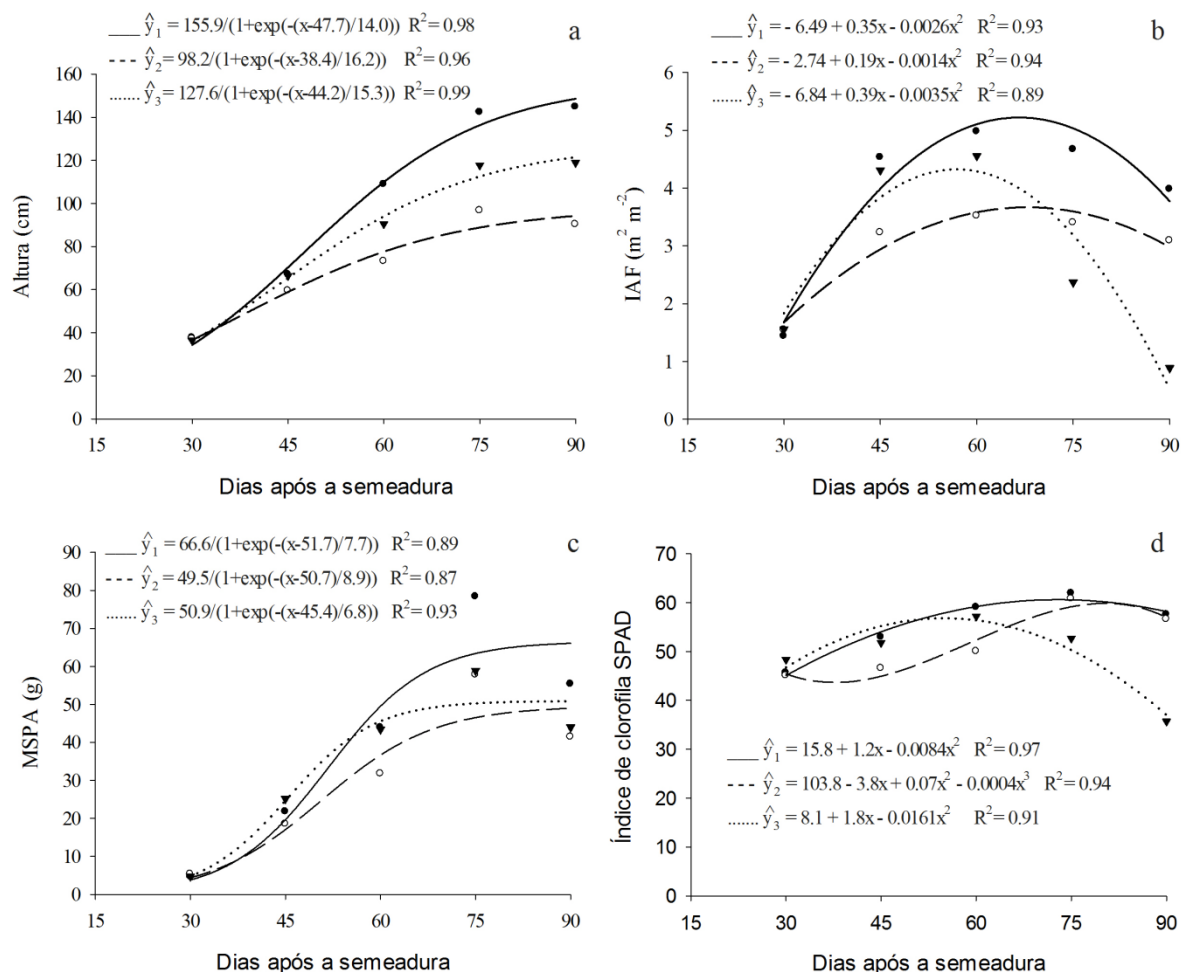
O estresse hídrico reduziu significativamente a altura das plantas. Na condição sem estresse hídrico, as plantas foram mais altas que sob estresse hídrico pré ou pós-florescimento. As plantas mais baixas ocorreram sob estresse hídrico pré-florescimento. O crescimento das plantas foi lento no início do ciclo e entre 30 e 75 DAS os híbridos de sorgo apresentaram aumento exponencial na altura das plantas. Após esse período, todos os híbridos já haviam liberado a panícula e nenhum aumento das plantas de sorgo foi observado (Figura 2a).

O estresse hídrico imposto na fase de pré-florescimento, quando houve substancial expansão e divisão celular, reduziu significativamente a altura da planta. O estresse hídrico no estádio de pós-florescimento também teve um efeito negativo no crescimento das plantas de sorgo, mas foi menos pronunciado do que durante o estádio de pré-florescimento (Figura 2a). Isso ocorreu porque o crescimento das plantas acontece basicamente antes da floração e, depois disso, apenas o pedúnculo cresce.

A redução na altura das plantas causada pelo estresse hídrico é devido a uma redução na expansão e divisão celular (RAMAZANZADEH; ASGHARIPOUR 2011). Redução na altura do sorgo em condições de déficit hídrico também foi relatada por Tardin et al. (2013) e Menezes et al. (2015).

O IAF nas plantas de sorgo aumentou até próximo dos 60 DAS, quando as plantas apresentaram a maior área foliar fotossinteticamente ativa em todas as condições de água. Até os 60 DAS, as plantas sob estresse hídrico pré-florescimento apresentaram o menor IAF. Após 60 DAS, houve redução do IAF das plantas em todas as condições, principalmente devido à senescência foliar, sendo muito mais pronunciada nas plantas sob estresse hídrico pós-florescimento. Aos 90 DAS, as plantas sob estresse hídrico pós-

florescimento apresentaram IAF muito menor em comparação com as plantas cultivadas nas outras condições hídricas (Figura 2b).



• Sem estresse hídrico ◦ Estresse hídrico pré-florescimento ▼ Estresse hídrico pós-florescimento
 Figura 2. Altura de plantas (a), índice de área foliar fotossinteticamente ativa - IAF (b), massa seca da parte aérea - MSPA, (c) e índice de clorofila SPAD (d) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—), e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento (····). Nova Porteirinha-MG, 2018.

A expansão das folhas é um processo conduzido pelo turgor e é muito sensível ao estresse hídrico. A inibição da expansão celular produzida pelo estresse hídrico causa, portanto, uma redução na expansão foliar, sendo este um dos primeiros mecanismos de defesa da planta contra a deficiência hídrica (TAIZ et al., 2017). Além disso, segundo Magalhães et al. (2014), a área foliar fotossinteticamente ativa está diretamente relacionada à produção final de matéria seca da planta, pois durante o seu desenvolvimento, a planta de sorgo depende das folhas como órgãos fotossintetizantes e a taxa de crescimento da planta

depende da taxa de expansão da área foliar, bem como da taxa de fotossíntese por unidade de área foliar.

Neste estudo, o estresse hídrico pré-florescimento reduziu o crescimento das plantas e a taxa de emissão de novas folhas, pois sob estresse hídrico a planta de sorgo reduziu o seu metabolismo. Essa foi a principal causa da menor área foliar fotossinteticamente ativa dos híbridos de sorgo nessa condição durante o período de estresse hídrico (28-55 DAS). Na condição com estresse hídrico pós-florescimento, a redução da área foliar fotossinteticamente ativa foi causada principalmente pela senescência foliar, que foi mais acentuada a partir dos 60 DAS.

O acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) nos híbridos de sorgo foi lento no início do ciclo. A partir desse período, houve ganho menos expressivo de MSPA até 75 DAS, seguido de uma redução. O menor acúmulo de MSPA ao longo do ciclo foi observado sob o estresse hídrico pré-florescimento, embora aos 90 DAS às médias de MSPA nos híbridos sob estresse hídrico pré e pós-florescimento foram semelhantes (Figura 2c). A redução na produção de massa seca causada pela restrição de água depende da intensidade e duração do estresse hídrico, do estágio de desenvolvimento da planta, do período pelo qual a planta é submetida ao estresse e da recuperação da planta depois de cessado o estresse (XU et al., 2010). A diminuição no crescimento da parte aérea, principalmente devido à redução na área foliar fotossinteticamente ativa, pode ser uma estratégia importante para plantas sob estresse hídrico, uma vez que permite a redução da superfície transpirante (ASHRAF; FOOLAD, 2007).

O menor acúmulo de massa seca das plantas nas condições com estresse hídrico pode ser devido à redução considerável da fotossíntese e do crescimento da planta causados pela deficiência hídrica. Segundo Taiz et al., (2017), a deficiência hídrica provoca perda de turgescência das células, promovendo, dessa forma, o fechamento estomático, reduzindo a assimilação de CO₂ e inibindo o processo fotossintético, tanto no transporte de elétrons, como também em eventos bioquímicos e na atividade enzimática.

Sob condições sem estresse hídrico, o índice de clorofila SPAD dos híbridos aumentou ao longo do ciclo até 75 DAS, atingindo valores próximos a 62. Após esse período, houve uma leve redução do índice de clorofila SPAD, demonstrando que em condições hídricas ideais os híbridos de sorgo granífero permanecem com altos valores de índice de clorofila SPAD mesmo no final do ciclo. Na condição com estresse hídrico pós-florescimento, o índice de clorofila SPAD dos híbridos aumentou até os 60 DAS e logo

após esse período houve uma redução significativa, devido ao efeito da deficiência hídrica (Figura 2d). Altos valores de clorofila apresentam efeito positivo sobre o rendimento de grãos sob condições de estresse hídrico, sugerindo atraso na senescência da folha e aumento na disponibilidade de carbono para o enchimento de grãos, melhorando o tamanho do grão e o rendimento de grãos (KASSAHUN et al., 2010; BORREL et al., 2014).

O comportamento do índice de clorofila SPAD dos híbridos sob estresse hídrico pré-florescimento foi diferente das demais condições hídricas. Entre os 30 e 60 DAS, quando as plantas estavam sob déficit hídrico, não houve aumento do índice de clorofila SPAD como observado nas demais condições hídricas. Aos 60 DAS, quando o suprimento hídrico foi reestabelecido, houve um aumento significativo do índice de clorofila SPAD até os 75 DAS, e logo após esse período os valores começaram a decrescer (Figura 2d). Esses resultados demonstram que o estresse hídrico, em qualquer época do cultivo, afeta de forma negativa o índice de clorofila SPAD das plantas de sorgo, sugerindo redução na eficiência fotossintética das plantas pela redução de pigmentos fotossintetizantes.

O comportamento da função quadrática foi observado para a taxa de crescimento absoluto (TCA) das plantas, nas três condições hídricas. Nas plantas sem estresse hídrico a TCA aumentou até os 60 DAS, reduzindo significativamente após os 75 DAS, alcançando valores negativos aos 90 DAS. Para o estresse hídrico pré-florescimento, durante o período de estresse o aumento na TCA foi baixo com relação às demais condições da água, demonstrando a capacidade da planta de sorgo reduzir o seu metabolismo e conseqüentemente o crescimento em períodos de estresse. Sob estresse hídrico após o florescimento, redução significativa na TCA foi observada após 60 DAS (Figura 3a). A taxa máxima de crescimento nas culturas geralmente coincide com o início do florescimento, que para o sorgo granífero nas condições avaliadas foi entre 55 e 72 DAS. Maior TCA, próximo ao período de floração no sorgo, também foi relatado por Ramazanzadeh; Asgharipour (2011), ao avaliar o crescimento em sorgo de diferentes ciclos.

A taxa de crescimento relativo (TCR) máxima ocorre no início do período de crescimento e diminui à medida que o ciclo da planta avança. Esta alta taxa de crescimento no início do ciclo é devida à maior parte da área foliar fotossinteticamente ativa da planta ser constituída de folhas jovens com alta capacidade fotossintética e alta taxa de crescimento (BENICASA, 2003; AUMONDE et al. 2011). A TCR foi, portanto superior

aos 30 DAS nas três condições de água e depois diminuiu até os 90 DAS, quando se tornou negativa, isto é, os híbridos de sorgo granífero apresentaram redução na massa seca no final do ciclo (Figura 3b).

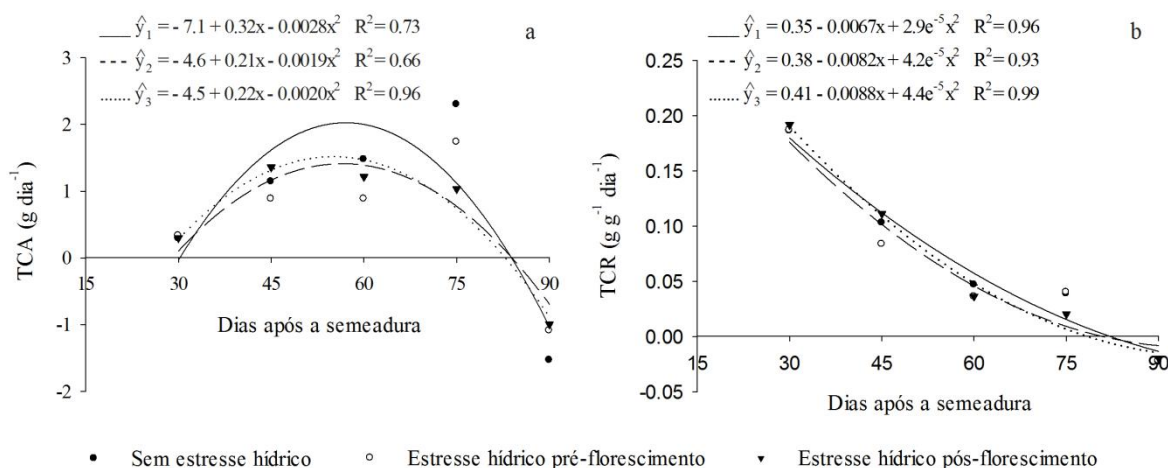


Figura 3. Taxa de crescimento absoluto - TCA (a) e taxa de crescimento relativo - TCR (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento (····). Nova Porteirinha-MG, 2018.

A taxa de crescimento relativo sob estresse hídrico pré-florescimento foi menor durante o período em que não havia fornecimento de água. Após 60 DAS, o crescimento relativo dos híbridos sob estresse hídrico pós-florescimento foi menor (Figura 3b), demonstrando que o déficit hídrico reduziu o acúmulo de matéria seca nas plantas. Os resultados para TCR e índice de clorofila SPAD nos híbridos de sorgo sob condições de estresse hídrico pré-florescimento determinam a capacidade do sorgo para retomar o crescimento após o restabelecimento do suprimento de água.

Nas condições sem estresse hídrico e estresse hídrico pré-florescimento, houve redução na razão de área foliar (RAF) nas plantas de sorgo até 75 DAS; pouco depois desse período, houve um ligeiro aumento na RAF até 90 DAS. Por outro lado, sob estresse hídrico pós-florescimento, a redução na RAF foi contínua até os 90 DAS, sendo essa redução na RAF menos acentuada entre 75 e 90 DAS (Figura 4a). A RAF expressa a área foliar útil para a fotossíntese, sendo a razão entre a área foliar responsável por interceptar energia luminosa e CO₂, e o peso seco total, resultado da fotossíntese. Conforme a planta cresce, a interferência das folhas superiores nas folhas inferiores aumenta, reduzindo assim a área foliar útil (BENINCASA, 2003).

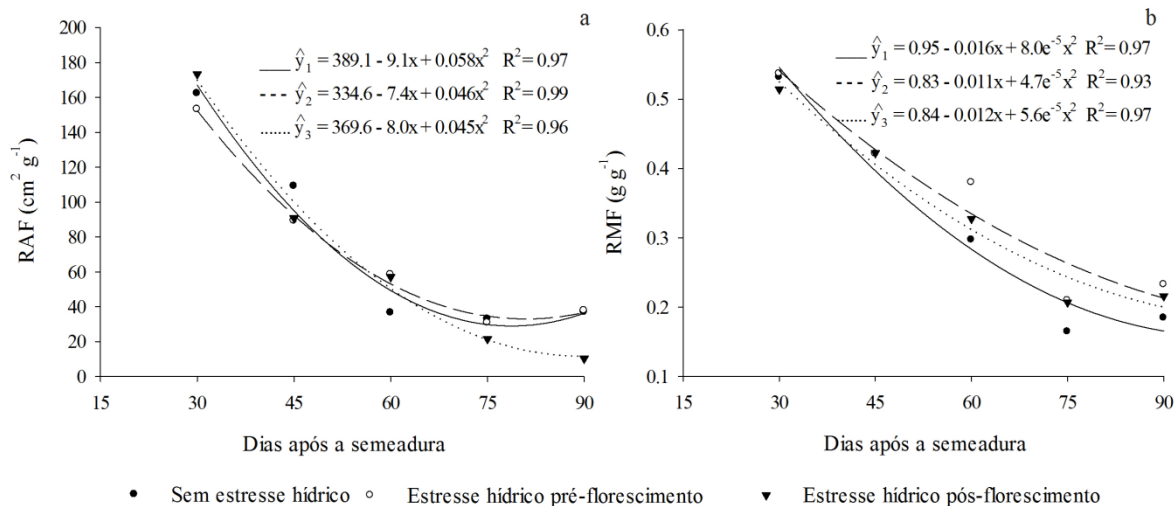


Figura 4. Razão de área foliar - RAF (a) e razão de massa foliar - RMF (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento (....). Nova Porteirinha-MG, 2018.

A Razão de Massa Foliar (RMF) expressa a fração de biomassa não exportada das folhas para outras partes da planta, considerando-se que as folhas são o centro de produção de biomassa e que o resto da planta depende da exportação de material da folha (BENINCASA, 2003). Neste estudo, a RMF diminuiu ao longo do período de avaliação em todas as condições da água. A menor RMF nos híbridos de sorgo foi observada na condição sem estresse hídrico, e a maior RMF foi observada sob estresse hídrico pré-florescimento (Figura 4b). Valores maiores para a RMF em plantas sob déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura também foram encontrados por Vilela; Büll (1999) em plantas de milho. Segundo os autores, a maior RMF em plantas sob déficit hídrico sugere menor exportação de assimilados da folha para outros órgãos da planta.

A tendência decrescente da RMF indica que as folhas foram os drenos preferidos no início do ciclo, devido ao maior investimento em folhas para aumentar a área foliar útil para a fotossíntese, necessária para a produção de assimilados fundamentais ao crescimento. Após o florescimento, as estruturas reprodutivas tornaram-se os drenos principais; estes são fortes drenos e com alta capacidade de mobilização de assimilados (TAIZ et al., 2017).

Houve redução na área foliar específica (AFE) dos híbridos de sorgo ao longo do período de avaliação nas condições sem estresse hídrico e estresse hídrico pós-florescimento. Na condição sem estresse hídrico, a redução da AFE nos híbridos foi menos

pronunciada. Sob estresse hídrico pós-florescimento, a redução na AFE foi mais pronunciada, especialmente 60 DAS, período em que os híbridos estavam sob estresse hídrico. Por outro lado, sob estresse hídrico pré-florescimento, a redução na AFE foi mais pronunciada durante o período sem fornecimento de água, entre 30 e 60 DAS. Quando o suprimento de água foi restabelecido, houve um leve aumento na AFE de 75 para 90 DAS (Figura 5a). Uma redução na AFE das plantas sob estresse hídrico também foi relatada por Liu; Stützel (2004), que observaram que a redução na área foliar específica causa a formação de folhas mais grossas, o que ajuda na conservação da água na folha, devido à menor relação entre a superfície e o volume da folha.

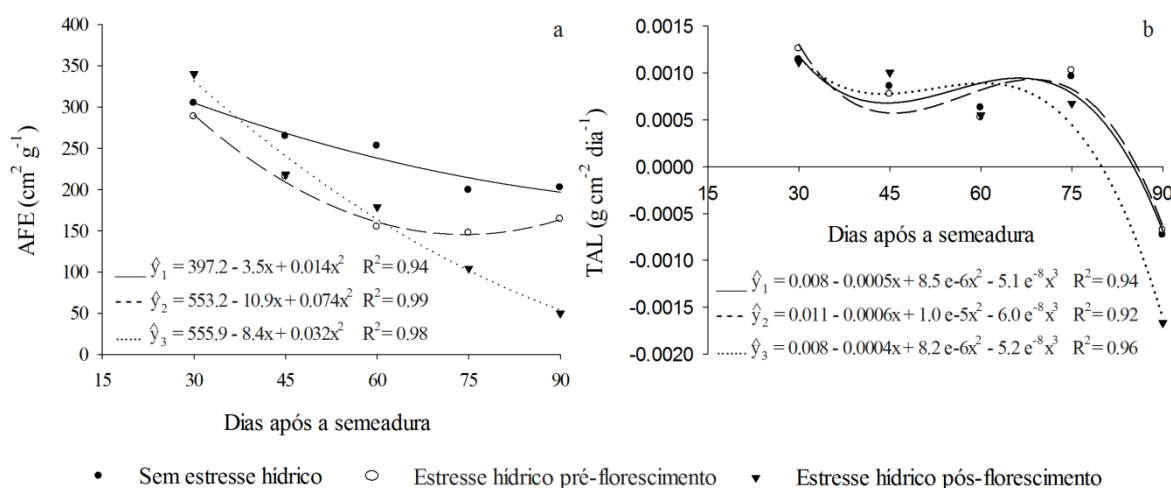


Figura 5. Área foliar específica - AFE (a) e taxa assimilatória líquida - TAL (b) de híbridos de sorgo granífero, em condições sem estresse hídrico (—) e com estresse hídrico em pré-florescimento (---) e pós-florescimento (····). Nova Porteirinha-MG, 2018.

A taxa de assimilação líquida (TAL) é um parâmetro de crescimento que representa o aumento da biomassa por unidade de área foliar em qualquer período (BENINCASA, 2003). Neste estudo, a TAL dos híbridos de sorgo apresentou comportamento semelhante para as três condições de água, com discreta diminuição ao redor de 60 DAS, seguido de um aumento até 75 DAS e, em seguida, uma redução muito acentuada, alcançando valores negativos aos 90 DAS (Figura 5b).

O valor máximo para a TAL próximo aos 75 DAS deve-se ao surgimento de estruturas reprodutivas que possuem alta capacidade de mobilizar fotoassimilados. A redução da TAL entre 30 e 60 DAS foi ligeiramente mais pronunciada nos híbridos sob estresse hídrico pré-florescimento; após 75 DAS, a redução na TAL foi muito mais

pronunciada nos híbridos sob estresse hídrico pós-florescimento (Figura 5b).

A TAL é dependente da dimensão da área foliar, distribuição das folhas no dossel, ângulo foliar, translocação e partição de assimilados (AUMONDE et al. 2011). Geralmente diminui com a idade das plantas devido ao surgimento de estruturas não assimilatórias juntamente com o sombreamento das folhas inferiores. A partir desses resultados, pode-se inferir que o estresse hídrico pós-florescimento apresenta efeito mais negativo sobre a TAL do que o estresse hídrico pré-florescimento, e pode ser explicado principalmente pela maior redução da área foliar fotossinteticamente ativa e teor de clorofilas das plantas no final do ciclo.

O rendimento de grãos foi drasticamente reduzido pelo estresse hídrico (Figura 6). O menor rendimento foi observado na condição de estresse pós-florescimento, mostrando que a sensibilidade do sorgo ao estresse hídrico é maior durante os estádios reprodutivos do que durante o período vegetativo.

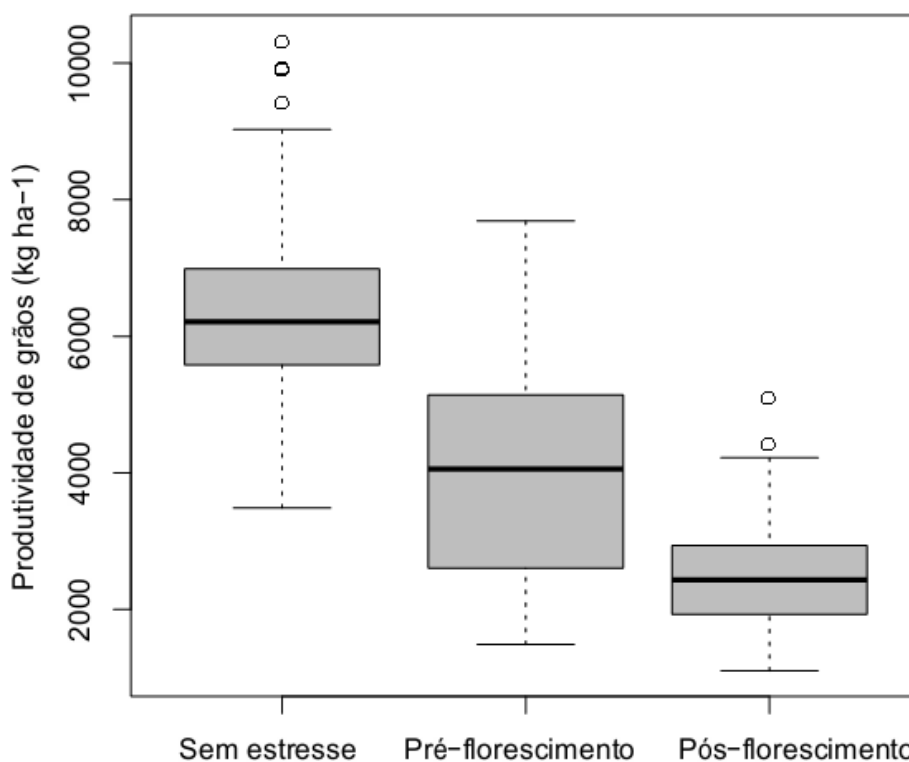


Figura 6. Produtividade de grãos em híbridos de sorgo cultivados sob três condições de água (sem estresse hídrico, estresse hídrico pré-florescimento e estresse hídrico pós-florescimento). Nova Porteirinha-MG, 2018.

O rendimento sob estresse pré-florescimento foi afetado pela redução na altura da planta, índice de área foliar fotossinteticamente ativa e peso seco da parte aérea, enquanto que no pós-florescimento a produtividade foi afetada pela redução no índice de área foliar fotossinteticamente ativa, índice de clorofila SPAD e taxa de assimilatória líquida. O índice de área foliar fotossinteticamente ativa foi reduzido em ambas às condições de estresse, demonstrando ser uma característica importante na seleção de híbridos para tolerância à seca. Uma redução na área foliar e na fotossíntese líquida eventualmente reduz a taxa assimilatória líquida, com consequente redução no tamanho de grão sob estresse hídrico pós-florescimento.

6 CONCLUSÕES

A redução na eficiência fotossintética da planta causada pelo estresse hídrico afetou os parâmetros de crescimento dos híbridos de sorgo granífero.

O estresse hídrico pré-florescimento afetou principalmente a altura de plantas, o índice de área foliar e a massa seca da parte aérea. O estresse hídrico pós-florescimento afetou principalmente o índice de área foliar, o índice de clorofila SPAD e a taxa assimilatória líquida.

O estresse hídrico após o florescimento foi o que mais afetou a cultura em termos fisiológicos e de produção.

7 AGRADECIMENTOS

A Embrapa Milho e Sorgo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos recursos financeiros e bolsas para execução do projeto.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M. A.; ABBAS, A.; AWAN, S. I.; JABRAN, K.; GARDEZI, D. A. S. Correlated response of various morpho-physiological characters with grain yield in sorghum landraces at different growth phases. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 21, n. 4, p. 671-679, 2011.

ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant

abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007.

AUMONDE, T. Z.; LOPES, N. F.; MORAES, D. M.; PEIL, R. M. N.; PEDÓ, T. Análise de crescimento do híbrido de mini melancia Smile® enxertada e não enxertada. **Interciencia**, v. 36, n. 9, p. 677-681, 2011.

ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S. A.; PRASAD, V. P. V. Grain Sorghum Water Requirement and Responses to Drought Stress: A Review. **Crop Management**, v. 9, n.1, p. 1-11, 2010.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: Noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2003. 41p.

BORRELL, A. K.; MULLET, J. E.; GEORGE-JAEGGLI, B.; VAN OOSTEROM, E. J.; HAMMER, G. L.; KLEIN, P. E.; JORDAN, D. R. Drought adaptation of stay-green sorghum is associated with canopy development, leaf anatomy, root growth, and water uptake. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, p. 6251-6263, 2014.

BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. editors. **Physiology and Biotechnology Integration for Plant Breeding**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 141-223.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 27 set. 2018.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

KASSAHUN, B.; BIDINGER, F. R.; HASH, C. T.; KURUVINASHETTI, M. S. Stay-green expression in early generation sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] QTL introgression lines. **Euphytica**, v. 172, n. 3, p. 351-362, 2010.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A. Clima. In: RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). **Cultivo do sorgo**. 8. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Sistema de produção, 2).

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 102, n. 1, p. 15-27, 2004.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; MAY, A.; LIMA FILHO, O. F.; SANTOS, F. C.; MOREIRA, J. A. A.; LEITE, C. E. P.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; FREITAS, R. S. Exigências edafoclimáticas e fisiologia da produção. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. C. (Eds.). **Sorgo: do plantio à colheita**, p. 58-88. Viçosa: UFV, 2014.

- MENEZES, C. B.; SALDANHA, D. C.; SANTOS, C. V.; ANDRADE, L. C.; MINGOTE JÚLIO, M. P.; PORTUGAL, A. F.; TARDIN, F. D. Evaluation of grain yield in sorghum hybrids under water stress. **Genetics and Molecular Research**, v.14, p.12675-12683, 2015.
- PAUL, V.; PANDEY, R.; PAL, M. Manual of ICAR Sponsored Training Programme for Technical Staff of ICAR Institutes on “**Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants**”. Division of Plant Physiology, ICAR-Indian Agricultural Research Institute (IARI), New Delhi, India, 2017. 130p.
- PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, 2007.
- PRASAD, P. V. V.; PISIPATI, S. R.; MUTAVA, R. N.; TUINSTRA, M. R. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. **Crop Science**, v. 48, p. 1911- 1917, 2008.
- RAMAZANZADEH, S.; ASGHARIPOUR, M. R. Physiological growth responses of sorghum genotypes to impairment of plant photosynthesis using potassium iodide. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1884-1890, 2011.
- R Development Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 08 fev. 2018.
- RAUF, S. Breeding sunflower (*Helianthus annuus* L.) for drought tolerance. **Communications in Biometry and Crop Science**, v. 3, n. 1, p. 29-44, 2008.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 5. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- 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 agrônômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, p.102-117, 2013.
- TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; MILLER, F. R. Yield component analysis of grain sorghum grown under water stress. **Field Crops Research**, v. 145, p. 44-51, 2013.
- TUBEROSA, R. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. **Frontiers in Physiology**, v.3, p. 1-26, 2012.
- VILELA, E. F.; BÜLL, L. T. Avaliação do crescimento de plantas de milho em função de doses de potássio e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 281-289, 1999.
- XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Plant responses to drought and rewatering. **Plant Signaling & Behavior**, v. 5, n. 6, p. 649-654, 2010.

ARTIGO CIENTÍFICO III

CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE TRILHA EM SORGO GRANÍFERO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE ESTRESSE HÍDRICO

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar critérios de seleção indireta para produtividade de grãos na cultura do sorgo granífero, na presença e ausência de estresse hídrico, por meio de análise gráfica baseada em componentes principais e utilizando correlações fenotípicas e análise de trilha. Foram avaliados 16 híbridos de sorgo granífero em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com três repetições. Os caracteres avaliados foram produtividade de grãos, ângulo de raiz, massa seca da parte aérea, índice de área foliar fotossinteticamente ativa, índice de colheita de panícula, número de dias para o início do florescimento, altura da planta, massa de mil grãos, índice de clorofila SPAD aos 75 e 90 dias após a semeadura. Foi realizada a análise de componentes principais, a correlação fenotípica e a análise de trilha entre os caracteres avaliados nos ensaios com e sem estresse hídrico, nos três anos de cultivo. A condição hídrica influenciou a magnitude das correlações entre a produtividade de grãos e a maioria dos caracteres agronômicos. O índice de colheita de panícula, a massa de mil grãos e o índice de área foliar fotossinteticamente ativa podem ser utilizados para auxiliar na seleção de genótipos de sorgo para produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.), produtividade de grãos, restrição hídrica, caracteres agronômicos.

CORRELATION AND PATH ANALYSIS IN GRAIN SORGHUM AT THE PRESENCE AND ABSENCE OF WATER STRESS

2 ABSTRACT

The objective of this work was to identify indirect selection criteria for grain yield in the grain sorghum culture, in the presence and absence of water stress, through graphic analysis based on main components and using phenotypic correlations and path analysis. Dezesesseis híbridos de sorgo foram avaliados em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. The experimental design was a randomized block design, with three replications. The evaluated traits were grain yield, root angle, shoot dry matter, photosynthetically active leaf area index, panicle harvest index, number of days for flowering start, plant height, one thousand grain mass, index of SPAD chlorophyll at 75 and 90 days after sowing. The principal components analysis, the phenotypic correlation and the trail analysis among the evaluated traits were carried out in the trials with and without water stress, during the three years of cultivation. The water condition influenced the magnitude of the correlations between grain yield and most agronomic traits. The panicle harvest index, the mass of a thousand grains and the index of photosynthetically active leaf area can be used to assist the selection of sorghum genotypes for grain yield.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L.), grain yield, water restriction, traits agronomics.

3 INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) apresenta grande importância na alimentação humana e produção de rações para animais em várias regiões do globo, sendo o quinto cereal mais importante do mundo. A produção brasileira na safra 2017/18 foi de 2,136 milhões de toneladas, em uma área de 782,2 mil hectares, com rendimento médio de 2.731 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

Em decorrência de um sistema radicular denso e profundo, da capacidade de reduzir a transpiração através do enrolamento foliar e fechamento estomático e de processos metabólicos reduzidos, o sorgo apresenta uma boa adaptação aos ambientes com pouca disponibilidade de água (BLUM, 2004; REDDY et al., 2009).

Entretanto, mesmo sendo um dos cereais mais tolerantes à seca, sob forte restrição hídrica, o sorgo pode sofrer danos significativos durante o desenvolvimento (REDDY et al., 2011), sendo esses danos mais severos durante os estádios reprodutivos. A redução dos impactos proporcionados pela seca pode ser obtida por meio da seleção de genótipos com desenvolvimento satisfatório em condições de estresse hídrico.

Um grande desafio no melhoramento de plantas é a utilização de vários caracteres que possam auxiliar na seleção daqueles que são de fato importantes, como a produtividade de grãos para boa parte das culturas. Assim, a utilização desses caracteres para seleção de genótipos de sorgo granífero tolerantes à seca, visa à determinação de materiais produtivos combinado com maior tolerância ao déficit hídrico.

A variabilidade genética para cada caráter, considerando a magnitude, sentido e a natureza da associação entre estes e o caráter de maior importância são aspectos importantes a serem considerados na seleção. O grau de associação entre caracteres pode ser determinado através do coeficiente de correlação, que mede sua intensidade e direção (WARKAD et al., 2010), bem como através de métodos gráficos, baseados em componentes principais, como o GGE Biplot (YAN e TINKER, 2006). A seleção em um caráter com foco em outro, denominada seleção indireta, pode ser de fato efetiva quando tal caráter tem alta herdabilidade e alta correlação com o caráter de interesse (CRUZ et al., 2004), principalmente quando este último tem baixa herdabilidade, como é a produtividade de grãos em sorgo.

Entretanto, embora forneça a magnitude e o sentido da associação entre caracteres tomados dois a dois, o coeficiente de correlação não fornece a importância relativa dos

efeitos diretos e indiretos de vários caracteres sobre um determinado caráter escolhido em função de sua importância. Informações neste nível podem ser obtidas através da análise de trilha, já que tal procedimento consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável básica (CRUZ et al., 2004). Desta forma, a importância da influência de cada variável sobre aquela de maior importância, como a produtividade de grãos, pode ser determinada (CHAVAN et al., 2011; DHUTMAL et al., 2014).

O objetivo deste trabalho foi identificar critérios de seleção indireta para produtividade de grãos na cultura do sorgo granífero, na presença e na ausência de estresse hídrico, através de análise gráfica baseada em componentes principais e utilizando correlações fenotípicas e análise de trilha.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram instalados em área experimental localizada em Nova Porteirinha-MG. As coordenadas geográficas são 15°48'10" de latitude Sul e 43°18'03" de longitude Oeste. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-amarelo de textura média. O clima é semiárido com chuvas irregulares, sendo uma região ideal para ensaios de tolerância à seca, pois seu maior índice pluviométrico está concentrado nos meses de novembro a março, tendo uma época seca bem definida entre os meses de maio a outubro, permitindo que o controle de água durante a condução do experimento seja realizado apenas pela irrigação. Os dados referentes à temperatura máxima e mínima e precipitação no período de condução do experimento encontram-se na Figura 1.

Foram avaliados 16 híbridos de sorgo granífero pertencentes às principais empresas de sorgo do país (BRS 310, BRS 330, BRS 332, BRS 373, 1167048, 1167092, 1105661, 1G 100, 1G 220, 1G 282, 50A10, 50A70, BM 737, A9904, AG 1040, AG 1080, AG 1090, AS 4625, AS 4639, DKB 590).

Os híbridos foram cultivados em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nos ensaios com estresse hídrico, a irrigação foi cortada aos 45 dias após a semeadura, na época em que a maioria dos híbridos se encontravam no estágio de emborrachamento, para que o estresse hídrico ocorresse no início ou logo após o florescimento. Nos ensaios sem estresse hídrico a irrigação foi realizada até a maturação fisiológica dos grãos. Em todos os ensaios utilizou-se irrigação por aspersão convencional, com os aspersores espaçados 12,0 x 12,0 m, pressão de serviço de 250 kPa, bocais de 4,0

x 2,6 mm de diâmetro e com vazão de $1,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O manejo da irrigação foi realizado com base na evapotranspiração da cultura.

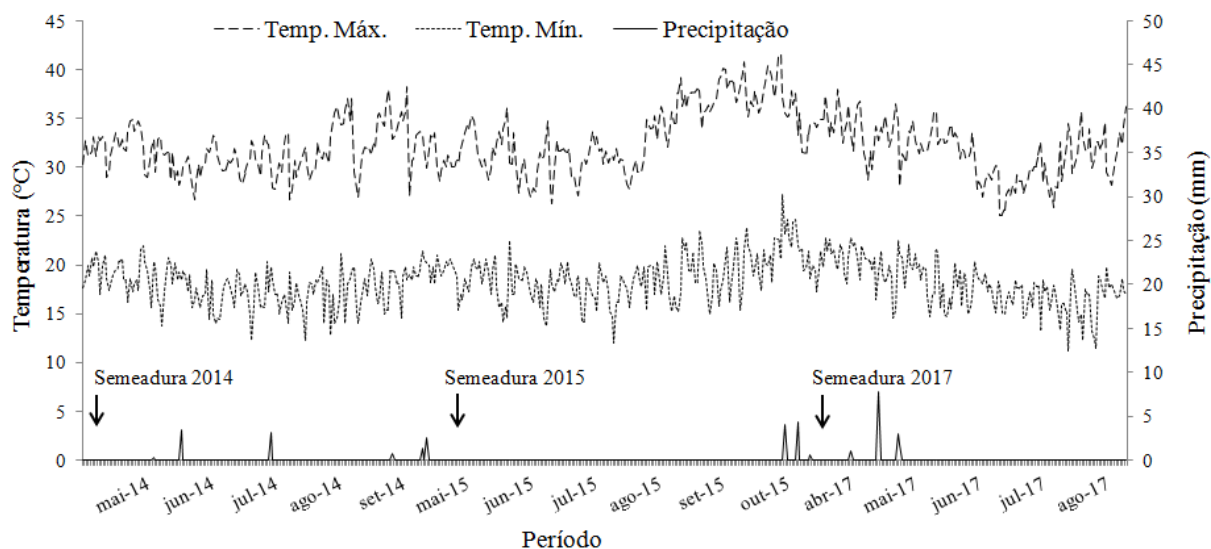


Figura 1. Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), nos anos de 2014, 2015 e 2017, em Nova Porteirinha-MG (Fonte: INMET, 2018).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com três repetições. As parcelas foram compostas de quatro fileiras de 3 m de comprimento, sendo considerada área útil às duas fileiras centrais.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens em pré-plantio. A adubação foi realizada de acordo com os resultados de análise de solo e a exigência da cultura, sendo que em Nova Porteirinha-MG foram utilizados 250 kg ha^{-1} da fórmula 8-28-16 (N-P₂O₅-K₂O) no plantio, além de 72 kg ha^{-1} de N em cobertura, usando como fonte nitrogenada a ureia, aos 30 dias após o plantio. A semeadura foi realizada de forma manual, sendo semeadas $20 \text{ sementes m}^{-1}$. Aos 20 dias após a semeadura foi realizado um desbaste deixando $10 \text{ plantas m linear}^{-1}$, para obter um estande final de $200.000 \text{ plantas ha}^{-1}$.

Os caracteres avaliados foram: produtividade de grãos (PROD); ângulo de raiz (RAIZ), determinado através do protocolo de campo *shovelomics*, para caracterizar a arquitetura da raiz no campo, proposto por Trachsel et al. (2011); massa seca da parte aérea (MS), índice de área foliar fotossinteticamente ativa (IAF); índice de colheita de panícula (ICP), determinado através da relação, em porcentagem, da massa de grãos e da massa de

panículas (panículas e grãos); número de dias para o início do florescimento (NDF); altura da planta (ALT); massa de mil grãos (MMG); índice de clorofila SPAD aos 75 (IS75) e 90 dias após a semeadura (IS90).

Foram estimados os coeficientes de correlação fenotípica de Pearson entre os caracteres avaliados nos ensaios com e sem estresse hídrico, nos três anos de cultivo. O método GGE Biplot (YAN e TINKER, 2006), utilizando a análise dos componentes principais (PC), baseado em dados de matriz de correlação de classificação foi utilizado para elucidar graficamente as relações entre os caracteres agronômicos.

Para realização da análise de trilha primeiramente foi realizado o diagnóstico de multicolinearidade com base nas matrizes de correlação fenotípicas, conforme os critérios sugeridos por Montgomery e Peck (1981). Posteriormente foi realizada a análise de trilha, considerando-se a produtividade de grãos como variável dependente principal e os demais caracteres como variáveis independentes (explicativas). As análises de correlações e de trilha foram realizadas utilizando-se o programa Genes (CRUZ, 2013). Já, a análise biplot, foi desenvolvida com auxílio do pacote GGEGui implementado no software R (R Development Core Team, 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estimativa das correlações fenotípicas variou muito nas condições com e sem estresse hídrico, observando-se expressiva alteração no que tange a magnitude e significância de uma condição hídrica para outra (Tabela 1). Na condição com estresse hídrico, os caracteres que apresentaram correlações significativas e de maiores magnitudes com a variável principal, produtividade de grãos, foram índice de colheita de panículas, índice de área foliar e massa de mil grãos. Os caracteres massa seca da parte aérea e altura também apresentaram correlação positiva com a produtividade de grãos, porém de menor magnitude (Tabela 1). Baseado nesses resultados observa-se que esses caracteres possuem potencial para serem utilizados em programas de melhoramento para auxiliarem na seleção de genótipos de sorgo granífero mais produtivos em condições de estresse hídrico.

Tabela 1. Coeficiente de correlação fenotípica entre os caracteres agrônômicos, em 16 genótipos de sorgo granífero, nas condições sem estresse hídrico (acima da diagonal) e com estresse hídrico (abaixo da diagonal), em 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

	Prod	Raiz	MS	IAF	ICP	NDF	ALT	MMG	IS75	IS90
Prod		0,25	0,50*	0,12	0,50*	-0,42	0,46	0,67**	-0,36	-0,12
Raiz	0,25		-0,30	-0,53*	0,02	-0,46	0,20	-0,01	0,07	-0,10
MS	0,49	-0,16		0,59*	0,60*	0,03	0,18	0,72**	-0,19	0,10
IAF	0,52*	0,04	0,80**		0,27	0,57*	-0,11	0,57*	0,26	0,34
ICP	0,87**	0,12	0,51*	0,44		-0,13	0,16	0,56*	-0,13	-0,15
NDF	-0,28	-0,37	0,28	0,36	-0,25		-0,04	0,02	0,29	0,28
ALT	0,48	0,21	0,43	0,41	0,37	-0,17		0,20	-0,38	-0,28
MMG	0,60*	0,06	0,68**	0,75**	0,59*	-0,18	0,23		0,02	0,28
IS75	0,29	-0,01	0,41	0,46	0,34	0,49	0,02	0,17		0,79**
IS90	0,21	-0,36	0,59*	0,51*	0,27	0,61*	0,04	0,16	0,64*	

** , * significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente, sobre os caracteres produtividade de grãos (Prod), ângulo de raiz (Raiz), massa seca da parte aérea (MS), índice de área foliar fotossinteticamente ativa (IAF), índice de colheita de panícula (ICP), número de dias para o início do florescimento (NDF), altura da planta (ALT), massa de mil grãos (MMG), índice de clorofila SPAD aos 75 dias após a semeadura (IS75) e índice de clorofila SPAD aos 90 dias após a semeadura (IS90).

Na condição sem estresse hídrico, ao analisar a correlação dos caracteres com a produtividade de grãos, observou-se que a massa de mil grãos, índice de colheita de panícula e massa seca da parte aérea foram os únicos caracteres que apresentaram correlação significativa com a produtividade de grãos (Tabela 1). A baixa correlação da maioria dos caracteres com a produtividade de grãos na condição sem estresse hídrico possibilita inferir que, em condições ideais de suprimento hídrico, os caracteres morfofisiológicos avaliados neste trabalho, com exceção de MMG, ICP e MS, não são discriminantes para seleção de híbridos de sorgo granífero com alta produtividade de grãos.

A massa de mil grãos e o número de grãos por planta são caracteres de grande influência na determinação da produtividade de grãos do sorgo granífero, principalmente em condições de estresse hídrico. A planta de sorgo granífero apresenta resposta diferenciada para esses caracteres, de acordo com a fase de desenvolvimento em que

ocorre a estresse hídrico. Segundo Mutava et al. (2011), o estresse hídrico antes da antese, afeta principalmente o número de grãos por planta. Quando o estresse hídrico ocorre após a antese, como no presente trabalho, a falta de água interfere principalmente no enchimento de grãos, proporcionando redução no tamanho e massa de grãos e conseqüentemente na produtividade.

O índice de área foliar (IAF), na condição com estresse hídrico, além da correlação positiva e significativa com a produtividade de grãos, foi positivamente correlacionado com a massa de mil grãos, massa seca, índice de clorofila SPAD aos 90 dias após a semeadura (Tabela 1). O IAF é uma característica que pode auxiliar na identificação de genótipos com tolerância à seca, já que o estresse hídrico limita o crescimento das folhas, apresentando, dessa forma, efeito em outras características morfofisiológicas das plantas. Além do mais, o IAF apresenta relação direta com a fotossíntese da planta (TAIZ et al., 2017), portanto menor IAF proporcionará redução na produção de fotoassimilados, pela redução da área fotossintetizante da planta, acarretando em menor produção de massa seca pela planta.

Neste estudo, o índice de clorofila SPAD não esteve entre os caracteres que mais auxiliaram na explicação da produtividade de grãos dos genótipos de sorgo granífero, apresentando baixa correlação com a produtividade sob estresse hídrico e correlações negativas com a produtividade na condição sem estresse hídrico. Geralmente, plantas de sorgo que mantêm maior índice de clorofila SPAD por maior período apresentam maiores produtividades de grãos, principalmente em condições de estresse hídrico. Segundo Castro et al. (2009), uma redução no conteúdo de clorofila das plantas pode apresentar impacto direto na produtividade, por reduzir a eficiência fotossintética da planta. Ainda, de acordo com Dhutmal et al. (2014), a leitura do medidor de clorofila SPAD, em condições de déficit de água, indica que a maior concentração de clorofila é vital para a adaptação às condições de déficit hídrico durante o período pós-florescimento.

A altura de plantas foi positivamente correlacionada com a produtividade de grãos nas condições com e sem estresse hídrico. Dessa forma, no geral, os híbridos mais altos também foram os mais produtivos nas duas condições hídricas. Isso ocorre por que plantas mais altas apresentam colmo maior, e o colmo além de suportar as folhas e as partes florais, também serve como importante órgão de reserva de produtos fotoassimilados que serão translocados para os grãos, durante o período de enchimento dos grãos (ALVIM et al., 2011).

A massa seca da parte aérea das plantas, na condição com estresse hídrico, apresentou correlação positiva e significativa com as características IAF, ICP, MMG e IS90. Já, na condição sem estresse hídrico, apresentou correlação significativa IAF, ICP, MMG (Tabela 1).

Houve alta correlação entre o índice de clorofila SPAD nas duas épocas de avaliações (75 e 90 dias após a semeadura), nas condições com e sem estresse hídrico (Tabela 1), indicando que os genótipos que apresentaram alto índice de clorofila SPAD aos 75 DAS também mantiveram valores superiores aos demais híbridos aos 90 DAS.

O ângulo de raiz (RAIZ) apresentou baixa magnitude de correlação com a produtividade de grãos e com os demais caracteres nas condições com e sem estresse hídrico, não apresentando efeito discriminante para seleção dos genótipos mais produtivos nas duas condições hídricas avaliadas. Já, Hund et al. (2009), avaliando linhagens contrastantes de milho para tolerância à seca, concluíram que a expansão do sistema radicular para obter água subterrânea foi uma das principais características responsáveis pela tolerância. De acordo com Trachsel et al. (2011), a avaliação do ângulo de raiz pelo protocolo *shovelomics* permite uma seleção visual rápida de fenótipos que possuem arquitetura de raízes que são bem adaptadas para a eficiente aquisição de água e nutrientes em ambientes marginais. Em condições de estresse hídrico, as raízes das plantas de sorgo podem direcionar o crescimento na vertical para buscar água em maiores profundidades, perfazendo, dessa forma, uma adaptação das plantas de sorgo granífero para sobrevivência em condições de déficit hídrico.

Através da análise de componentes principais (PC) foi possível verificar as relações entre todos os caracteres baseado na classificação de correlação. Na condição sem estresse hídrico (Figura 2a), os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), explicaram 60,25% da variação total. Na condição com estresse hídrico (Figura 2b), os dois primeiros componentes principais explicaram 66,86% da variação total.

No biplot, caracteres plotados com coordenadas próximas a outros caracteres, ou seja, com menores ângulos, apresentam alta correlação. Na condição sem estresse hídrico (Figura 2a), as maiores correlações com a produtividade de grãos foram com os caracteres índice de colheita de panícula, altura, massa de mil grãos e massa seca. Correlações baixas com a produtividade de grãos foram verificadas com o índice de clorofila SPAD aos 75 e 90 dias após a semeadura e número de dias para o florescimento. Altas associações foram verificadas entre a massa seca e massa de mil grãos, índice de clorofila SPAD aos 75 e aos

90 dias após a semeadura e número de dias para o florescimento e índice de clorofila SPAD aos 90 dias após a semeadura.

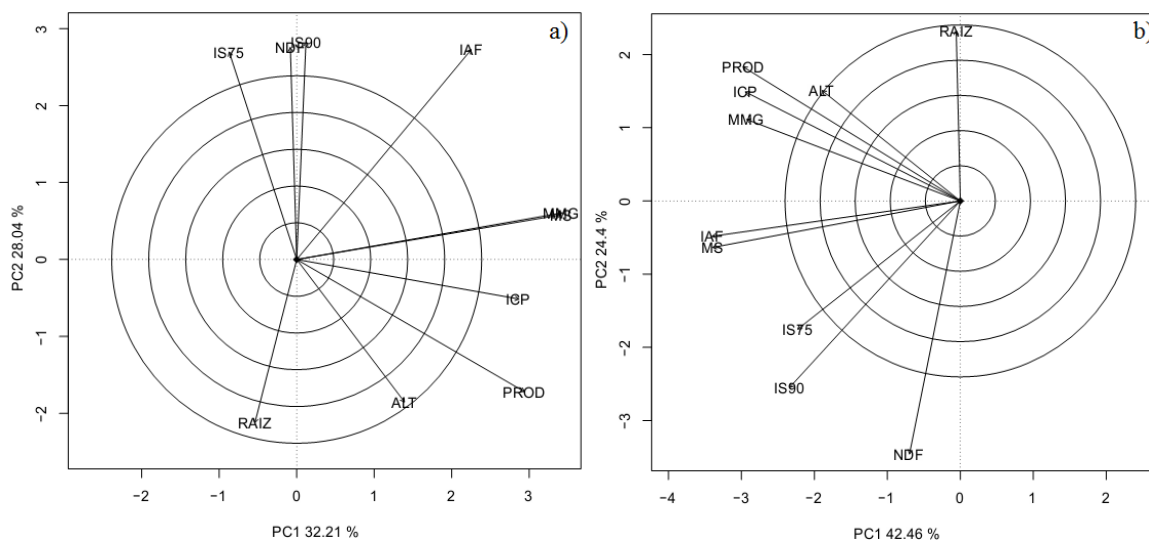


Figura 2. Relação entre os 10 caracteres agrônômicos pelo modelo GGE biplot de 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados nas condições sem estresse hídrico (a) e com estresse hídrico (b), nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

Na condição com estresse hídrico (Figura 2b), verifica-se que os caracteres com maior correlação com a produtividade de grãos foram ICP, massa de mil grãos e altura de plantas. O caractere NDF apresentou menor associação com a produtividade de grãos, indicado por seu maior ângulo no biplot com a produtividade de grãos. Altas correlações também podem ser verificadas entre o índice de clorofila SPAD aos 75 e aos 90 dias após a semeadura e entre o IAF e massa seca.

Os resultados obtidos a partir dos gráficos biplot confirmam a análise de correlação, porém, possibilitam interpretação mais fácil, além de permitir a observação da relação entre vários caracteres ao mesmo tempo, mostrando-se como uma importante ferramenta para avaliações visando à seleção de caracteres que auxiliem na seleção de genótipos tolerantes ao estresse hídrico.

O grau de multicolinearidade da matriz de correlações, entre as variáveis independentes do modelo de trilha, foi considerado fraco, pois a razão entre o maior e o menor autovalor da matriz de correlações foi inferior a 100 nas duas condições hídricas, não ocasionando problemas para a realização da análise, possibilitando a utilização de todas as variáveis na trilha.

Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre a produtividade de grãos. Os coeficientes de determinação (R^2) no modelo da análise de trilha, nas condições com e sem estresse hídrico, foram 0,838 e 0,803, respectivamente, e os efeitos residuais foram 0,402 e 0,444, respectivamente.

Tabela 2. Estimativas dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres explicativos sobre a produtividade de grãos da análise de trilha com 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados na condição com estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

Efeito	Raiz	MS	IAF	ICP	NDF	ALT	MMG	IS75	IS90	
Direto sobre Prod	0,069	-0,147	0,373	0,736	-0,194	0,076	-0,085	-0,020	0,082	
Indireto via Raiz		-0,011	0,003	0,008	-0,026	0,015	0,004	-0,001	-0,025	
Indireto via MS	0,024		-0,118	-0,078	-0,042	-0,064	-0,100	-0,060	-0,090	
Indireto via IAF	0,016	0,300		0,167	0,132	0,154	0,279	0,172	0,191	
Indireto via ICP	0,090	0,388	0,330		-0,191	0,286	0,444	0,259	0,200	
Indireto via NDF	0,073	-0,057	-0,070	0,051		0,033	0,035	-0,095	-0,121	
Indireto via ALT	0,016	0,033	0,031	0,029	-0,013		0,018	0,002	0,003	
Indireto via MMG	-0,005	-0,058	-0,064	-0,051	0,015	-0,020		-0,015	-0,014	
Indireto via IS75	0,001	-0,008	-0,009	-0,007	-0,010	-0,001	-0,003		-0,013	
Indireto via IS90	-0,030	0,049	0,042	0,022	0,050	0,003	0,013	0,053		
Total	0,254	0,489	0,518	0,879	-0,281	0,483	0,605	0,296	0,216	
Coeficiente de determinação						0,838				
Efeito da variável residual						0,402				

¹Prod: produtividade de grãos; Raiz: ângulo de raiz; MS: massa seca da parte aérea; IAF: índice de área foliar fotossinteticamente ativa; ICP: índice de colheita de panícula; NDF: número de dias para o início do florescimento; ALT: altura da planta; MMG: massa de mil grãos; IS75: índice de clorofila SPAD aos 75 dias após a semeadura; IS90: índice de clorofila SPAD aos 90 dias após a semeadura.

Os maiores valores dos efeitos diretos sobre a produtividade de grãos, no ambiente com estresse hídrico, foram observados para os caracteres índice de colheita de panícula e índice de área foliar. No ambiente sem estresse hídrico os caracteres índice de área foliar e índice de clorofila SPAD aos 90 dias apresentaram maiores efeitos diretos positivos sobre a produtividade de grãos. O número de dias para o florescimento apresentou alto efeito

negativo direto sobre a produtividade de grãos (Tabelas 2 e 3). Porém, apenas o índice de colheita de panículas sob estresse hídrico e o índice de área foliar no ambiente sem estresse hídrico apresentaram efeitos diretos sobre a produtividade de grãos superiores ao efeito residual. Assim, para essas características o efeito sobre a produtividade de grãos é direto e as demais características explicativas influenciam a variável principal apenas indiretamente, apresentando importância em conjunto.

Tabela 3. Estimativas dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres explicativos sobre a produtividade de grãos da análise de trilha com 16 genótipos de sorgo granífero, cultivados na condição sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

Efeito	Raiz	MS	IAF	ICP	NDF	ALT	MMG	IS75	IS90
Direto sobre Prod	0,246	-0,269	0,525	0,189	-0,487	0,293	0,307	-0,575	0,369
Indireto via Raiz		-0,073	-0,133	0,012	-0,113	0,050	-0,001	-0,018	-0,025
Indireto via MS	0,080		-0,159	-0,179	-0,009	-0,049	-0,193	0,051	-0,028
Indireto via IAF	-0,285	0,309		0,125	0,300	-0,063	0,299	0,134	0,180
Indireto via ICP	0,010	0,126	0,045		-0,039	0,035	0,114	-0,037	-0,032
Indireto via NDF	0,224	-0,016	-0,275	0,010		0,019	-0,009	-0,139	-0,135
Indireto via ALT	0,060	0,053	-0,035	0,055	-0,012		0,059	-0,112	-0,083
Indireto via MMG	-0,002	0,221	0,175	0,184	0,005	0,061		0,007	0,087
Indireto via IS75	-0,042	0,109	-0,147	0,114	-0,165	0,220	-0,013		-0,456
Indireto via IS90	-0,037	0,038	0,127	-0,063	0,102	-0,105	0,104	0,292	
Total	0,254	0,498	0,123	0,538	-0,420	0,462	0,666	-0,362	-0,123
Coeficiente de determinação						0,803			
Efeito da variável residual						0,444			

¹Prod: produtividade de grãos; Raiz: ângulo de raiz; MS: massa seca da parte aérea; IAF: índice de área foliar fotossinteticamente ativa; ICP: índice de colheita de panícula; NDF: número de dias para o início do florescimento; ALT: altura da planta; MMG: massa de mil grãos; IS75: índice de clorofila SPAD aos 75 dias após a semeadura e IS90: índice de clorofila SPAD aos 90 dias após a semeadura.

Chavan et al. (2011), em trabalho avaliando a correlação e análise de trilha no sorgo, observaram que as características comprimento de panícula, altura da planta, dias para 50% do florescimento e número de grãos por panícula apresentaram efeito direto

positivo sobre o rendimento de grãos por panícula. Warkad et al. (2010), observaram que as características dias para 50% do florescimento, comprimento de panícula, massa de mil grãos e número de folhas exibiram o efeito direto positivo mais elevado sobre o rendimento de grãos por planta. Ezeaku e Mohammed (2006), observaram que o peso da panícula teve o efeito direto mais alto sobre o rendimento de grãos, enquanto que a massa de mil grãos contribuiu indiretamente para o rendimento de grãos através do peso de panícula.

Neste trabalho, o ICP e o IAF foram os caracteres que apresentaram maiores efeitos indiretos sobre as demais características, sendo importantes para utilização em conjunto com os demais caracteres para auxiliarem na seleção de genótipos mais produtivos. Tardin et al. (2013) e Menezes et al. (2015), observaram que o ICP foi uma importante característica para explicar o aumento da produtividade de grãos de sorgo nos ambientes com e sem estresse hídrico, considerando que essa característica pode ser utilizada para auxiliar na seleção de genótipos.

Nas duas condições hídricas o NDF apresentou efeito direto negativo sobre a produtividade de grãos. Logo, principalmente sob estresse hídrico pós-florescimento, os genótipos mais precoces foram mais produtivos. Isso pode ser explicado pelo fato que genótipos de ciclo mais curto completam o ciclo antes que os efeitos do estresse hídrico sejam agravados. O escape do estresse hídrico, observado pela antecipação do ciclo, é uma importante estratégia de tolerância do sorgo ao estresse hídrico pós-florescimento. Tardin et al. (2013), em trabalho avaliando híbridos de sorgo granífero sob irrigação e estresse hídrico, observaram que a precocidade foi importante para explicar a produtividade de grãos apenas nas condições de estresse hídrico.

A partir dos resultados deste trabalho pode-se inferir que a avaliação dos caracteres morfofisiológicos índice de colheita de panícula, massa de mil grãos e índice de área foliar fotossinteticamente ativa, que são de fácil mensuração e de custo relativamente baixo, podem auxiliar de forma considerável programas de melhoramento genético do sorgo granífero visando à obtenção de genótipos tolerantes à seca.

6 CONCLUSÕES

A condição hídrica influencia a magnitude das correlações entre a produtividade de grãos e a maioria dos caracteres agronômicos.

O índice de colheita de panícula, a massa de mil grãos e o índice de área foliar fotossinteticamente ativa podem ser utilizados para auxiliar na seleção de genótipos de sorgo para produtividade de grãos.

7 AGRADECIMENTOS

A Embrapa Milho e Sorgo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos recursos financeiros e bolsas para execução do projeto.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVIM, K. R. T.; BRITO, C. H.; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Redução da área foliar em plantas de milho na fase reprodutiva. **Revista Ceres**, v.58, n.4, p.413-418, 2011.
- BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. editors. **Physiology and Biotechnology Integration for Plant Breeding**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 141-223.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.
- CHAVAN, S. K.; MAHAJAN, R. C.; FATAK, S. U. Correlation and path analysis studies in sorghum. **Crop Research**, v. 42, p. 246-250, 2011.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 5, Safra 2017/18, n.12. Décimo Segundo Levantamento, Brasília, 2018. 148 p.
- 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.
- DHUTMAL, R. R.; MORE, A. W.; KALPANDE, H. V.; MUNDHE, A. G.; SAYYAD ABU BAKAR A. J.; AUNDHEKAR, R. L. Correlation and Path Analysis Studies in Post Rainy Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.) Genotypes. **Journal of Agroecology and Natural Resource Management**, v. 1, n. 4, p. 258-262, 2014.
- EZEAKU, I. E.; MOHAMMED, S. G. Character association and path analysis in grain sorghum. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, p. 1337-1340, 2006.

HUND, A.; RUYA, N.; LIEDGENS, M. Rooting depth and water use efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance. **Plant and Soil**, v. 318, p. 311-325, 2009.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. 2018. **Dados históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

MENEZES, C. B.; SALDANHA, D. C.; SANTOS, C. V.; ANDRADE, L. C.; MINGOTE JÚLIO, M. P.; PORTUGAL, A. F.; TARDIN, F. D. Evaluation of grain yield in sorghum hybrids under water stress. **Genetics and Molecular Research**, v.14, p.12675-12683, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; PECK E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley e Sons 1981. 504p.

MUTAVA, R. N.; PRASAD, P. V. V.; TUINSTRA, M. R.; KOFOID, K. D.; YU, J. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crops Research**, v. 123, p. 10-18, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 05 set. 2017.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S.; KUMAR, A. A. Genetic enhancement for drought tolerance in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 31, p. 189-222, 2009.

REDDY, B. V. S.; KUMAR A. A.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. **Sorghum genetic enhancement for climate change adaptation**. In: Crop Adaptation to Climate Change. 1 ed. (YADAV, S. S. et al., eds.). Wiley-Blackwell, Oxford, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

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 agrônômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, p.102-117, 2013.

TRACHSEL, S.; KAEPLER, S. M.; BROWN, K. B.; LYNCH, J. P. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant Soil**, v. 341, p. 75-87, 2011.

YAN, W.; TINKER, A. Biplot analysis of multi environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006.

WARKAD, Y. N.; TIDKE, R. T.; MASKE, N. M.; KHARDE, A.V.; POTDUKHE, N. R. Character association and path analysis in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **International Journal of Agricultural Sciences**, v. 6, n. 1, p. 100-104, 2010.

ARTIGO CIENTÍFICO IV

ÍNDICES DE SELEÇÃO PARA IDENTIFICAR GENÓTIPOS DE SORGO GRANÍFERO TOLERANTES AO ESTRESSE HÍDRICO

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de diferentes índices na identificação de híbridos de sorgo granífero adaptados aos ambientes com e sem estresse hídrico. Foram avaliados 16 híbridos de sorgo granífero em ambientes com e sem estresse hídrico, em três anos de cultivo. Nos ensaios com estresse hídrico, a irrigação foi suspensa aos 45 dias após a semeadura, pouco antes do florescimento. Nos ensaios sem estresse hídrico os híbridos foram irrigados até a maturação fisiológica dos grãos. As parcelas foram compostas de quatro fileiras de 3 m de comprimento, sendo considerada área útil às duas fileiras centrais. Os índices de tolerância à seca por híbrido foram calculados com base no rendimento de grãos por parcela para os ambientes com estresse hídrico, sem estresse hídrico e significância do rendimento de grãos em condições com estresse e sem estresse hídrico. O estresse hídrico proporcionou redução no rendimento de grãos dos genótipos de sorgo nos três anos de cultivo. Os índices MP (produtividade média), GMP (produtividade média geométrica) e MRP (desempenho relativo médio) foram mais adequados para seleção de genótipos de sorgo tolerantes ao estresse hídrico pós-florescimento.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, rendimento de grãos, estresse hídrico, índices de tolerância.

SELECTION INDICES FOR IDENTIFYING GRAIN SORGHUM GENOTYPES TOLERANT TO WATER STRESS

2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the efficiency of different indices in the identification of sorghum hybrids adapted to environments with and without water stress. Sixteen hybrids of sorghum were evaluated in environments with and without water stress in three years of cultivation. In trials with water stress, irrigation was suspended at 45 days after sowing, shortly before flowering. In the tests without water stress the hybrids were irrigated until the physiological maturity of the grains. The plots were composed of four rows of 3 m in length, being considered useful area to the two central rows. Water stress provided a reduction in grain yield of sorghum genotypes in the three years of cultivation. Average productivity, average geometric productivity and average relative performance indexes were more adequate for selection of sorghum genotypes tolerant to post-flowering water stress.

Key words: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, grain yield, water stress, tolerance indices.

3 INTRODUÇÃO

Os estresses abióticos, dentre eles o estresse hídrico, ameaçam a disponibilidade global de alimentos, pois causam redução drástica no crescimento e rendimento das plantas (XIONG et al., 2006), principalmente das culturas mais susceptíveis. Assim, a utilização de culturas tolerantes ao estresse hídrico, como o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), consiste em importante estratégia para minimizar os efeitos causados pela seca em todo mundo.

A tolerância do sorgo a baixa disponibilidade hídrica está associada às suas características xerófitas e mecanismos eficientes de tolerância à seca (BLUM, 2004). O sorgo é uma cultura de grande expressão no cenário mundial, podendo seu grão ser utilizado na alimentação animal e humana, dentre outras utilidades. A produção de sorgo granífero no Brasil na safra 2017/18 foi de 2,136 milhões de toneladas, em uma área de 782,2 mil hectares, com rendimento médio de 2731 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

Para melhorar o rendimento do sorgo, bem como a estabilidade de produção em ambientes ou regiões susceptíveis ao estresse hídrico, há uma necessidade de identificar técnicas de triagem capazes de distinguir genótipos com alto rendimento nesses ambientes. Assim, muitos índices foram propostos para a seleção de genótipos tolerantes à seca, com base no rendimento em ambientes com e sem estresse, visando à obtenção de genótipos estáveis, com alto rendimento e tolerantes ao déficit hídrico (MOHAMMADI et al., 2010; NOURI et al., 2011; SAHAR et al., 2016). Dentre esses índices, destacam-se o índice de susceptibilidade ao estresse (SSI) (FISCHER; MAURER, 1978), índice relativo de seca (RDI) (FISCHER; WOOD, 1979), produtividade média (MP), índice de tolerância (TOL) (ROSIELLE; HAMBLIN, 1981), produtividade média geométrica (GMP), índice de tolerância ao estresse (STI) (FERNANDEZ, 1992), índice de resistência à seca (DI) (LAN, 1998), desempenho relativo médio (MRP), índice de eficiência relativa (REI) (HOSSAIN et al., 1999), índices modificados de tolerância ao estresse (MSTik1 e MSTik2) (FARSHADFAR; SUTKA, 2002), média harmônica de rendimento (HM) (DADBAKHCH et al., 2011) e índice de sensibilidade à seca (SDI) (FARSHADFAR; JAVADINIA, 2011).

Os melhores índices são aqueles que apresentam alta correlação com o rendimento de grãos, tanto nas condições de estresse hídrico como nas condições sem estresse hídrico, possibilitando a identificação de possíveis genótipos com alto rendimento e tolerância à seca (FARSHADFAR; ELYASI, 2012), auxiliando dessa forma programas de

melhoramento genético do sorgo granífero para obtenção de genótipos tolerantes à seca. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de diferentes índices na identificação de híbridos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico, adaptados aos ambientes com e sem estresse hídrico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram instalados na Estação Experimental do Gorutuba, pertencente à Embrapa Milho e Sorgo e localizada em Nova Porteirinha-MG, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha está inserida na mesorregião do Norte de Minas, na área mineira do Semiárido brasileiro e na microrregião de Janaúba-MG. As coordenadas geográficas são 15°48'10" de latitude Sul e 43°18'03" de longitude Oeste. O clima, segundo Köppen, é do tipo Aw (tropical, com inverno seco). O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Vermelho-amarelo de textura média. As principais ocorrências climáticas verificadas durante o período de condução do ensaio nos três anos de cultivo são apresentadas na Figura 1.

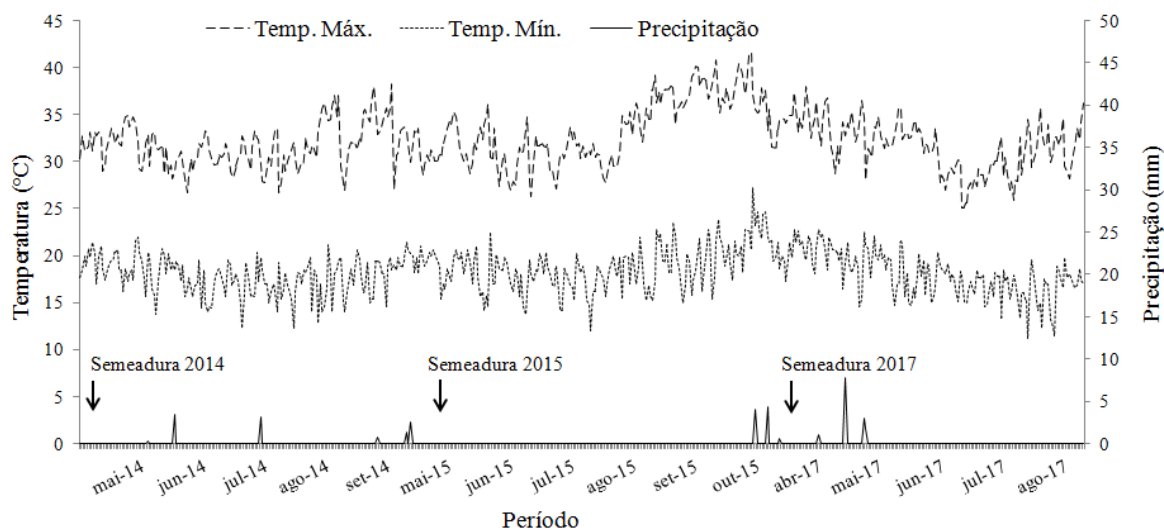


Figura 1. Ocorrências climáticas diárias de precipitação (mm), temperatura máxima e mínima (°C), nos anos de 2014, 2015 e 2017, em Nova Porteirinha-MG (Fonte: INMET, 2018).

Foram avaliados 16 híbridos de sorgo granífero (BRS 310, BRS 330, BRS 332, BRS 373, 1167048, 1167092, 1105661, 1G 100, 1G 220, 1G 282, 50A10, 50A70, BM 737,

A9904, AG 1040, AG 1080, AG 1090, AS 4625, AS 4639, DKB 590), selecionados por serem os mais plantados no país na atualidade.

Os híbridos foram cultivados em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nos ensaios com estresse hídrico, a irrigação foi cortada aos 45 dias após a semeadura, na época em que a maioria dos híbridos se encontravam no estágio de emborrachamento, para que o estresse hídrico ocorresse no início ou após o florescimento. Já nos ensaios sem estresse hídrico a irrigação foi realizada até a maturação fisiológica dos grãos. Em todos os ensaios utilizou-se irrigação por aspersão convencional, com os aspersores espaçados 12,0 x 12,0 m, pressão de serviço de 250 kPa, bocais de 4,0 x 2,6 mm de diâmetro e com vazão de $1,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O manejo da irrigação foi realizado com base na evapotranspiração da cultura.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 16 (regimes de água x híbridos), com três repetições. As parcelas foram compostas de quatro fileiras de 3 m de comprimento, sendo considerada área útil às duas fileiras centrais.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens em pré-plantio. A adubação foi realizada de acordo com os resultados de análise de solo e a exigência da cultura, sendo utilizados 250 kg ha^{-1} da fórmula 8-28-16 (N-P₂O₅-K₂O) no plantio, além de 72 kg ha^{-1} de N em cobertura, usando como fonte nitrogenada a ureia, aos 30 dias após o plantio. A semeadura foi realizada de forma manual, sendo semeadas 20 sementes m^{-1} . Aos 20 dias após a semeadura foi realizado um desbaste deixando 10 plantas m linear^{-1} , para obter um estande final de 200000 plantas ha^{-1} .

O rendimento de grãos foi obtido pela pesagem dos grãos colhidos na área útil de cada parcela, corrigindo-se a umidade para 13% e convertendo-se os dados para ton ha^{-1} . Os índices de tolerância à seca por híbrido "i" foram calculados com base no rendimento de grãos por parcela para os ambientes com estresse hídrico (Y_{si}), sem estresse hídrico (Y_{pi}) e significância do rendimento de grãos em condições de estresse (Y_s) e sem estresse hídrico (Y_p), como indicado na Tabela 1. A eficiência dos índices de seleção para tolerância à seca foi avaliada com base na sua capacidade de discriminação entre genótipos e correlação com o rendimento de grãos em ambos os ambientes.

Tabela 1. Índices de seleção para tolerância à seca e fórmulas. Nova Porteirinha-MG, 2018.

Índice	Fórmula	Referência
Produtividade média (MP)	$(Y_{pi} + Y_{si}) / 2$	Rosielle; Hamblin (1981)
Desempenho relativo médio (MRP)	$(Y_{si}/Y_s) + (Y_{pi}/Y_p)$	Hossain et al. (1999)
Índice de susceptibilidade ao estresse (SSI)	$1 - (Y_{si}/Y_{pi}) / SI$, onde a intensidade do estresse (SI) = $1 - (Y_s/Y_p)$	Fischer; Maurer (1978)
Índice de tolerância ao estresse (TOL)	$Y_{pi} - Y_{si}$	Rosielle; Hamblin (1981)
Produtividade média geométrica (GMP)	$\sqrt{Y_{pi} \times Y_{si}}$	Fernandez (1992)
Índice de eficiência relativa (REI)	$(Y_{si}/Y_s) * (Y_{pi}/Y_p)$	Hossain et al. (1999)
Índice de tolerância ao estresse (STI)	$(Y_{si} \times Y_{pi}) / (Y_p)^2$	Fernandez (1992)
Média harmônica de rendimento (HM)	$2 * (Y_{pi} * Y_{si}) / (Y_{pi} + Y_{si})$	Dadbakhch et al. (2011)
Índice de sensibilidade à seca (SDI)	$(Y_{pi} - Y_{si}) / Y_{pi}$	Farshadfar; Javadinia (2011)
Índice relativo de seca (RDI)	$(Y_{si}/Y_{pi}) / (Y_s/Y_p)$	Fischer; Wood (1979)
Índice de resistência à seca (DI)	$Y_{si} \times (Y_{si}/Y_{pi}) / (Y_s)$	Lan (1998)
Índices modificados de tolerância ao estresse 1 (MSTIk1)	$((Y_{pi})^2 / (Y_p)^2) \times STI$	Farshadfar; Sutka (2002)
Índices modificados de tolerância ao estresse 2 (MSTIk2)	$((Y_{si})^2 / (Y_s)^2) \times STI$	Farshadfar; Sutka (2002)

Y_{si} e Y_{pi} : rendimento de grãos para o genótipo “i” nas condições com e sem estresse hídrico, respectivamente; Y_s e Y_p : média do rendimento de grãos de todos os híbridos nas condições com e sem estresse hídrico, respectivamente.

Os dados de rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância conjunta, considerando os efeitos dos genótipos, anos e ambientes, bem como a interação entre eles. Foi realizada a análise de correlação simples de Pearson para elucidar as relações entre os índices de seleção para cada ano de cultivo e sua associação com o rendimento de grãos.

O método GGE Biplot (YAN; TINKER, 2006), utilizando a análise dos componentes principais (PC), baseado em dados de matriz de correlação de classificação foi utilizado para elucidar graficamente as relações entre os índices de seleção ao mesmo tempo.

O dendograma foi utilizado para possibilitar visão bidimensional da similaridade ou dissimilaridade de todo o conjunto de amostras utilizado no estudo. O método de Ward foi utilizado para a confecção do dendograma. Este método consiste em procedimento de agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade usada para juntar agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos feitos sobre todas as variáveis (HAIR et al., 2005).

A análise de variância, as correlações e o dendograma foram realizadas com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2013). Já a análise biplot foi desenvolvida com auxílio do pacote GGEGui implementado no software R (R Development Core Team, 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise de variância conjunta observa-se que houve diferença significativa para os genótipos, ambientes e anos, bem como para as interações entre eles. A maior magnitude de variação foi atribuída aos ambientes e aos anos, 86,98 e 10,26%, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Análise de variância conjunta para o rendimento de grãos de genótipos de sorgo, em ambientes com e sem estresse hídrico, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

FV	GL	QM	Porcentagem da variação explicada
Bloco	2	1,62 ^{ns}	0,16
Genótipo (G)	15	7,84 ^{**}	0,75
Ano (A)	2	106,59 ^{**}	10,26
Ambiente (E)	1	903,27 ^{**}	86,98
GxA	30	1,59 ^{**}	0,15
GxE	15	1,54 ^{**}	0,15
AxE	2	13,99 ^{**}	1,35
GxAxE	30	1,54 ^{**}	0,15
Erro	190	0,55	0,05
CV (%)		14,96	

^{ns} Não significativo, ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Uma alta magnitude de variação para ambientes era esperada, considerando-se que uma mudança na condição hídrica apresentara efeito em diferentes proporções na produtividade de grãos dos genótipos de sorgo granífero (Tabela 2). A avaliação em

diferentes anos contribuiu mais para a interação do que a avaliação de diferentes genótipos. A mudança dos fatores climáticos de um ano para o outro, principalmente da temperatura, proporciona grande influência no rendimento dos genótipos de sorgo granífero. Logo, os resultados deste trabalho comprovam a importância do estudo de campo em diferentes anos e/ou safras.

Os resultados da análise de variância conjunta dos índices de seleção para tolerância à seca revelam que o efeito do ano foi significativo para todos os índices, exceto para MRP, SSI, REI e RDI (Tabela 3). Esses resultados demonstram que o rendimento dos genótipos de sorgo foi influenciado pelas condições climáticas de cada ano e que os índices MRP, SSI, REI e RDI se mostraram os mais estáveis.

Tabela 3. Análise de variância do rendimento de grãos, nos ambientes com e sem estresse hídrico e dos índices de seleção para tolerância à seca, nos anos de 2014, 2015 e 2017. Nova Porteirinha-MG.

FV/GI	Bloco	Genótipo (G)	Ano (A)	GxA	Erro	CV (%)
	2	15	2	30	94	
Ys	1,24 ^{ns}	3,79 ^{**}	98,56 ^{**}	1,45 ^{**}	0,62	24,9
Yp	1,04 ^{ns}	5,58 ^{**}	22,01 ^{**}	1,68 ^{**}	0,47	10,1
MP	0,80 ^{ns}	3,91 ^{**}	53,30 ^{**}	0,80 ^{**}	0,35	11,9
MRP	0,22 ^{ns}	0,79 ^{**}	0,00 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,11	16,6
SSI	0,08 ^{ns}	0,27 ^{**}	0,003 ^{ns}	0,18 ^{**}	0,06	24,2
TOL	1,31 ^{ns}	3,08 ^{**}	27,92 ^{**}	3,07 ^{**}	0,79	25,1
GMP	1,13 ^{ns}	4,32 ^{**}	76,18 ^{**}	1,00 ^{**}	0,48	15,4
REI	0,23 ^{ns}	0,76 ^{**}	0,001 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,12	33,7
STI	0,04 ^{ns}	0,16 ^{**}	1,25 ^{**}	0,04 ^{**}	0,02	30,4
MSTIk1	0,15 ^{ns}	0,61 ^{**}	1,53 ^{**}	0,13 ^{**}	0,06	48,5
MSTIk2	0,56 ^{ns}	1,08 ^{**}	1,09 [*]	0,49 ^{ns}	0,32	86,9
HM	1,41 ^{ns}	4,64 ^{**}	96,17 ^{**}	1,29 ^{**}	0,64	19,2
SDI	0,02 ^{ns}	0,05 ^{**}	1,23 ^{**}	0,04 ^{**}	0,01	22,0
RDI	0,14 ^{ns}	0,25 ^{**}	0,005 ^{ns}	0,19 ^{**}	0,08	28,1
DI	0,11 ^{ns}	0,21 ^{**}	1,11 ^{**}	0,13 ^{**}	0,07	51,1

^{ns} Não significativo e ^{**}, ^{*} Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Apenas os índices MRP, REI e MSTIk2 não apresentaram diferença significativa para a interação GxA (Tabela 3). Esses índices não são desejáveis, pois na seleção de um índice espera-se a capacidade de distinção dos genótipos em diferentes ambientes. Os índices REI, STI, MSTIk1, MSTIk2 e DI apresentaram coeficientes de variação altos (acima de 30%), o que não é desejável, pois na seleção de um índice para tolerância à seca,

espera-se que os melhores índices apresentem alta correlação com o rendimento nos ambientes com e sem estresse hídrico e baixo coeficiente de variação, aumentando assim a confiabilidade dos resultados.

A média do rendimento de grãos dos híbridos de sorgo granífero nos ambientes com estresse hídrico foi de 4,82 ton ha⁻¹ em 2014, 2,26 ton ha⁻¹ em 2015 e 2,43 ton ha⁻¹ em 2017. Nos ambientes sem estresse hídrico a média do rendimento de grãos foi de 7,48 ton ha⁻¹, em 2014, 6,21 ton ha⁻¹, em 2015 e 6,44 em 2017. O estresse hídrico reduziu o rendimento de grãos em 35% em 2014, 64% em 2015 e 62% em 2017. Dessa forma, o estresse hídrico foi moderado no ano de 2014 e severo nos anos de 2015 e 2017.

A maior severidade do estresse hídrico em 2015 está associada a maiores temperaturas durante todo o período de indução do estresse hídrico (a partir de 45 dias após o plantio). Já em 2017, foram registradas maiores temperaturas no início da indução do estresse hídrico (Figura 1). As maiores temperaturas aumentaram os efeitos do estresse hídrico, acarretando em maior redução da produtividade de grãos, por afetar, principalmente, o enchimento de grãos do sorgo.

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para determinar os índices de tolerância à seca mais desejáveis nas condições com e sem estresse hídrico. A análise de correlação revelou que nos três anos de avaliação houve associação positiva entre o rendimento de grãos nos ambientes com estresse hídrico (Ys) e sem estresse hídrico (Yp), entretanto foi significativa apenas em 2015 (Tabelas 4, 5 e 6). A baixa correlação entre Ys e Yp indica que os genótipos que apresentaram melhor desempenho produtivo nos ambientes sem estresse hídrico não necessariamente foram os mais produtivos nos ambientes com estresse. Estes resultados demonstram a dificuldade de seleção de genótipos que são tolerantes à seca e que apresentem também alto desempenho produtivo em condições hídricas ideais, pois os genótipos, em sua maioria, apresentam comportamento diferenciado em condições hídricas contrastantes.

No ano de 2014, o rendimento de grãos no ambiente com estresse hídrico (Ys), apresentou correlação altamente significativa e positiva com todos os índices estudados, excetuando-se SSI, TOL e SDI que apresentaram correlação altamente significativa, porém negativa (Tabela 4). Em 2015 e 2017, quando o estresse hídrico foi mais severo, o comportamento da correlação para todos os índices com a Ys, foi similar ao ano de 2014, porém, a correlação tornou-se predominantemente mais forte para os índices em 2015, ano em que o estresse hídrico proporcionou maior redução do rendimento de grãos dos

genótipos de sorgo. No ano de 2017, correlação não significativa com Ys foi observada para os índices TOL e MSTIk1 (Tabela 5).

Tabela 4. Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2014. Nova Porteirinha-MG.

	Ys	Yp	MP	MRP	SSI	TOL	GMP	REI
Ys	1							
Yp	0,49 ^{ns}	1						
MP	0,87 ^{**}	0,86 ^{**}	1					
MRP	0,92 ^{**}	0,79 ^{**}	0,99 ^{**}	1				
SSI	-0,78 ^{**}	0,14 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,49 ^{ns}	1			
TOL	-0,52 ^{**}	0,49 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,92 ^{**}	1		
GMP	0,93 ^{**}	0,77 ^{**}	0,99 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,51 [*]	-0,18 ^{ns}	1	
REI	0,93 ^{**}	0,76 ^{**}	0,98 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,50 [*]	-0,19 ^{ns}	0,99 ^{**}	1
STI	0,93 ^{**}	0,76 ^{**}	0,98 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,50 [*]	-0,18 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,99 ^{**}
HM	0,97 ^{**}	0,68 ^{**}	0,96 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,60 [*]	-0,30 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,99 ^{**}
SDI	-0,77 ^{**}	0,15 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,92 ^{**}	-0,50 [*]	-0,50 [*]
RDI	0,78 ^{**}	-0,14 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,48 ^{ns}	-0,99 ^{**}	-0,92 ^{**}	0,51 [*]	0,50 [*]
DI	0,95 ^{**}	0,22 ^{ns}	0,69 ^{**}	0,77 ^{**}	-0,91 ^{**}	-0,74 ^{**}	0,78 ^{**}	0,79 ^{**}
MSTIk1	0,76 ^{**}	0,90 ^{**}	0,96 ^{**}	0,94 ^{**}	-0,22 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,93 ^{**}	0,94 ^{**}
MSTIk2	0,93 ^{**}	0,56 [*]	0,87 ^{**}	0,90 ^{**}	-0,61 [*]	-0,38 ^{ns}	0,90 ^{**}	0,94 ^{**}
	STI	HM	SDI	RDI	DI	MSTIk1	MSTIk2	
STI	1							
HM	0,99 ^{**}	1						
SDI	-0,50 [*]	-0,60 [*]	1					
RDI	0,50 [*]	0,60 [*]	-0,99 ^{**}	1				
DI	0,79 ^{**}	0,85 ^{**}	-0,91 ^{**}	0,91 ^{**}	1			
MSTIk1	0,92 ^{**}	0,86 ^{**}	-0,41 [*]	0,38 [*]	0,54 ^{**}	1		
MSTIk2	0,94 ^{**}	0,92 ^{**}	-0,61 [*]	0,61 [*]	0,87 ^{**}	0,83 ^{**}	1	

^{ns} Não significativo e ^{*}, ^{**} Significativo a 1 e 5% de probabilidade.

Correlação negativa de Ys com os índices TOL e SSI também foram relatadas por Kharrazi; Rad (2011) e Abraha et al. (2015), avaliando índices de tolerância à seca em sorgo, indicando que quanto maior o valor desses índices, menor o rendimento de grãos dos genótipos de sorgo no ambiente com estresse hídrico (Ys). Sahar et al. (2016), avaliando índices de tolerância em trigo também obtiveram correlações positivas e significativas dos índices MP, MRP, REI, GMP, STI, MSTIk1, MSTIk2, HM, RDI, DI com Ys. A alta correlação com rendimento de grãos em condições de estresse hídrico é muito desejada, considerando a grande dificuldade de seleção de caracteres que possam auxiliar na seleção daqueles que são de fato importantes, como a produtividade de grãos.

Tabela 5. Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2015. Nova Porteirinha-MG.

	Ys	Yp	MP	MRP	SSI	TOL	GMP	REI
YS	1							
YP	0,52*	1						
MP	0,88**	0,87**	1					
MRP	0,97**	0,72**	0,97**	1				
SSI	-0,95**	-0,23 ^{ns}	-0,68**	-0,84**	1			
TOL	-0,52*	0,45 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,76**	1		
GMP	0,97**	0,72**	0,97**	0,99**	-0,84**	-0,29 ^{ns}	1	
REI	0,96**	0,72**	0,97**	0,99**	-0,83**	-0,29 ^{ns}	0,99**	1
STI	0,96**	0,72**	0,97**	0,99**	-0,83**	-0,28 ^{ns}	0,99**	0,99**
HM	0,99**	0,62**	0,92**	0,99**	-0,90**	-0,41 ^{ns}	0,99**	0,98**
SDI	-0,95**	-0,23 ^{ns}	-0,68**	-0,84**	0,99**	0,76**	-0,84**	-0,83**
RDI	0,95**	0,23 ^{ns}	0,68**	0,84**	-0,99**	-0,76**	0,84**	0,83**
DI	0,96**	0,31 ^{ns}	0,74**	0,88**	-0,97**	-0,69**	0,87**	0,88**
MSTIk1	0,82**	0,89**	0,98**	0,93**	-0,59*	0,04 ^{ns}	0,92**	0,94**
MSTIk2	0,94**	0,52*	0,81**	0,92**	-0,85**	-0,54**	0,90**	0,93**
	STI	HM	SDI	RDI	DI	MSTIk1	MSTIk2	
STI	1							
HM	0,98**	1						
SDI	-0,82**	-0,90**	1					
RDI	0,82**	0,90**	-0,99**	1				
DI	0,87**	0,92**	-0,97**	0,97**	1			
MSTIk1	0,94**	0,87**	-0,59*	0,59*	0,67**	1		
MSTIk2	0,93**	0,91**	-0,85**	0,85**	0,94**	0,82**	1	

^{ns} Não significativo e *, ** Significativo a 1 e 5% de probabilidade.

O rendimento de grãos no ambiente sem estresse hídrico (Yp), no ano de 2014, apresentou correlação positiva e altamente significativa com os índices MP, MRP, GMP, REI, STI, HM e MSTIk1, correlação positiva e moderada com o índice MSTIk2. A correlação entre os índices e Yp em 2015, foi similar ao ano anterior, entretanto, diferentemente do que ocorreu com Ys, a correlação dos índices com Yp foi mais fraca, com exceção de MP (0,87 em 2014 e 0,88 em 2015). Já, em 2017, a correlação dos índices de tolerância com o Yp continuou semelhante aos anos anteriores, porém, diferente dos anos anteriores, os índices SSI, TOL e SDI apresentaram correlação positiva e significativa com o Yp. Darvishzadeh et al. (2010) também relataram correlações significativas e positivas de Yp com MP, GMP, STI e HM, em trigo e Menezes et al. (2014), encontraram correlações positivas e significativas dos índices GMP, SSI, MP, HM, TOL, STI e YI com Yp, em sorgo.

Tabela 6. Correlação de Pearson entre o rendimento de grãos e os índices de seleção em 2017. Nova Porteirinha-MG.

	Ys	Yp	MP	MRP	SSI	TOL	GMP	REI
YS	1							
YP	0,19 ^{ns}	1						
MP	0,54 [*]	0,93 ^{**}	1					
MRP	0,81 ^{**}	0,73 ^{**}	0,93 ^{**}	1				
SSI	-0,72 ^{**}	0,53 ^{**}	0,19 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	1			
TOL	-0,24 ^{ns}	0,90 ^{**}	0,68 ^{**}	-0,36 ^{ns}	0,84 ^{**}	1		
GMP	0,79 ^{**}	0,74 ^{**}	0,94 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,15 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1	
REI	0,78 ^{**}	0,76 ^{**}	0,94 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,13 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,99 ^{**}	1
STI	0,78 ^{**}	0,75 ^{**}	0,94 ^{**}	0,99 ^{**}	-0,14 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,99 ^{**}
HM	0,94 ^{**}	0,49 [*]	0,78 ^{**}	0,95 ^{**}	-0,45 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,95 ^{**}	0,94 ^{**}
SDI	-0,72 ^{**}	0,52 [*]	0,18 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,99 ^{**}	0,84 ^{**}	-0,15 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
RDI	0,72 ^{**}	-0,53 [*]	-0,18 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,99 ^{**}	-0,84 ^{**}	0,16 ^{ns}	0,14 ^{ns}
DI	0,88 ^{**}	0,26 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,47 ^{ns}	-0,95 ^{**}	-0,64 ^{**}	0,43 ^{ns}	0,41 ^{ns}
MSTIk1	0,46 ^{ns}	0,92 ^{**}	0,97 ^{**}	0,87 ^{**}	0,24 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,89 ^{**}	0,91 ^{**}
MSTIk2	0,94 ^{**}	0,47 ^{ns}	0,76 ^{**}	0,94 ^{**}	-0,47 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,92 ^{**}	0,92 ^{**}
	STI	HM	SDI	RDI	DI	MSTIk1	MSTIk2	
STI	1							
HM	0,94 ^{**}	1						
SDI	-0,14 ^{ns}	-0,46 ^{ns}	1					
RDI	0,14 ^{ns}	0,46 ^{ns}	-0,99 ^{**}	1				
DI	0,42 ^{ns}	0,68 ^{**}	-0,95 ^{**}	0,95 ^{**}	1			
MSTIk1	0,90 ^{**}	0,71 ^{**}	0,24 ^{ns}	-0,23 [*]	0,03 ^{ns}	1		
MSTIk2	0,93 ^{**}	0,97 ^{**}	-0,47 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,71 ^{**}	0,70 ^{**}	1	

^{ns} Não significativo e ^{*}, ^{**} Significativo a 1 e 5% de probabilidade.

No geral, durante os três anos de cultivo, os índices de seleção MRP, MP, MSTIk1, GMP, REI, STI apresentaram as maiores magnitudes de correlação com o rendimento de grãos nos ambientes com e sem estresse hídrico. Porém, os índices MSTIk1, REI e STI apesar da alta correlação com o rendimento de grãos, apresentaram alto coeficiente de variação, o que inviabiliza a indicação desses índices para auxiliar na seleção de genótipos de sorgo tolerantes ao estresse hídrico, pois esses índices apresentam alta dispersão dos dados. Os índices MP (produtividade média), GMP (produtividade média geométrica) e MRP (desempenho relativo médio) apresentaram coeficientes de variação aceitável e, portanto, esses índices podem ser utilizados como critérios para auxiliar na seleção de genótipos de sorgo granífero com tolerância ao estresse hídrico e com alta produção de grãos, constituindo assim em uma importante ferramenta em programas de melhoramento para tolerância à seca. Os resultados encontrados estão de acordo com os obtidos por

Golabadi et al. (2006) em trigo, Menezes et al. (2014) em sorgo, Shahrabian; Soleymani (2014) em milho.

A média de produtividade (MP) dos ambientes com e sem estresse hídrico é um índice muito utilizado na seleção de genótipos tolerantes à seca. Porém, a média é muito influenciada por valores extremos de produtividade, principalmente do ambiente sem estresse hídrico, levando à seleção de genótipos com baixa produtividade no ambiente com estresse. Genótipos que apresentam grande discrepância de produtividade entre as duas condições hídricas, podem apresentar a mesma média de genótipos que apresentam uma maior estabilidade na produção nos dois ambientes. Dessa forma, considerando apenas a média, erroneamente os dois genótipos seriam selecionados como tolerantes à seca e responsivos as condições hídricas ideais, pois um genótipo é estável e apresentou uma média produtiva alta nos dois ambientes e outro genótipo foi muito produtivo em um ambiente e no outro apresentou uma produção muito baixa. Logo, apenas o genótipo mais estável deveria ser selecionado como tolerante à seca e responsivo às melhorias nas condições hídricas.

Assim, os índices GMP (produtividade média geométrica) e MRP (desempenho relativo médio) que também apresentaram alta correlação com a produtividade nas duas condições hídricas podem ser utilizados na seleção de genótipos tolerantes à seca, pois corrigem o erro da seleção de materiais com alta discrepância na produtividade entre os dois ambientes.

A magnitude e significância da correlação dos índices de tolerância com o rendimento de grãos nos ambientes com e sem estresse hídrico alterou muito pouco nos três anos. Logo, os índices selecionados nesse trabalho mostram-se estáveis, mesmo em anos com grande variação climática, o que aumenta a confiabilidade na recomendação desses índices para auxiliar na seleção de genótipos tolerantes ao estresse hídrico.

A seleção com base em uma combinação de índices pode ser mais útil para selecionar genótipos tolerantes à seca, porém o coeficiente de correlação determina o grau de associação linear apenas entre duas características. Assim, torna-se necessário uma abordagem melhor do que a análise de correlação, como a análise de biplot, para identificar genótipos superiores para os ambientes com e sem estresse hídrico. A partir da análise de componentes principais (PC) foi possível verificar as relações entre todos os índices, com base na classificação de correlação. No ano de 2014, os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), explicaram 98,48% da variação total, 73,03 e 25,45%,

respectivamente (Figura 2). Em 2015, os dois primeiros componentes principais explicaram 98,68% da variação total, 81,91 e 16,77%, respectivamente (Figura 3). Em 2017, os dois primeiros componentes principais explicaram 99,18% da variação total, 60,60 e 38,58%, respectivamente (Figura 4).

No biplot, índices plotados com coordenadas próximas a outros índices apresentam alta correlação e semelhanças na classificação dos genótipos. Nos três anos de cultivo, os índices com maiores semelhanças com Y_s foram DI, MSTIk2 e HM e com Y_p foram os índices MSTIk1 e MP (Figuras 2, 3 e 4). O biplot mostra que em 2014, os genótipos 6 e 11 apresentaram maior produtividade média nos ambientes com e sem estresse hídrico (Y_s e Y_p) e os genótipos 3 e 5 apresentaram menor desempenho para esses ambientes (Figura 2). Em 2015, os genótipos 4, 12, 11 e 6 apresentaram maior desempenho produtivo médio para os ambientes Y_s e Y_p (Figura 3). No ano de 2017, os genótipos 6, 4 e 12 apresentaram maior produtividade média para os ambientes com e sem estresse hídrico (Figura 4).

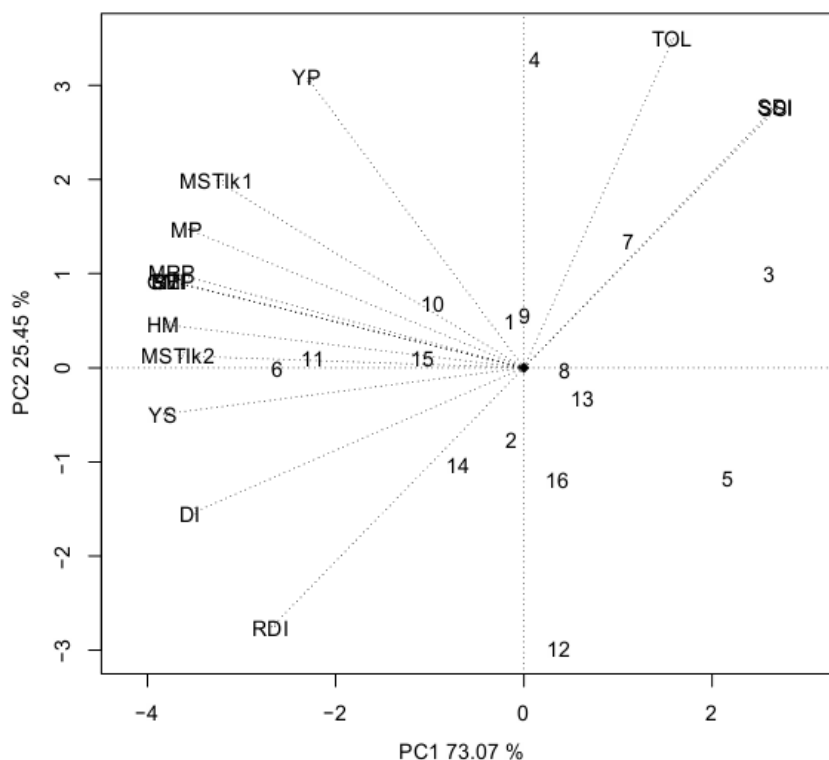


Figura 2. Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2014, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.

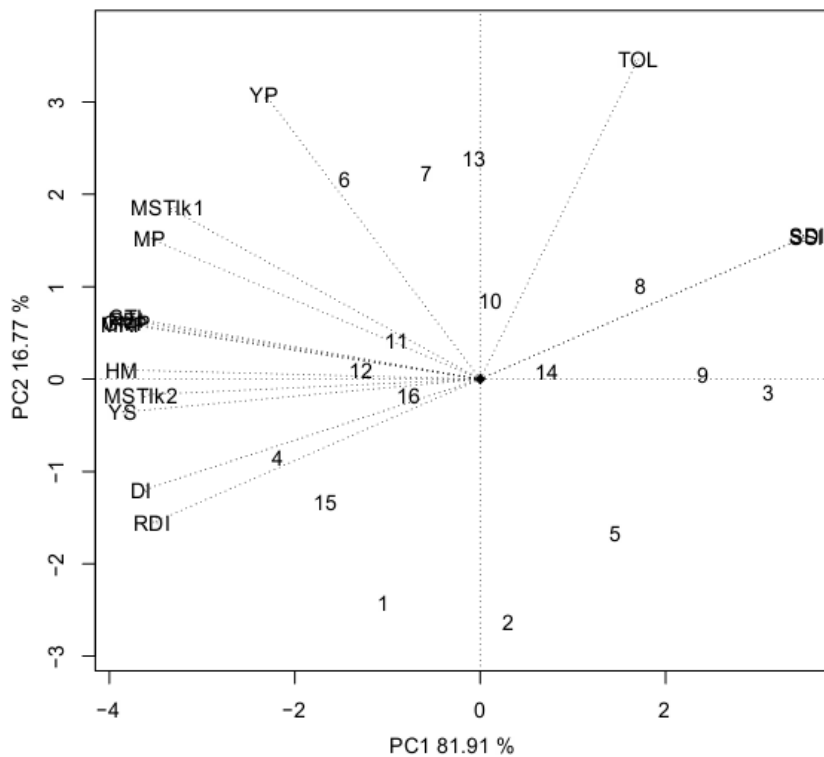


Figura 3. Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2015, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.

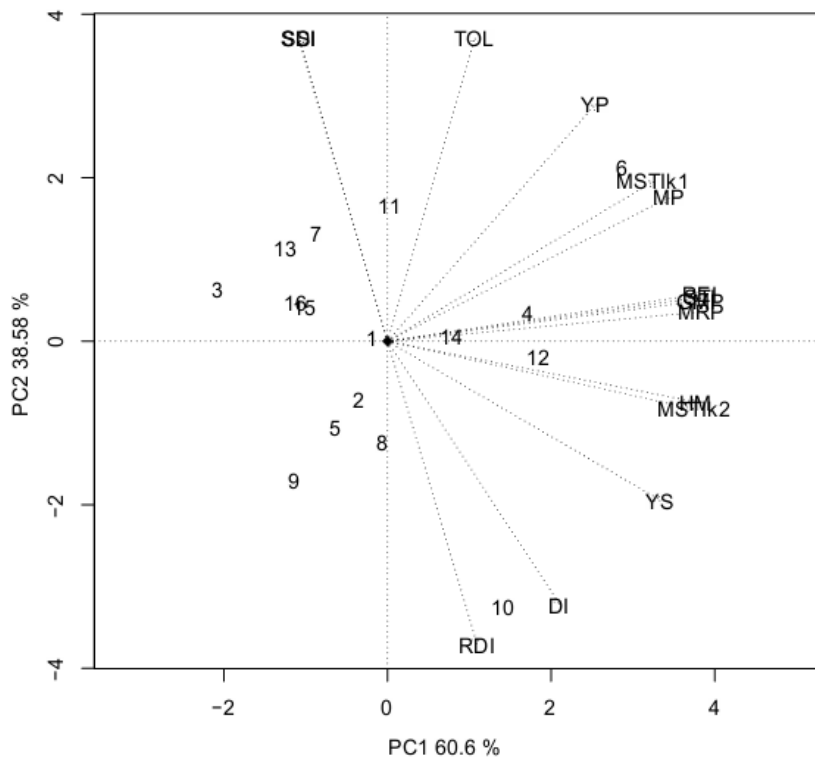


Figura 4. Relação entre os índices de seleção para tolerância à seca no ano de 2017, pelo modelo GGE biplot. Nova Porteirinha-MG.

Nos três anos de cultivo, os vetores para os índices MP, HM, MSTIk1, MSTIk2, STI, GMP, MRP e HM permaneceram entre os vetores Yp e Ys (Figuras 2, 3 e 4), indicando que esses índices são similares para a seleção de genótipos tolerantes à seca. Logo, os resultados obtidos através da análise biplot confirmam os resultados da análise de correlação.

Os índices MRP, MP e GMP, que apresentaram maior correlação com Yp e Ys e coeficiente de variação aceitável, foram utilizados para agrupar os genótipos em dendrograma, usando ligação de Ward (Figuras 5, 6 e 7). Os resultados do agrupamento foram muito consistentes com os obtidos na análise biplot.

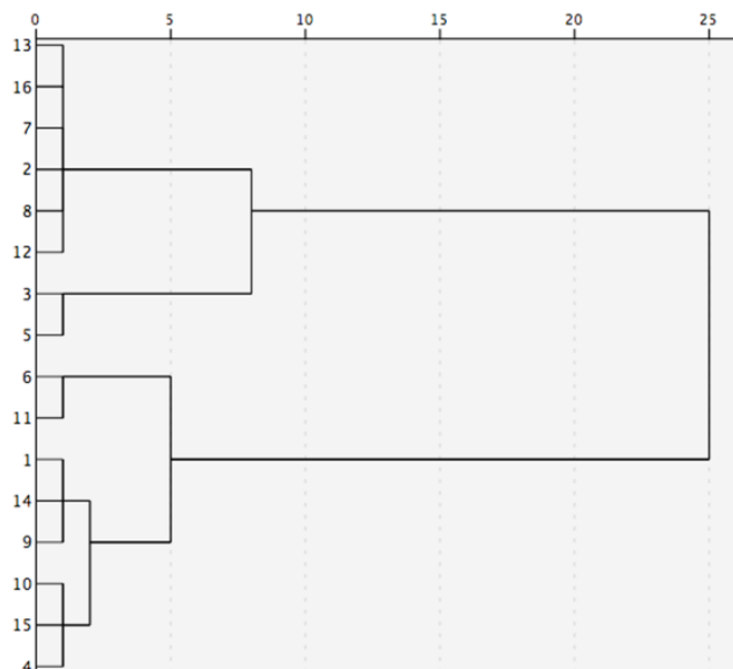


Figura 5. Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2014.

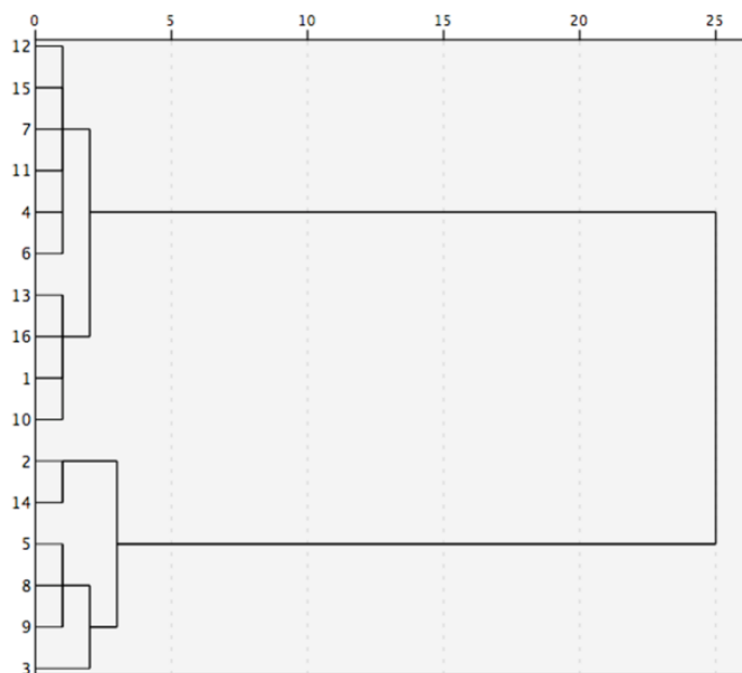


Figura 6. Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2015.

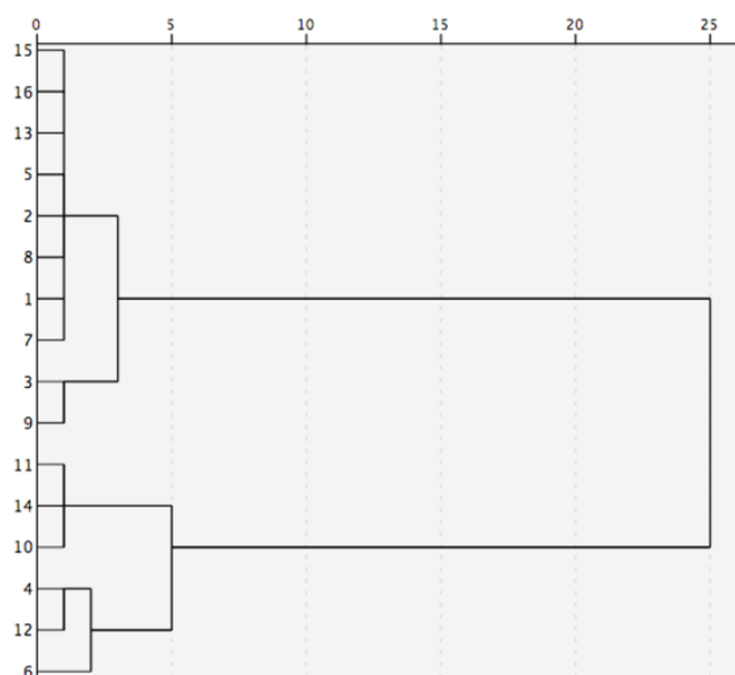


Figura 7. Dendrograma da análise de agrupamento usando ligação de WARD de genótipos de sorgo granífero baseados nos índices de tolerância à seca (MRP, MP e GMP) e na produtividade de grãos, em ambientes com e sem estresse hídrico, em Nova Porteirinha-MG no ano de 2017.

A vantagem da análise com dendograma é que ela pode ser usada para calcular distâncias entre genótipos. Em 2014, dentro do conjunto de genótipos superiores, 6 e 11 foram 5 unidades de distância de outros membros do subgrupo (Figura 5). Em 2015, o grupo de genótipos superiores, formado pelos genótipos 6, 4, 11, 7, 15 e 2 foram 2 unidades de distância do grupo mais próximo (Figura 6). No ano de 2017, os genótipos com rendimento de grãos superiores (6, 4 e 12) apresentaram 5 unidades de distância dos outros membros do subgrupo (Figura 7). Estes resultados indicam a superioridade desses genótipos e a eficiência desses três índices para classificação de genótipos em condições com e sem estresse hídrico.

6 CONCLUSÕES

O estresse hídrico proporcionou redução no rendimento de grãos dos genótipos de sorgo nos três anos de cultivo.

Os índices de seleção podem ser úteis para seleção de genótipos de sorgo com rendimento desejável em condições com e sem estresse hídrico.

Os índices MP, GMP e MRP foram mais adequados para seleção de genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico pós-florescimento.

7 AGRADECIMENTOS

A Embrapa Milho e Sorgo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos recursos financeiros e bolsas para execução do projeto.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHA, T.; NYENDE, A. B.; MWANGI, S. G.; KASILI, R.; ARAIA, W. Identification of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) landraces tolerant to post flowering drought stress using drought tolerance indices. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 7 (7), p. 211-218, 2015.

BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. editors. **Physiology and Biotechnology Integration for Plant Breeding**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 141-223.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 5, Safra 2017/18, n.12. Décimo Segundo Levantamento, Brasília, 2018. 148 p.

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.

DADBAKHS, A.; YAZDANSEPAS, A.; AHMADIZADEH, M. Study drought stress on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by drought tolerance indices. **Advances in Environmental Biology**, v. 5, n. 8, p. 1804-1810, 2011.

DARVISHZADEH, R.; PIRZAD, A.; HATAMI-MALEKI, H.; KIANI, S. P.; SARRAFI, A. Evaluation of the reaction of sunflower inbred lines and their F1 hybrids to drought conditions using various stress tolerance indices. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8 n.4, p. 1037-1046, 2010.

FARSHADFAR, E.; SUTKA, J. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. **Cereal Research Communications**, v. 31, p. 33-39, 2002.

FARSHADFAR, E.; JAVADINIA, J. Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes for drought tolerance. **Seed and Plant Improvement Journal**, v. 27, n. 4, p. 517-537, 2011.

FARSHADFAR, E.; ELYASI, P. Screening quantitative indicators of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces. **European Journal of Experimental Biology**, v. 2, n. 3, p. 577-584, 2012.

FERNANDEZ, G. C. J. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: KUO, C. G., ed. Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress. Shanhua: Asian Vegetable Research and Development Center. **Taiwan Publication**, v. 93, p. 257-270, 1992.

FISCHER, R. A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.29, p. 897-912, 1978.

FISCHER, R. A.; WOOD, J. T. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 30, p. 1001-1020, 1979.

GOLABADI, M.; ARZANI, A.; MAIBODY, S. A. M. Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, p. 162-171, 2006.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATAHN, R. L. **Análise multivariada de dados**. 5ed. Bookman, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2005.

HOSSAIN, A. B. S.; SEARS, A. G.; COX, T. S.; PAULSEN, G. M. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. **Crop Science**, v. 30, p. 622-627, 1999.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. 2018. **Dados históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

KHARRAZI, M. A. S.; RAD, M. R. N. Evaluation of sorghum genotypes under drought stress conditions using some stress tolerance indices. **African Journal of Biotechnology**, v. 10 (61), p. 13086-13089, 2011.

LAN, J. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. **Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica**, v. 7, p. 85-87, 1998.

MENEZES, C.B.; TICONA-BENAVENTE, C.A.; TARDIN, F.D.; CARDOSO, M.J.; BASTOS, E.A.; NOGUEIRA, D.W.; PORTUGAL, A.F.; SANTOS, C.V.; SCHAFFERT, R.E. Selection indices to identify drought-tolerant grain sorghum cultivars. **Genetics and molecular research**, v.13 (4), p. 9817-9827, 2014.

MOHAMMADI, R.; ARMION, M.; KAHRIZI, D.; AMRI, A. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought condition. **International Journal of Plant Production**, v. 4, n.1, p. 11-24, 2010.

NOURI, A.; ETMINAN, A.; SILVA, J. A. T.; MOHAMMADI, R. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turgidum* var. durum Desf.). **Australian Journal of Agricultural Research**, v.5, n.1, p.8-16, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009, 451 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 03 jun. 2017.

ROSIELLE, A. A.; HAMBLIN, J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. **Crop Science**, v. 21, p.943-946, 1981.

SAHAR, B.; AHMED, B.; NASERELHAQ, N.; MOHAMMED, J.; HASSAN, O. Efficiency of selection indices in screening bread wheat lines combining drought tolerance and high yield potential. **Journal of plant breeding and crop science**, v. 8, n.5, p. 72-86, 2016.

XIONG, L.; WANG, R.; MAO, G.; KOCZAN, J. M. Identification of drought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid. **Plant Physiology**, v. 142, p. 1065-1074, 2006.

YAN, W.; TINKER, A. Biplot analysis of multi environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006.