

HELOISA ROCHA DO NASCIMENTO

**IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERES E SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA
TOLERANTES AO DEFICIT HÍDRICO**

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

Orientador: Felipe Lopes da Silva

Coorientadores: Pedro Crescêncio S. Carneiro
Luiz Antônio dos Santos Dias

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

N244i
2020 Nascimento, Heloisa Rocha do, 1989-
Identificação de caracteres e seleção de genótipos de soja
tolerantes ao déficit hídrico / Heloisa Rocha do Nascimento. - Viçosa,
MG, 2020.
83 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Felipe Lopes da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Melhoramento genético. 2. Stress (Fisiologia). 3. Estresse
hídrico. 4. *Glycine max* (L.) Merrill. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em
Fitotecnia. II. Título.

CDD 22 ed. 635.6552


HELOISA ROCHA DO NASCIMENTO

**IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERES E SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA
TOLERANTES AO DEFICIT HÍDRICO**

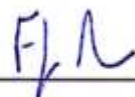
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2020

Assentimento:



Heloisa Rocha do Nascimento
Autora



Felipe Lopes da Silva
Orientador

Aos meus pais Celia e José, meu
irmão João e ao meu noivo
Ricardo pelo incentivo, amor e
orações.

Aos meus avós Carmen e João
(*In memoriam*).

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, sabedoria, esperança e alegria ao longo da jornada.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realização do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento - 001, para realização desse trabalho.

Aos meus pais José da Guia Pereira do Nascimento e Celia Cursino da Rocha, meu exemplo de vida. Serei eternamente grata pelo amor, apoio, conselhos, paciência, incentivo, orações e por sempre terem acreditado nas minhas decisões.

Ao meu irmão João pelo amor, amizade e incentivo.

Ao meu noivo Ricardo, pelo amor, companheirismo, incentivo, apoio e paciência durante essa etapa.

A todos os professores da Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de adquirir conhecimento e qualidade de ensino.

A professora Isane Vera Karsburg pelo apoio durante a graduação e incentivo à pesquisa.

Ao meu orientador Felipe Lopes da Silva pela amizade, ensinamentos e confiança para o desenvolvimento desta tese e participação no Programa de Melhoramento Genético da Soja.

As amigas realizadas durante o período de estadia em Viçosa.

Aos meus grandes amigos nos momentos de descontração e trabalho Thais, Rebeca, Annanda, Martha, Fernanda, Guilherme, Francisco, Lorena, Ramon, Isabella, Lucas Silva, Lucas Rosmaninho, João Marcos, Ciene, Flávia, Cássio, Higor (Tião), Bruno, Cleiton, Dalton, Stênio, Julia, Maykon, Murilo, Bruna e Vinicius.

Aos membros e estagiários do Programa de Melhoramento Genético da Soja.

A todos que contribuíram de alguma maneira para que este trabalho fosse realizado.

Muito obrigada!

RESUMO

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Identificação de caracteres e seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico.** Orientador: Felipe Lopes da Silva. Coorientadores: Pedro Crescêncio Souza Carneiro e Luiz Antônio dos Santos Dias.

A cultura da soja apresenta importância mundial. A soja é fonte de proteína para alimentação humana e animal e de óleo para biodiesel, sendo amplamente cultivada mundialmente. Devido às mudanças climáticas e à escassez de chuvas que causam prejuízos para a cultura, tornam-se necessários estudos relacionados a seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico. Sendo assim, este trabalho teve por objetivos identificar características auxiliares para a seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico e selecionar genótipos tolerantes via índice de seleção baseado no efeito direto das características selecionadas, bem como selecionar genótipos tolerantes ao deficit, que sejam mais adaptáveis, estáveis e produtivos (MHPRVG*MG), associando a metodologia de modelos mistos e o índice FAI-BLUP. Para isso, 93 cultivares de soja foram avaliados na condição controle (-10 kPa e -33 kPa), e sob deficit hídrico (-900 kPa), em casa de vegetação. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com três repetições, avaliados 48 cultivares, nos anos de 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1), e 48 cultivares, avaliados nos anos de 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2). Três cultivares foram coincidentes aos dois grupos de cultivares. O deficit hídrico foi induzido durante quinze dias no estádio R5 e, após esse período, as plantas voltaram a ser irrigadas. As características massa de semente, massa de vagem, número de sementes e número de vagens foram consideradas importantes para seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico. Identificou-se 20 genótipos tolerantes apresentando bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, além disso, 3 genótipos com bom desempenho somente no ambiente sob condição de deficit hídrico, no Grupo 1. No Grupo 2, foram selecionados 15 genótipos tolerantes apresentando bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, 9 genótipos com bom desempenho somente no ambiente sob condição de deficit hídrico. O índice FAI-BLUP permitiu selecionar 10 genótipos de cada grupo de cultivares, que apresentaram maior adaptabilidade, estabilidade e produtividade em condições de deficit hídrico. Os cultivares selecionados neste estudo podem ser utilizados em programa de melhoramento para o desenvolvimento de genótipos tolerantes ao deficit hídrico para regiões produtoras.

Palavras-chave: Análise de trilha. Estresse abiótico. *Glycine max* (L.) Merrill. Índice de seleção.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Character identification and selection of soybean genotypes tolerant to water deficit.** Adviser: Felipe Lopes da Silva. Co-advisers: Pedro Crescêncio Souza Carneiro and Luiz Antônio dos Santos Dias.

The cultivation of soybeans is of global importance. Soybean is a source of protein for human and animal food and of oil for biodiesel, being widely cultivated worldwide. Due to climatic changes and the scarcity of rains that cause damage to the crop, studies related to the selection of genotypes tolerant to water deficit are necessary. Thus, this work aimed to identify auxiliary characteristics for the selection of water deficit-tolerant genotypes and to select the most tolerant genotypes via selection index based on the direct effect of the selected characteristics, and to select water-tolerant genotypes, that are more adaptable, stable and productive (MHPRVG * MG), associating the mixed model methodology and the FAI-BLUP index. For this, 93 soybean cultivars were evaluated in the control condition (-10 kPa and -33 kPa) and under water deficit (-900 kPa), in greenhouse. The experiment was conducted in a randomized block design, with three replications, with 48 cultivars evaluated, in the years 2016-1 and 2017-1 (Group 1), and 48 cultivars, evaluated in the years 2016-2 and 2018-2 (Group 2). Three cultivars coincided in the two groups of cultivars. The water deficit was induced for fifteen days at the R5 stage and, after that period, the plants were again irrigated. The characteristics of seed mass, pod mass, number of seeds and number of pods were considered important for the selection of water deficit tolerant genotypes. Twenty tolerant genotypes were identified, presenting good performance in conditions of control and water deficit and, in addition, 3 genotypes with good performance only in the environment under water deficit condition, in Group 1. In Group 2, 15 tolerant genotypes were selected showing good performance under control and water deficit conditions, and 9 genotypes with good performance only in the environment under water deficit condition. The FAI-BLUP index allowed to select 10 genotypes from each group of cultivars, which showed greater adaptability, stability and productivity under water deficit conditions. The cultivars selected in this study can be used in breeding programs for the development of water deficit tolerant genotypes for producing regions.

Keywords: Path analysis. Abiotic stress. *Glycine max* (L.) Merrill. Index selection.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
Capítulo I. Identificação e uso de características auxiliares na seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico	16
RESUMO.....	16
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO	20
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1 Material Genético	21
2.2 Metodologia de deficit hídrico	22
2.3 Análise de variância individual para cada ensaio.....	25
2.4 Decomposição da interação genótipo e ambiente (GA).....	25
2.5 Análise de variância conjunta.....	25
2.6 Análise de trilha.....	26
2.7 Índice de seleção.....	28
3. RESULTADOS	28
4. DISCUSSÃO.....	40
5. CONCLUSÕES.....	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
7. APÊNDICE	51
Capítulo II. Seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico com base no índice FAI-BLUP.....	57
RESUMO.....	57
ABSTRACT	58
1. INTRODUÇÃO	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1 Material Genético	60
2.2 Metodologia de deficit hídrico	61
2.3 Análise estatística	63
2.4 Seleção de genótipos pelo índice FAI-BLUP.....	64
3. RESULTADOS	64
4. DISCUSSÃO.....	72

5. CONCLUSÕES.....	75
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
CONCLUSÃO GERAL	83

INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa, pertencente à família Fabaceae (DEVI et al., 2020), fornecedora de grãos com importância mundial, sendo uma fonte essencial de proteína, óleo e micronutrientes na alimentação humana e animal. Além disso, é uma atraente fonte para produção de biodiesel (SILVENTE et al., 2012; VALLIYODAN et al., 2017).

Representa a commodity mais crescente nas últimas décadas, comercializada e cultivada em todo o mundo, apresentando uma produção global próxima de 350 milhões de toneladas (USDA, 2018). Entretanto, a sua importância econômica se concentra nos Estados Unidos, Brasil, Argentina e China, que juntos são responsáveis por 86,8% da produção mundial (USDA, 2016).

O Brasil, é o segundo maior produtor mundial de soja, cultivando do Norte ao Sul do país e, segundo as informações da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), com uma produção de 114,843 milhões de toneladas em uma área plantada de 35,822 milhões de hectares, com uma produtividade estimada em 3,206 kg.ha⁻¹.

Com ampla distribuição geográfica e com o cultivo da soja em condições de sequeiro, podem reduzir a produtividade da soja, devido as mudanças climáticas e pelos fatores bióticos e abióticos (BASAL; SZABÓ, 2018; WIJEWARDANA et al., 2019; SILVA et al., 2020). Além da queda na produtividade, as perdas indiretas para o setor de agronegócios e a economia geral das regiões produtoras de soja podem ter consequências sociais adversas consideráveis e, atualmente, existem poucas opções para mitigar os problemas de déficit hídrico que afetam a produtividade agrícola. No entanto, uma das abordagens mais eficazes envolve o desenvolvimento de cultivares tolerantes ao déficit hídrico (NAKASHIMA et al., 2018).

Entre os estresses abióticos existentes, o déficit hídrico é o mais importantes, porque, tem reduzido a produtividade na agricultura, devido a sensibilidade da cultura da soja ao déficit hídrico (OH; KOMATSU, 2015; SEEPAUL et al., 2019), tornando-se um fator limitante na produção de grãos conforme a duração e intensidade do estresse (NEMESKÉRI; HELYES, 2019).

Para um desempenho adequado, a cultura da soja necessita um volume de água e uma boa distribuição de chuvas ao longo do seu ciclo, principalmente, durante as fases críticas de desenvolvimento. Sabe-se que a necessidade hídrica da cultura aumenta conforme o desenvolvimento da planta no período de floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia) (GAVA, 2014).

No estágio vegetativo, o déficit hídrico moderado, por um curto período, não reduz o rendimento da soja (LICHT et al., 2013). Entretanto, o período de 15 dias, principalmente, durante o estágio reprodutivo, afeta drasticamente o desenvolvimento da cultura da soja. Em consequência, podem ocorrer alterações morfológicas no crescimento vegetativo da planta e reduzir a quantidade e a qualidade das sementes, bem como o número de vagens e o peso seco, causando efeito negativo no rendimento final (KU et al., 2013; MONTOYA et al., 2017).

Diante desse cenário, torna-se necessário selecionar genótipos tolerantes ao déficit hídrico e, conseqüentemente, garantir a segurança alimentar (GONÇALVES et al., 2019). Entretanto, o estudo do comportamento das características em relação ao déficit hídrico, é de extrema relevância para o processo de seleção de genótipos tolerantes (GONÇALVES et al., 2019; UMBURANAS et al., 2019). Isso ocorre, porque, os genótipos de soja apresentam variações em relação ao déficit hídrico, e, neste estudo, a tolerância é considerada ao alto rendimento da cultura da soja, quando comparado os ambientes sem e com condições de déficit hídrico (OYA et al., 2004).

Para entender o comportamento dos caracteres, as estimativas dos parâmetros genéticos, auxiliam identificar a origem da expressão dos genes envolvidos nos caracteres quantitativos (CÂMARA et al., 2007). Estudos relacionados à caracteres são relevantes para cultura da soja, podendo ser morfológicos e fisiológicos (RAO; CHAITANYA, 2019) ou pelos componentes de produção (KUSWANTORO, 2019). Isso porque, as características fenotípicas, incluindo a de produção, são dependentes do genótipo (G), do ambiente (E) e das interações entre genótipo e ambiente (GXE). Estas interações demonstram a expressão dos genótipos em relação ao estímulo ambiental recebido, em que, o mesmo genótipo pode apresentar diferentes respostas durante os anos e o local de cultivo, sendo necessário a inclusão de genótipos adaptados e estáveis nos programas de melhoramento da soja (OCHIGBO et al., 2016; LARA et al., 2019).

Além disso, as correlações genéticas das características devem ser mais úteis do que as correlações fenotípicas, pois os efeitos ambientais são excluídos (MACHIKOWA; LAOSUWAN, 2011). Logo, a análise de trilha, permite decompor o coeficiente de correlação em efeitos diretos e indiretos das características em uma variável principal, permitindo avaliar os efeitos diretos e indiretos ente as características ou se existe influência de outras variáveis (NOGUEIRA et al., 2012; DVORJAK et al., 2019).

As informações da análise de trilha permitem aumentar as chances no processo de seleção por meio da seleção simultânea de um conjunto de caracteres de importância econômica. Para essa finalidade, a utilização de índice de seleção parece ser uma maneira eficiente, pois permite combinar as múltiplas informações contidas na unidade experimental,

de modo que seja possível a seleção com base em variáveis que reúna atributos de interesse econômico (CRUZ et al., 2012).

Para se obter o ganho máximo com o índice de seleção, as correlações entre as características, devem ser levadas em consideração em relação ao ambiente (MAZENGO et al., 2019). Isso ocorre, porque, os índices de seleção permitem ganhos simultâneos até mesmo para características que apresentam efeito oposto (RANGEL et al., 2011).

Dessa forma, os objetivos do trabalho foram:

1 – Identificar características auxiliares para a seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico e, selecionar genótipos tolerantes ao deficit hídrico para região de Minas Gerais.

2 - Selecionar genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico via o índice FAI-BLUP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASAL, O.; SZABÓ, A. Physiological traits and yield of three soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) genotypes as affected by water deficiency. **Acta Agraria Debreceniensis**, n. 74, p. 11-15, 2018.

CÂMARA, T.M.M.; BENTO, D.A.V.; ALVES, G.F.; SANTOS, M.F.; MOREIRA, J.U.V.; DE SOUZA, C.L. Parâmetros genéticos de caracteres relacionados à tolerância à deficiência hídrica em milho tropical. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 595-603, 2007.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2019), Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>. Acesso em 18 de Nov. 2019.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4º ed., Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 514 p.

DEVI, M.K.A.; KUMAR, G.; GIRIDHAR, P. Effect of biotic and abiotic elicitors on isoflavone biosynthesis during seed development and in suspension cultures of soybean (*Glycine max* L.). **3 Biotech**, v. 10, n. 3, p. 98, 2020.

DVORJAK, D.; et al. Correlations and path analysis in soybean progenies with resistance source to cyst nematode (race 3). **Comunicata Scientiae**, v. 10, n. 1, p. 168-175, 2019.

GAVA, R. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja** (*Glycine Max*, (L.) Merrill.). 2015. 33f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Departamento de Irrigação e Drenagem. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 2014.

GONÇALVES, J.G.R. et al. Drought tolerance evaluated in common bean genotypes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019.

KU, Y.S.; YEUNG, W.K.A.; YUNG, Y.L.; LI, M.W.; WEN, C.Q.; LIU, X.; LAM, H.M. Drought stress and tolerance in soybean. In: James E. Board Ed., **A comprehensive survey of international soybean research - genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships**, p. 209–238, InTech, 2013.

KUSWANTORO, H. Performance, similarity and genetic parameters of agronomical characters of soybean [*Glycine max* (L) Merrill.] germplasms. **Agriculture and Natural Resources**, v. 53, n. 3, p. 228–236-228–236, 2019.

LARA, L.M. et al. Methods of Soybean Genotypes Selection in Paraná State, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 2, 2019.

LICHT, M.A.; WRIGHT, D.; LENSSEN, A.W. Soybean Response to Drought. **Agriculture and Environment Extension Publications**, Iowa, p. 1-4, 2013.

MACHIKOWA, T.; LAOSUWAN, P. Path coefficient analysis for yield of early maturing soybean. **Songklanakarín Journal of Science & Technology**, v. 33, n. 4, 2011.

MAZENGO, K.D.; TRYPHONE, G.M.; TARIMO, A.J.P. Identification of drought selection indices of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes in the Southern Highlands of Tanzania. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 161-167, 2019.

MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural water management**, v. 193, p. 30-45, 2017.

NAKASHIMA, K.; et al. Application of biotechnology to generate drought-tolerant soybean plants in Brazil: development of genetic engineering technology of crops with stress tolerance against degradation of global environment. In: **Crop Production under Stressful Conditions**, p. 111-130, 2018.

NEMESKÉRI, E.; HELYES, L. Physiological Responses of Selected Vegetable Crop Species to Water Stress. **Agronomy**, v. 9, n. 8, p. 447, 2019.

NOGUEIRA, A.P.O.; et al. Análise de trilha e correlações entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 6, 2012.

OCHIGBO, A.E.; BELLO, L. L.; VANGE, T. Genotype by Environment Interaction of Soybean (*Glycine Max* L. Merrill) For Yield and Yield Components in the Savanna. **Journal of Agriculture and Veterinary Science**, v. 9, n. 8, p. 20-24, 2016.

OH, M.W.; KOMATSU, S. Characterization of proteins in soybean roots under flooding and drought stresses. **Journal of Proteomics**, v. 114, p. 161-181, 2015.

OYA, T., NEPOMUCENO, A. L., NEUMAIER, N., FARIAS, J. R. B., TOBITA, S., ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

RANGEL, R.M.; AMARAL JÚNIOR, A.T.; GONÇALVES, L.S.A.; FREITAS JÚNIOR, S. de P.; CANDIDO, L.S. Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 473-481, 2011.

RAO, D.E.; CHAITANYA, K.V. Morphological and Physiological Responses of Seven Different Soybean (*Glycine Max* (L.) Merrill.) Cultivars to Drought Stress. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 22, n. 4, p. 355-362, 2019.

SEEPAL, D.D.R. et al. Drought tolerance classification of common oilseed species using seed germination assay. **Journal of Oilseed Brassica**, v. 10, n. 2, p. 97-105, 2019.

SILVA, V.P.R. et al. Soybean yield in the MATOPIBA region under climate changes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 8-14, 2020.

SILVENTE, S.; SOBOLEV, A.P.; LARA, M. Metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive soybean genotypes in response to water stress. **Plos One**, v. 7, n. 6, p. e38554, 2012.

UMBURANAS, C. et al. Root attributes and seedling biomass of old and modern soybean cultivars under water deficit. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 31, n. 9, p. 688-696, 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Oilseeds: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA - Office of Global Analysis. October 2016. p. 1-37.

USDA. World Agricultural Supply and Demand Estimates (2018), Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em 10 de Dez. 2019.

VALLIYODAN, B.; YE, H.; SONG, L.; MURPHY, M.; SHANNON, J. G.; NGUYEN, H. T. Genetic diversity and genomic strategies for improving drought and waterlogging tolerance in soybeans. **Journal of experimental botany**, v. 8, n. 68, p. 1835-1849, 2017.

WIJewardana, C. et al. Water Deficit Effects on Soybean Root Morphology and Early-Season Vigor. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 836, 2019.

RESUMO

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. Capítulo I. **Identificação e uso de características auxiliares na seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico**. Orientador: Felipe Lopes da Silva. Coorientadores: Pedro Crescêncio Souza Carneiro e Luiz Antônio dos Santos Dias.

A identificação de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico tem sido relevante para os programas de melhoramento. Desta forma, torna-se necessário identificar características auxiliares para seleção de genótipos tolerantes, como fonte de germoplasma, para desenvolver genótipos tolerantes para região de Minas Gerais. Noventa e três cultivares de soja foram avaliados na condição de controle (-10 kPa e -33 kPa) e sob deficit hídrico (-900 kPa), pela metodologia baseada na determinação da capacidade de vaso, utilizando o método da curva de retenção de água no solo, em casa de vegetação. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com três repetições e as cultivares foram divididas em dois grupos para avaliação. O primeiro grupo, composto de 48 cultivares, foi avaliado nos anos de 2016 e 2017, ensaios denominados de 2016-1 e 2017-1, e o segundo grupo, com 48 cultivares, avaliado nos anos de 2016 e 2018, ensaios 2016-2 e 2018-2. Três cultivares foram coincidentes aos dois grupos de cultivares. O deficit hídrico foi induzido no início do estágio R5, fase de enchimento de grãos, e foi mantido durante quinze dias. Após este período, os tratamentos sob deficit hídrico voltaram a ser irrigados, sendo mantidos na capacidade de campo, semelhante ao tratamento controle. As características massa de semente (MS), massa de vagem (MV), massa de haste (MH), massa de raiz (MR), volume de raiz (VR), diâmetro da haste (DH), cor da vagem (CV), vagem chocha (VCH), número de sementes (NS), número de vagens (NV) e massa de cem grãos (M100g) foram avaliadas no final do ciclo da cultura. Análise de variância, estimativa de parâmetro genéticos, decomposição da interação e análise de trilha foram realizadas para entender o comportamento das características sob condição de controle e deficit hídrico. Na análise de trilha foi constatado que os efeitos diretos e indiretos apresentaram maiores magnitudes em condição controle quando comparado ao deficit hídrico. Além disso, as características M100G, NV, NS e MV foram identificadas como relevantes na seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico. Foram identificados, por meio do índice de seleção aditivo, baseado no peso econômico das características encontradas, 20 genótipos tolerantes apresentando bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, além disso, 3 genótipos com bom desempenho somente no ambiente sob condição de deficit hídrico, nos ensaios 2016-1 e 2017-1. Nos ensaios 2016-2 e 2018-2, foram selecionados 15 genótipos

tolerantes apresentando bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, 9 genótipos com bom desempenho sob condição de deficit hídrico.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Efeito direto. Efeito indireto. *Glycine max* L. Produtividade.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. Chapter I. **Identification and use of auxiliary characteristics in the selection of water deficit tolerant soybean genotypes**. Adviser: Felipe Lopes da Silva. Co-advisers: Pedro Crescêncio Souza Carneiro and Luiz Antônio dos Santos Dias.

The identification of water deficit tolerant soybean genotypes has been relevant for breeding programs. Thus, it becomes necessary to identify auxiliary characteristics for the selection of tolerant genotypes, as a source of germplasm, to develop tolerant genotypes for the region of Minas Gerais. Ninety-three soybean cultivars were evaluated in the control condition (-10 kPa and -33 kPa) and under water deficit (-900 kPa), by the methodology based on the determination of the pot capacity, using the water retention curve method in the soil, in greenhouse. The experiment was conducted in a randomized block design, with three replications and the cultivars were divided into two groups for evaluation. The first group, composed of 48 cultivars, was evaluated in the years 2016 and 2017, trials named 2016-1 and 2017-1, and the second group, with 48 cultivars, evaluated in the years 2016 and 2018, trials 2016-2 and 2018-2. Three cultivars coincided with the two groups of cultivars. The water deficit was induced at the beginning of the R5 stage, the grain filling phase, and was maintained for fifteen days. After this period, the treatments under water deficit were again irrigated, being maintained in the field capacity, similar to the control treatment. The characteristics seed mass (MS), pod mass (MV), stem mass (MH), root mass (MR), root volume (VR), stem diameter (DH), pod color (CV), seedless pod (VCH), number of seeds (NS), number of pods (NV) and mass of one hundred grains (M100g) were evaluated at the end of the culture cycle. Analysis of variance, genetic parameter estimation, interaction decomposition and trail analysis were performed to understand the behavior of the characteristics under control and water deficit conditions. In the trail analysis it was found that the direct and indirect effects showed greater magnitudes in control condition when compared to the water deficit. In addition, the characteristics M100G, NV, NS and MV were identified as relevant in the selection of water deficit tolerant genotypes. Through the additive selection index, based on the economic weight of the characteristics found, 20 tolerant genotypes showing good performance under control and water deficit conditions, and, in addition, 3 genotypes with good performance only in the environment under water deficit condition, in trials 2016-1 and 2017-1. In trials 2016-2 and 2018-2, 15 tolerant genotypes were selected, showing good performance under control and water deficit conditions, and 9 genotypes with good performance under water deficit condition.

Keywords: Abiotic stress. Direct effect. Indirect effect. *Glycine max* L. Productivity.

1. INTRODUÇÃO

As atividades econômicas relacionadas à produção de soja cresceram nas últimas décadas, devido às aplicações na indústria de alimentos e na produção de biodiesel. Esses são alguns dos fatores que fazem com que a soja represente o quarto grão mais consumido e produzido no mundo (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014). A *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OCDE) estima que a produção brasileira de soja deve crescer 2,6% ao ano de 2017 a 2026, contra uma média de 1,9% no mundo, para suprir a demanda global (OECD, 2017). Além disso, considerando os dados históricos da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a área plantada com soja aumentou 18,9% na safra 2018/2019 quando comparada à safra 2013/2014 (CONAB, 2019), sendo cultivada do Norte ao Sul do Brasil.

Com a ampla distribuição geográfica da cultura da soja no Brasil, restrições para o aumento da produtividade de grãos são impostas por fatores bióticos e abióticos. Entre os fatores abióticos, o déficit hídrico tem sido responsável pela redução da produtividade na agricultura mundial, levando a reduções drásticas na produtividade e na qualidade de sementes e grãos (WU et al., 2011; KU et al., 2013).

Minas Gerais é uma região que vem se destacando em relação a produção da soja, mas, devido a disponibilidade hídrica, distribuição irregular de chuvas ao longo do ano e veranicos, pode comprometer o desenvolvimento adequado da cultura, principalmente a produtividade (PÁDUA et al., 2014).

Logo, identificar genótipos de soja tolerantes ao déficit hídrico, tem sido uma tarefa difícil, devido às complexidades das respostas das plantas, da fenotipagem e da identificação de características que contribuem para selecionar os melhores genótipos sob condições de déficit hídrico (GIORDANI et al., 2019). Assim, a obtenção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico, visando aumento da produtividade se torna um objetivo importante no melhoramento da soja (PEIRONE et al., 2018).

Em um programa de melhoramento para seleção de genótipos tolerantes à estresses abióticos, duas estratégias podem ser adotadas: introdução de germoplasma adaptado ou por hibridação e seleção de caracteres associados à esta característica. Nesta última, são necessários informações dos parâmetros genéticos da característica de interesse (AKRAM et al., 2011) e de características que possuem correlações significativas a mesma, visando utilizar a variabilidade genética no processo de seleção (MAHBUB et al., 2015).

As correlações dos caracteres, podem ser estudadas por meio da análise de trilha, permitindo entender a decomposição do coeficiente de correlação em efeitos diretos e indiretos das características em uma variável principal, permitindo entender a relação entre duas variáveis, além de fornecer a importância relativa dos efeitos, em determinada condição (AKRAM et al., 2011; HAGHI et al., 2012) informações que auxiliam na seleção por meio de índice de seleção.

Os índices de seleção são metodologias que permitem a identificação de genótipos superiores, levando em consideração características de importância econômica, aumentando o progresso do programa de melhoramento genético (CRUZ, 2013; LEITE et al., 2018).

Baseado no exposto, o objetivo é identificar características auxiliares para a seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico. Posteriormente, selecionar genótipos tolerantes ao déficit hídrico, como fonte de germoplasma, para desenvolver genótipos tolerantes para região de Minas Gerais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material Genético

Foram utilizados 93 cultivares de soja oriundas de diferentes programas de melhoramento no Brasil (Apêndice A e B). As cultivares foram divididas em dois grupos, no primeiro foram utilizadas 48 cultivares que foram avaliadas em dois ensaios um realizado em 2016, denominado neste trabalho de 2016-1, e um em 2017, 2017-1. No segundo grupo foram utilizadas 48 cultivares, sendo três pertencentes também ao primeiro grupo, que foram avaliadas em dois ensaios nos anos de 2016 e 2018, um em cada ano, denominados de 2016-2 e 2018-2, respectivamente.

Os ensaios foram desenvolvidos em casa de vegetação e foram utilizados como unidade experimental vasos com capacidade de 7,5 litros. O delineamento experimental utilizado para cada ensaio, foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial com dois fatores, com três repetições. O primeiro fator foi composto pelas cultivares e o segundo fator foi composto pela disponibilidade hídrica, sendo o tratamento controle, solo irrigado até a capacidade de campo, e o tratamento sob déficit hídrico. A imposição das disponibilidades hídrica será detalhada posteriormente ainda neste tópico.

O substrato foi composto por solo e areia na proporção de 3:2, respectivamente. Após a confecção do substrato foi realizada análise química e física (Tabela 1) necessárias para a

correção da fertilidade e para a imposição da metodologia de estresse hídrico utilizada no presente trabalho. Na correção da fertilidade do substrato utilizou-se as exigências nutricionais da cultura da soja seguindo os valores de extração e exportação da cultura para produção de três toneladas por hectare, conforme demonstrado por Câmara (2015).

Antes do plantio, as sementes foram tratadas com fungicida Carbedazin + Thiram, na dose de 200 mL por 100 kg de sementes. Na semeadura foram utilizadas cinco sementes por vaso e, após a emergência das plantas, foi efetuado o desbaste sendo deixado somente uma planta por vaso.

2.2 Metodologia de deficit hídrico

As plantas receberam suprimento hídrico, necessário para atingir a capacidade de campo do solo, até o estágio fenológico R5, correspondente ao período de enchimento de grãos de acordo com a escala de Fehr e Caviness (1977). A partir desse estágio, os tratamentos com aplicação do deficit hídrico, foram induzidos durante o período de quinze dias, pela metodologia desenvolvida pelo Programa de Melhoramento da Soja da Universidade Federal de Viçosa, conforme descrito por Dantas (2018).

Essa metodologia se baseia na determinação da capacidade de vaso pelo método da curva de retenção de água no solo. Para aplicação dessa metodologia de imposição do deficit hídrico, foi necessário a realização da análise física do solo dos experimentos conforme apresentado na Tabela 1. Em análise, verificou-se que os ensaios realizados apresentaram classe textural franco argiloso arenoso.

Tabela 1. Resumo da análise física dos solos utilizados em cada ensaio conforme classificação adotada por Lemos e Santos (1984).

Ensaio	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	-----%			
2016-1	50	15	35	Franco argiloso arenoso
2016-2	56	13	31	Franco argiloso arenoso
2017-1	66	4	30	Franco argiloso arenoso
2018-2	58	8	34	Franco argiloso arenoso

Em seguida, elaborou-se uma curva de retenção com base no teor de argila do solo, nas tensões -6, -10, -40, -80, -100, -400 e -1500 kPa, baseado no conteúdo de água no solo para cada tensão. Por meio desta, ajustou-se uma equação de regressão do tipo potencial pelo modelo de Van Genuchten (1980) para cada ensaio (Figura 1). Com essas informações, calculou-se o conteúdo de água no solo em capacidade de campo estabelecendo para isto os potenciais de -10 kPa, para os experimentos de 2016-1, 2017-1 e 2018-2, e -33 kPa para o ensaio de 2016-2. Para o conteúdo de água aplicado no deficit hídrico adotou-se para todos os ensaios o potencial de -900 kPa.

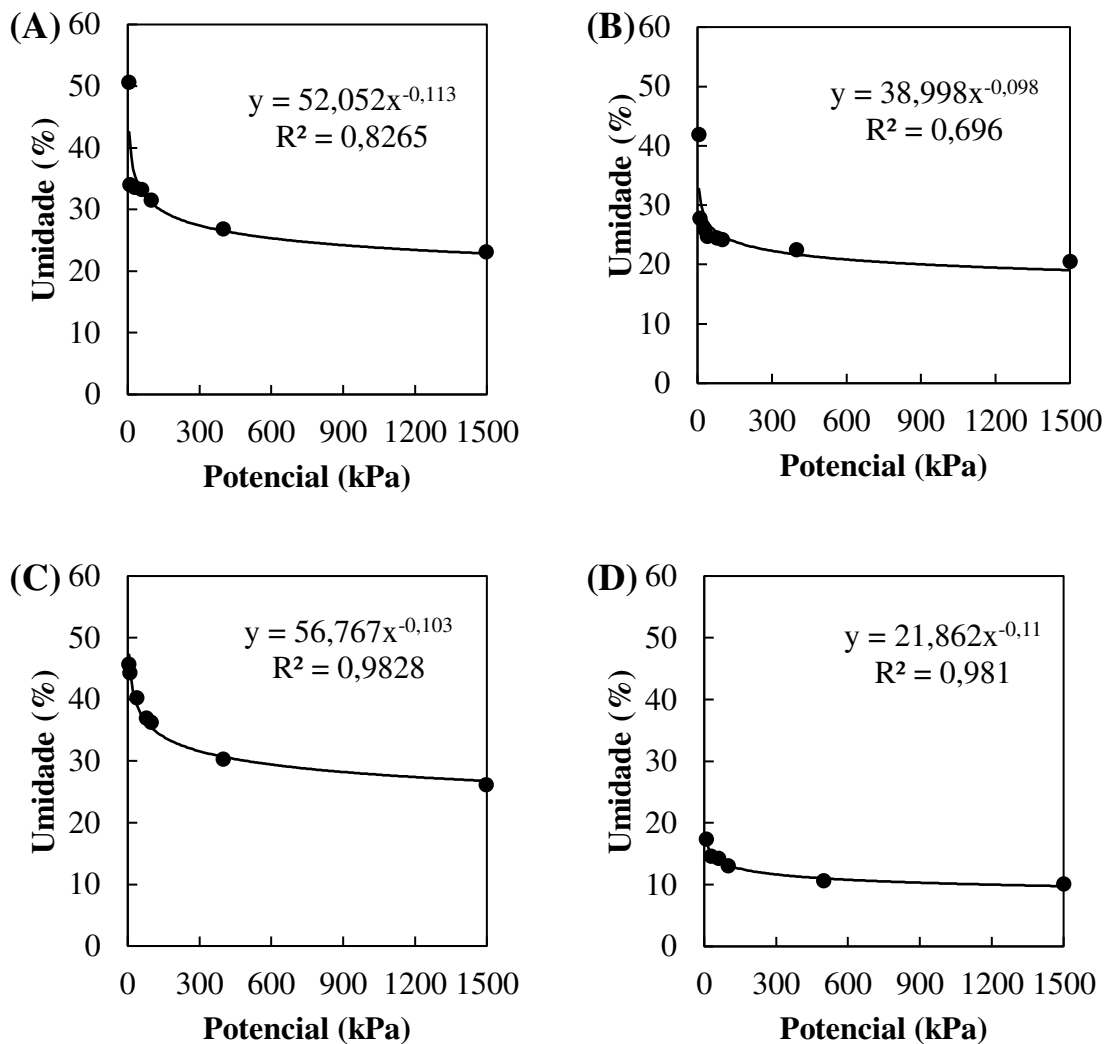


Figura 1. Curva de retenção dos solos utilizados nos ensaios nos anos de 2016-1 (A), 2016-2 (B), 2017-1 (C) e 2018-2 (D).

No momento do enchimento dos vasos, a massa do sistema vaso + solo foi padronizada para 6,50 kg. Dez amostras de solo foram coletadas para determinação da umidade e obtenção da massa úmida do solo (M_{su}). Para a determinação da massa do solo seco (M_{ss}) as amostras

foram levadas para a estufa de circulação de ar forçada a 105 °C por 48 horas e posteriormente foram pesadas em balança.

Após a instalação dos ensaios, foi elaborado um sistema, composto pela massa de água ($M_{\text{água}}$), do solo seco (M_{ss}), do vaso (M_{vas}) e da planta (M_{planta}), sendo definida a equação da massa do sistema (M_{sist}) por meio do estimador:

$$M_{\text{sist}} = M_{\text{vas}} + M_{\text{ss}} + M_{\text{água}} + M_{\text{planta}}$$

A massa da planta (M_{planta}) foi determinada a partir da mensuração da matéria fresca de plantas no respectivo estágio fenológico. Para isso, acrescentou-se plantas adicionais às parcelas, sendo cultivadas paralelamente com as plantas que foram avaliadas.

A massa do sistema, em seus respectivos ensaios, passou a ser monitorado e mantido como a massa a ser atingida todos os dias por meio de manejo de irrigação. Durante o período de imposição do estresse, uma amostra representativa de seis vasos por bloco, foram pesados diariamente às 10 e 16 horas, e, a partir da diferença de massa correspondente a cada tratamento, a lâmina de água foi aplicada para atingir os potenciais hídricos preestabelecidos para os tratamentos controle (-10 kPa e -33 kPa) e com imposição do deficit hídrico (-900 kPa).

Passado o período de imposição do deficit hídrico as plantas voltaram a ser irrigadas à capacidade de campo até o final do ciclo. Ao atingirem o estágio R8 foram avaliadas as seguintes características por planta: massa de sementes (g planta^{-1}) (MS); massa de vagem (g planta^{-1}) (MV); massa de haste (g planta^{-1}) (MH); massa de raiz (g planta^{-1}) (MR); volume de raiz ($\text{cm}^3 \text{ planta}^{-1}$) (VR); diâmetro da haste (mm) (DH); número de vagens chochas (VCH); número de vagens com um grão (VIG); número de vagens com dois grãos (V2G); número de vagens com três grãos (V3G); número de vagens com quatro grãos (V4G); número total de sementes por planta (NS); número total de vagens por planta (NV); razão entre o número total de sementes e número de vagens (NS/NV); massa de cem grãos (g) (M100G); cor de vagem (CV).

O volume das raízes foi obtido por meio da medição do deslocamento da coluna de água em proveta graduada, de acordo com a metodologia descrita por Basso (1999). Após a lavagem das raízes, foram colocadas na proveta contendo um volume de água conhecido e, em seguida, as raízes mergulhadas, sendo o volume radicular correspondente ao volume de água deslocado na proveta, expresso em cm^3 .

Para mensuração das massas secas das características avaliadas, o material vegetal foi colocado em estufa com à circulação de ar forçada à temperatura de 65° C até atingir o peso constante (NETO et al., 2011). Após atingir o peso constante, as plantas foram pesadas com auxílio de uma balança digital da marca GEHAKA com capacidade máxima de 404 gramas.

A avaliação da cor da vagem (CV) foi realizada para verificar se há relação com déficit hídrico. Sendo assim, foi elaborado uma escala com seis cores variando entre amarelo-palha, marrom e cinza, correspondentes as cores da vagem da cultura da soja, de acordo com os genótipos estudados.

2.3 Análise de variância para cada ensaio

O modelo estatístico para análise experimental de cada ensaio foi dado por:

$$Y_{ijk} = m + G_i + B_k + A_j + GA_{ij} + E_{ijk}$$

Em que:

m: média geral;

G_i : efeito do i-ésimo genótipo ($i = 1, 2, \dots, 48$) (efeito aleatório);

B_k : efeito de bloco;

A_j : efeito da j-ésima disponibilidade de água ($j =$ controle, déficit hídrico) (efeito fixo);

GA_{ij} : efeito da interação dos genótipos por disponibilidade hídrica (efeito fixo);

e_{ijk} : erro aleatório.

2.4 Decomposição da interação genótipo e ambiente (GA)

Utilizou-se o método proposto por Cruz e Castoldi (1991) para a decomposição da interação GA, em que:

$$S = \frac{1}{2}(\sqrt{Q1} - \sqrt{Q2})^2$$

$$C = \sqrt{(1 - r)^3 Q1Q2}$$

S e C: partes simples e complexa da interação, respectivamente;

r: correlação entre médias de genótipos nas duas disponibilidades hídrica; e,

Q1 e Q2: quadrados médios de genótipos nas disponibilidades hídrica no controle e no déficit hídrico, respectivamente.

2.5 Análise de variância conjunta

Após a verificação da homogeneidade das variâncias residuais para todos os ensaios, a análise conjunta foi realizada para os pares de ensaios que possuíam todos os genótipos em comum, seguindo o modelo:

$$Y_{ijklm} = m + G_i + A_j + L_k + (B/A) / L_{jkm} + GA_{ij} + GL_{ik} + AL_{jk} + GAL_{ijk} + E_{ijklm}$$

Em que:

m: média geral;

G_i , A_j e L_k : efeito de genótipos (efeito fixo), ensaio (efeito aleatório) e disponibilidade hídrica (efeito fixo), respectivamente;

$(B/A) / L_{jm}$: efeito de blocos dentro de disponibilidades hídrica e dentro de ensaios (efeito aleatório);

GA_{ij} , GL_{ik} e LA_{jk} : efeitos das interações de primeira ordem entre genótipos e disponibilidades hídrica (efeito fixo); genótipos e ensaios (efeito aleatório); e, ensaios e disponibilidades hídricas (efeito aleatório), respectivamente;

GAL_{ijk} : efeito da interação tripla entre genótipos, disponibilidade hídrica e ensaios (efeito aleatório); e

E_{ijklm} : erro aleatório.

2.6 Análise de trilha

A análise de trilha foi realizada para os pares de ensaios que possuíam todos os genótipos em comum com o propósito de identificar característica ou grupo de características que auxiliam no processo de identificação de genótipos tolerantes ao deficit hídrico e responsivos à disponibilidade hídrica, por meio da contribuição relativa e da correlação das características (Figura 2). As análises foram realizadas em cada disponibilidade hídrica dentro dos ensaios.

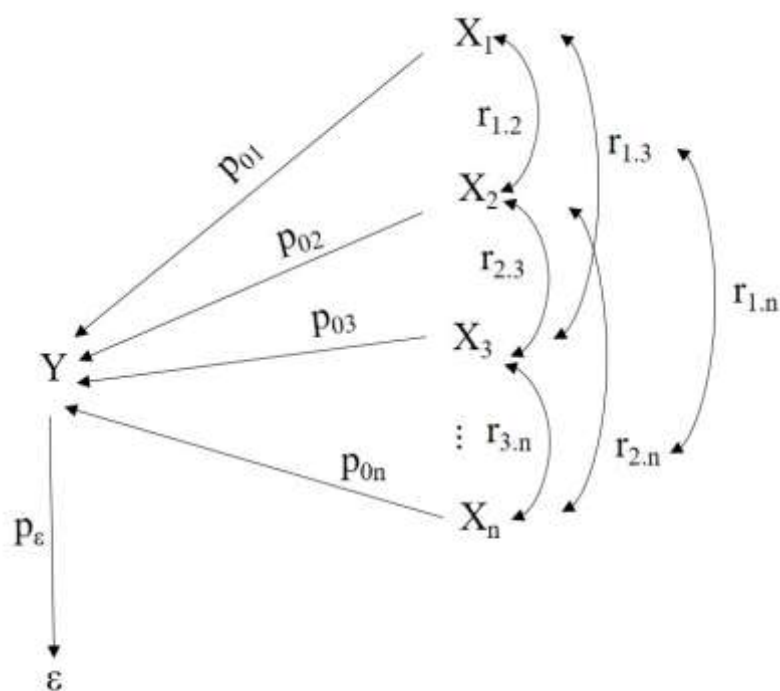


Figura 2. Diagrama de trilha demonstrando os efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas (X_1, X_2, X_3 e X_n) e residual (ε) sobre a variável principal Y . As setas curvas na vertical mostram correlações (r) entre as variáveis dependentes. No diagrama, os efeitos diretos do modelo são representados pelas setas que saem dos X 's diretamente para Y , já os efeitos indiretos são obtidos seguindo as setas necessárias e multiplicando o valor de cada uma.

Para análise de trilha fez-se necessário a logaritimização para as características massa de sementes (MS), número de vagem (NV) e massa de cem grão (M100G), porque, o modelo que explica a produtividade da cultura da soja é multiplicativo, sendo necessário torná-lo aditivo, visto que esta é uma das premissas da análise de trilha (SANTOS et al., 1995).

Antes de processar a análise de trilha, realizou-se o diagnóstico de multicolinearidade na matriz de correlação fenotípica, pelo número de condição da matriz (NC), proposto por Montgomery et al. (2012), que consiste na razão do maior pelo menor autovalor da matriz. Quando houver multicolinearidade moderada ($100 < NC < 1000$), ou severa ($NC > 1000$), os coeficientes da análise de trilha estimados não são confiáveis, devido às elevadas variâncias associadas aos coeficientes estimados (CARVALHO; CRUZ, 1996). No entanto, na presença de multicolinearidade fraca ($NC < 100$), não há problemas quanto à confiabilidade dos coeficientes da análise de trilha.

Em seguida, a análise de trilha foi realizada, desdobrando os efeitos diretos e indiretos entre as características em estudo conforme descrito por Cruz et al. (2012) com auxílio do programa Genes (CRUZ, 2013).

2.7 Índice de seleção

Visando a seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico, utilizou-se uma modificação da metodologia de estimativa de pesos econômicos (W_k), proposta por Viana e Resende (2014), em cada uma das disponibilidades hídricas dentro dos pares de ensaios que possuíam genótipos em comum. Os pesos econômicos foram definidos, utilizando como medida do grau de associação entre variáveis, o efeito direto das características com a massa de sementes, adotada como variável principal. Para tanto utilizou-se o estimador:

$$W_k = \frac{r_{xk}}{1 + \sum_{k=1}^n r_{xk}}$$

Em que,

r_{xk} é o valor do efeito direto, em módulo, da k-ésima característica sob a característica massa de sementes por planta (MS) (x), sendo $k \neq x$.

O peso econômico adotado para a característica principal foi obtido por:

$$W_x = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n r_{xk}}$$

3. RESULTADOS

As informações completas das análises de variância dos ensaios 2016-1, 2016-2, 2017-1 e 2018-2, podem ser verificados nos Apêndices C, D, E e F. É possível visualizar o efeito da fonte de variação Ambiente, referente a controle e deficit hídrico, para cada ensaio por meio da análise de variância.

Pode ser observado que, em todas os ensaios, houve diferenças significativas entre as condições de disponibilidade hídrica para as características: massa de semente (MS), massa de vagem (MV), vagem chocha (VCH), vagem com dois grãos (V2G), vagem com três grãos (V3G), número de sementes (NS) e número de vagens (NV).

Esse efeito significativo, indica que o controle se diferenciou do ambiente sob condições de déficit hídrico, indicando que a metodologia aplicada foi eficiente para contrastar os genótipos ao efeito do estresse.

As Tabelas 2 e 3, apresentam estimativas dos parâmetros genéticos e fenotípicos no ambiente controle e em condição de déficit hídrico, auxiliando na seleção dos caracteres de importância para cultura da soja.

Pode verificar que no controle as médias foram maiores quando comparadas ao ambiente em déficit hídrico. Já para os valores estimados de herdabilidade, não houve padronização da alteração entre os ambientes controle e em deficit hídrico dentre as características avaliadas.

A razão CV_g/CV_e pode ser empregada como índice indicativo do grau da facilidade de seleção dos genótipos para a característica em questão. Assim, dentro de um mesmo ensaio, a condição controle ou déficit hídrico que apresentar maior razão (>1) mais fácil será a seleção. Porém, semelhante à herdabilidade, a razão CV_g/CV_e para as características avaliadas apresentaram variação em relação à disponibilidade de água (Tabelas 2 e 3). Contudo, verifica-se que quanto maior a herdabilidade maior é o valor da razão CV_g/CV_e .

Nota-se que no ensaio 2016-2, no ambiente controle (Tabela 3), os valores da razão CV_g/CV_e e herdabilidade, referente à característica razão entre o número de sementes e número de vagem (NS/NV), foram negativos, conseqüentemente, os efeitos são considerados nulos. Isso ocorre quando o quadrado médio do resíduo (QMR) é maior que o efeito genotípico.

Essa variação entre os ambientes, demonstra que, para cada uma das características, os genes que estão sendo expressos sob deficit hídrico são diferentes do ambiente controle.

Tabela 2. Média e estimativas da razão entre o coeficiente de variação genética e coeficiente de variação experimental (CVg/CVe) e da herdabilidade no sentido amplo (h_g^2) das características avaliadas em condição de controle (C) e deficit hídrico (E), nos ensaios conduzidos em 2016-1 e 2017-1.

2016-1		MS		MV		MH		MR		VR		DH		CV		VCH	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	43,44	30,87	16,69	13,62	17,22	16,53	5,24	5,41	20,82	22,23	7,24	7,19	2,84	2,66	0,58	1,79	
CVg/CVe	0,17	0,57	1,36	1,48	1,81	1,71	0,97	0,68	0,86	0,90	0,88	1,08	2,07	2,14	0,88	0,80	
h_g^2	0,07	0,49	0,84	0,86	0,90	0,89	0,74	0,58	0,68	0,71	0,69	0,77	0,92	0,93	0,69	0,65	
		V1G		V2G		V3G		V4G		NS		NV		NS/NV		M100G	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	6,35	5,35	63,3	55,91	36,78	29,99	0,80	0,37	240,01	196,91	107,25	91,64	2,26	2,16	18,34	15,93	
CVg/CVe	0,92	0,27	1,29	1,89	1,71	1,35	2,01	0,63	1,00	1,41	0,92	1,35	0,71	0,99	1,07	1,27	
h_g^2	0,71	0,17	0,83	0,91	0,89	0,84	0,92	0,54	0,74	0,85	0,71	0,84	0,60	0,74	0,77	0,82	

2017-1		MS		MV		MH		MR		VR		DH		CV		VCH	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	29,07	22,35	15,86	11,36	16,43	16,34	7,02	5,97	25,09	24,39	8,59	9,15	3,51	3,55	4,63	10,76	
CVg/CVe	0,39	0,64	0,50	0,68	1,35	1,80	1,54	0,45	0,66	0,54	0,95	0,18	2,43	1,94	0,42	0,56	
h_g^2	0,31	0,55	0,42	0,58	0,84	0,90	0,87	0,37	0,56	0,46	0,72	0,08	0,94	0,91	0,34	0,48	
		V1G		V2G		V3G		V4G		NS		NV		NS/NV		M100G	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	13,11	10,76	54,36	43,01	42,15	32,52	1,20	0,61	236,5	176,47	110,85	85,54	2,18	2,09	12,57	13,07	
CVg/CVe	1,01	0,56	1,54	1,46	1,36	1,69	0,51	0,83	1,35	0,83	1,06	0,99	0,65	0,36	1,26	0,97	
h_g^2	0,75	0,48	0,87	0,86	0,84	0,89	0,43	0,67	0,84	0,67	0,76	0,74	0,55	0,27	0,82	0,73	

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

Tabela 3. Média e estimativas da razão entre o coeficiente de variação genética e coeficiente de variação experimental (CVg/CVe) e da herdabilidade no sentido amplo (h_g^2) das características avaliadas em condição de controle (C) e deficit hídrico (E), nos ensaios conduzidos em 2016-2 e 2018-2.

2016-2		MS		MV		MH		MR		VR		DH		CV		VCH	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	5,81	3,27	3,48	2,09	2,81	3,22	1,04	1,35	4,05	4,75	4,33	4,74	4,07	4,18	3,8	5,45	
CVg/CVe	0,80	0,75	0,64	1,01	1,18	1,59	0,88	0,90	0,62	0,84	0,41	0,57	1,10	0,77	0,38	0,09	
h_g^2	0,66	0,62	0,55	0,75	0,80	0,88	0,70	0,70	0,53	0,67	0,33	0,49	0,78	0,64	0,30	0,02	
		V1G		V2G		V3G		V4G		NS		NV		NS/NV		M100G	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	5,13	3,34	14,07	8,09	8,14	5,30	0,07	0,06	59,76	31,54	27,43	16,81	1,25	0,02	9,85	9,84	
CVg/CVe	0,44	0,33	0,57	0,72	0,79	0,66	0,55	0,15	0,19	0,64	0,58	0,62	-99,00	0,36	0,69	0,35	
h_g^2	0,37	0,24	0,49	0,61	0,65	0,56	0,47	0,05	0,09	0,55	0,50	0,53	-0,02	0,28	0,59	0,26	

2018-2		MS		MV		MH		MR		VR		DH		CV		VCH	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	25,54	21,02	13,55	11,14	17,86	17,17	13,21	13,93	43,15	44,29	0,36	0,36	4,03	4,11	3,25	7,06	
CVg/CVe	0,32	0,73	0,92	0,92	0,92	1,25	1,00	0,73	0,81	0,92	0,07	0,38	1,03	1,11	0,66	0,71	
h_g^2	0,23	0,61	0,71	0,71	0,71	0,82	0,75	0,61	0,66	0,71	0,01	0,30	0,76	0,78	0,56	0,60	
		V1G		V2G		V3G		V4G		NS		NV		NS/NV		M100G	
Descrição	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	
Média	8,04	6,39	36,42	31,26	46,40	39,87	0,81	0,78	194,78	159,92	91,69	78,31	2,14	2,06	13,76	13,68	
CVg/CVe	0,91	0,84	1,67	1,36	1,40	1,33	0,91	0,60	0,97	0,97	1,19	0,95	0,98	0,87	0,70	0,82	
h_g^2	0,71	0,68	0,89	0,84	0,85	0,84	0,71	0,51	0,73	0,73	0,81	0,73	0,74	0,69	0,59	0,67	

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; VIG: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

Com a finalidade de entender a interação genótipo e ambiente (GXA), realizou-se a decomposição em partes simples e complexa, para as características que apresentaram interação GA significativa nos ensaios em estudo (Tabela 4).

Verifica-se que houve uma predominância da parte complexa na formação da interação GA em todos os ensaios, principalmente, para a característica massa de semente (MS), a qual, no ensaio 2017-1, a parte complexa foi responsável por 90,93 % da interação (Tabela 4).

O tipo de interação complexa torna a seleção de genótipos tolerantes à disponibilidade hídrica mais difícil. Neste sentido a seleção para ambiente específico seria a mais favorável para a obtenção de ganhos.

Tabela 4. Decomposição da interação (GA) em parte simples e complexa nos ensaios 2016-1 e 2017-1 e, 2016-2 e 2018-2.

Parte Simples									
Safra	MS	MH	MR	CV	VCH	V1G	V3G	V4G	M100G
2016-1	-	44,35	-	59,51	48,73	8,97	55,05	96,21	41,49
2017-1	9,07	68,98	47,62	45,34	-	-	-	-	44,08
2016-2	-	-	-	32,59	-	-	-	-	-
2018-2	-	-	-	-	19,90	-	-	-	-
Parte Complexa									
Safra	MS	MH	MR	CV	VCH	V1G	V3G	V4G	M100G
2016-1	-	55,65	-	40,49	51,27	91,03	44,95	3,79	58,51
2017-1	90,93	31,02	52,38	54,66	-	-	-	-	55,92
2016-2	-	-	-	67,41	-	-	-	-	-
2018-2	-	-	-	-	80,10	-	-	-	-

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

Na sequência, a análise conjunta de cada par de ensaios que possuíam genótipos em comum foi realizada a fim de avaliar a influência dos diferentes ensaios na interação genótipos por disponibilidades hídrica (GA) (Tabela 5 e 6).

A interação genótipos por ensaios (GK), considerando o grupo de genótipos avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1 (Tabela 5), apresentou efeito significativo para todas as características com exceção do diâmetro da haste (DH). Já o efeito da interação genótipos por disponibilidades hídrica (GA) foi significativo somente para as características massa de haste (MH), massa de raiz (MR), cor de vagem (CV), vagem com três grãos (V3G), vagem com quatro grãos (V4G) e número de sementes (NS).

Tabela 5. P-valores para os principais fatores de interação para as características avaliadas em 48 genótipos de soja, cultivadas sob condição de controle e deficit hídrico nos ensaios conduzidos em 2016-1 e 2017-1.

Variáveis	K	A	G	KA	GK	GA	GKA
MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,24	0,34
MV	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,47	0,59
MH	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MR	<0,01	0,00	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
VR	<0,01	0,56	<0,01	0,09	<0,01	0,15	0,82
DH	<0,01	0,36	0,08	0,27	0,10	0,56	0,23
CV	<0,01	0,13	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
VCH	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,30
V1G	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,13	<0,01
V2G	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	0,25	0,28
V3G	<0,01	<0,01	<0,01	0,13	<0,01	<0,01	<0,01
V4G	0,18	<0,01	<0,01	0,74	<0,01	<0,01	0,82
NS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,43
NV	0,20	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,86	0,32
NS/NV	<0,01	<0,01	<0,01	0,85	<0,01	0,56	0,21
M100G	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	<0,01

K: efeito de ensaios; A: efeito de disponibilidade hídrica; G: efeito de genótipos; KA: efeito da interação ensaios por disponibilidades hídrica; GK: efeito da interação genótipos por ensaios; GA: efeito da interação genótipos por disponibilidades hídrica; GKA: efeito da interação tripla entre genótipos, ensaios e disponibilidades hídrica.

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

O mesmo foi observado para o grupo de genótipos avaliados nos ensaios 2016-2 e 2018-2 (Tabela 6), em que o efeito da interação GA foi significativo somente para as características massa de semente (MS), cor da vagem (CV), vagem chocha (VCH) e massa de cem grãos (M100G). Já para a interação GK não houve significância apenas para as características cor de vagem (CV) e a razão entre o número de sementes e número de vagem (NS/NV).

Devido aos efeitos das interações evidencia-se a necessidade da avaliação dos grupos de genótipos em pelo menos dois ensaios, como os aqui realizados, a fim de obter êxito no processo de seleção.

Tabela 6. P-valores para os principais fatores de interação para as características avaliadas em 48 genótipos de soja, cultivadas sob condição de controle e deficit hídrico nos ensaios conduzidos em 2016-2 e 2018-2.

Variáveis	K	A	G	KA	GK	GA	GKA
MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,40
MV	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,12	0,5
MH	<0,01	0,60	<0,01	<0,01	<0,01	0,80	0,71
MR	<0,01	0,25	<0,01	0,64	<0,01	0,16	0,23
VR	<0,01	0,40	<0,01	0,84	<0,01	0,15	0,23
DH	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	0,57
CV	0,45	0,24	<0,01	0,82	0,05	<0,01	0,51
VCH	0,19	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,12
V1G	<0,01	<0,01	<0,01	0,85	<0,01	0,93	0,39
V2G	<0,01	<0,01	<0,01	0,52	<0,01	0,64	0,99
V3G	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,19	0,21
V4G	<0,01	0,84	<0,01	0,90	<0,01	0,81	0,96
NS	<0,01	<0,01	<0,01	0,33	<0,01	0,13	0,36
NV	<0,01	<0,01	<0,01	0,12	<0,01	0,34	0,56
NS/NV	<0,01	0,09	0,16	0,54	0,89	0,10	0,20
M100G	<0,01	0,91	<0,01	0,93	<0,01	<0,01	0,25

K: efeito de ensaios; A: efeito de disponibilidade hídrica; G: efeito de genótipos; KA: efeito da interação ensaios por disponibilidades hídrica; GK: efeito da interação genótipos por ensaios; GA: efeito da interação genótipos por disponibilidades hídrica; GKA: efeito da interação tripla entre genótipos, ensaios e disponibilidades hídrica.

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

A análise de trilha foi realizada com o propósito de identificar características que possam auxiliar no processo de identificação de genótipos tolerantes ao deficit hídrico (Tabelas 7 e 8).

Antes de tudo, para maior confiabilidade dos resultados da análise de trilha, efetuou-se o teste da matriz de correlação fenotípica quanto à multicolinearidade pelo número de condições (NC) proposto por Montgomery e Peck (2012). A matriz de correlação apresentou multicolinearidade severa para a análise realizada utilizando-se o conjunto de genótipos avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1, com NC de 1041,69 para o ambiente controle. Já para o ambiente em condição de deficit hídrico a multicolinearidade foi moderada com NC de 491,51.

Para contornar o problema, foram retiradas as características que não apresentaram relação com o deficit hídrico como a cor de vagem (CV) e, as características cuja informações

estavam contidas indiretamente em outras. Após a retirada das características procedeu-se a análise de trilha com correção pelo método de crista e cumeeira, conforme proposto por Carvalho (1996). Assim utilizou-se as características massa de sementes (MS), como principal em seleção, e as características massa de vagens (MV), vagem chocha (VCH), número de vagens (NV), massa de cem grãos (M100G) e número de sementes (NS).

Na tabela 8, estão apresentados os efeitos diretos e indiretos das características em estudo sob a característica massa de sementes avaliadas em condição controle e deficit hídrico para o primeiro grupo de genótipos avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1. Os coeficientes de determinação (R^2) no modelo da análise de trilha foram de 0,5264 e 0,4536 para os ambientes controle e sob deficit hídrico, respectivamente.

As variáveis M100G e NS apresentaram efeito direto maior que o efeito residual. O efeito direto para variável M100G apresenta altas magnitudes no ambiente controle e estresse, sendo 0,9691 e 0,8726, respectivamente. Já para variável NS, apresentou efeito elevado de 0,9171 no ambiente controle e, no deficit hídrico 0,6459, sendo o efeito residual de 0,7392 no ambiente sob condição de deficit hídrico, indicando a existência de outras variáveis, que explicam a variável principal, porém, não foram avaliadas (Tabela 7).

Para as demais variáveis estudadas, os efeitos diretos e indiretos e as correlações foram de baixa magnitude em ambos os ambientes. Dessa forma, recomenda-se o uso de índice de seleção, favorecendo o ganho genético simultâneo para as variáveis em estudo.

O mesmo procedimento foi realizado para o grupo de genótipos avaliados nos ensaios 2016-2 e 2018-2. Após a retirada das características verificou-se a ausência de multicolinearidade significativa, apresentando o valor de $NC < 100$ para ambos os ambientes em estudo. Os coeficientes de determinação (R^2) no modelo da análise de trilha foi de 0,8421 para o ambiente controle e para o deficit hídrico 0,7322 (Tabela 8). Já os efeitos residuais foram de 0,3973 e 0,5175, na devida ordem para os ambientes controle e deficit hídrico.

Pode ser observado que a variável M100G, apresentou efeito direto de alta magnitude 0,5172 no ambiente controle e, no deficit hídrico 0,4517. Além disso, pode ser verificado alta correlação para M100G, NV e MV (Tabela 8).

Tabela 7. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das características consideradas como primárias e secundárias sobre a variável principal massa de semente (MS), dos experimentos desenvolvidos em casa de vegetação, com genótipos de soja, nos ensaios 2016-1 e 2017-1.

Variável	Efeito associado	Controle	Deficit hídrico
MV	Direto sobre MS	0,1309	0,1608
	Indireto via VCH	-0,0401	-0,0683
	Indireto via NV	0,0294	0,0969
	Indireto via M100G	-0,3389	-0,3111
	Indireto via NS	0,3713	0,2813
	Total	0,1672	0,1825
VCH	Direto sobre MS	-0,2120	-0,1384
	Indireto via MV	0,0247	0,0793
	Indireto via NV	0,0473	0,0944
	Indireto via M100G	-0,4194	-0,2568
	Indireto via NS	0,2510	0,16304
	Total	-0,3321	-0,0782
NV	Direto sobre MS	0,0945	0,2729
	Indireto via MV	0,0407	0,0571
	Indireto via VCH	-0,1060	-0,0479
	Indireto via M100G	-0,6314	-0,5108
	Indireto via NS	0,6124	0,4827
	Total	0,0206	0,2928
M100G	Direto sobre MS	0,9691	0,8726
	Indireto via MV	-0,0458	-0,0573
	Indireto via VCH	0,0918	0,0407
	Indireto via NV	-0,0616	-0,1598
	Indireto via NS	-0,8179	-0,5805
	Total	0,2439	0,2396
NS	Direto sobre MS	0,9172	0,6459
	Indireto via MV	0,0529	0,0700
	Indireto via VCH	-0,0580	-0,0349
	Indireto via NV	0,0631	0,2039
	Indireto via M100G	-0,8642	-0,7842
	Total	0,2135	0,1927
	R²	0,5264	0,4536
	Valor de K	0,1117	0,1422
	Efeito Residual	0,6882	0,7392

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); VCH: Vagem chocha; NV: Número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹); NS: Número de sementes.

R²: Coeficiente de determinação.

Tabela 8. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das características consideradas como primárias e secundárias sobre a variável principal massa de semente (MS), dos experimentos desenvolvidos em casa de vegetação, com diferentes genótipos de soja nos ensaios 2016-2 e 2018-2.

Variável	Efeito associado	Controle	Deficit hídrico
MV	Direto sobre MS	0,3082	0,2975
	Indireto via VCH	-0,0400	-0,0178
	Indireto via NV	0,1198	0,2437
	Indireto via M100G	0,0835	0,0523
	Indireto via NS	0,1875	0,0807
	Total	0,659	0,6564
VCH	Direto sobre MS	-0,1716	-0,0662
	Indireto via MV	0,0719	0,0799
	Indireto via NV	-0,0031	0,0364
	Indireto via M100G	-0,1649	-0,0314
	Indireto via NS	0,0651	0,0019
	Total	-0,2026	0,0207
NV	Direto sobre MS	0,1811	0,3483
	Indireto via MV	0,2039	0,2081
	Indireto via VCH	0,0029	-0,0069
	Indireto via M100G	0,1645	0,1098
	Indireto via NS	0,2126	0,0653
	Total	0,7651	0,7246
M100G	Direto sobre MS	0,5172	0,4517
	Indireto via MV	0,0498	0,0344
	Indireto via VCH	0,0547	0,0046
	Indireto via NV	0,0576	0,0847
	Indireto via NS	-0,0702	-0,0391
	Total	0,6091	0,5364
NS	Direto sobre MS	0,3192	0,1210
	Indireto via MV	0,1811	0,1984
	Indireto via VCH	-0,0350	-0,0010
	Indireto via NV	0,1206	0,1879
	Indireto via M100G	-0,1138	-0,1458
	Total	0,4721	0,3605
	R ²	0,8421	0,7322
	Efeito Residual	0,3973	0,5175

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); VCH: Vagem chocha; NV: Número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹); NS: Número de sementes.

R²: Coeficiente de determinação.

Baseando-se nas análises de trilha verificou-se a necessidade da utilização de índice de seleção para a identificação de genótipos tolerantes ao deficit hídrico. Os valores dos índices

confeccionados para cada genótipo e em cada ambiente de disponibilidade hídrica foram utilizados em uma análise de dispersão gráfica. A média dos valores dos índices para cada ambiente foram utilizadas para traçar os quadrantes (Figuras 3 e 4).

Os genótipos estudados estão devidamente identificados nos Apêndices A e B, correspondentes ao grupo dos genótipos apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

A análise gráfica para os genótipos pertencentes ao grupo 1, avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1, favoreceu a seleção dos genótipos tolerantes ao deficit hídrico e que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada, identificados no primeiro quadrante em azul, sendo eles: CD 240 RR (1), M-SOY 6101 (2), CD 216 (3), CD 206 (6), NA 5909 RG (13), FUNDACEP 56 RR (15), RA 518 (16), CD 213 RR (18), CD FAPA 220 (20), BMX TURBO RR (21), FUNDACEP 57 RR (22), BRS 133 (26), TMG 1067 RR (28), EMBRAPA 48 (29), BRS 243 RR (30), CD 208 (31), MG BR 45 (CONQUISTA) (36), OC 14 (40), BRS 232 (44) e P98Y11 (45) (Figura 3).

No segundo quadrante, em verde, encontram-se os genótipos CD 235 RR (11), BRS 246 RR (25) e RA 628 (33) que são tolerantes ao deficit hídrico, mas, não apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada. Esses genótipos possuem adaptabilidade favorável apenas para os ambientes sob deficit hídrico (Figura 3).

Na Figura 4 estão classificados os genótipos correspondentes ao grupo 2 avaliados nos ensaios 2016-2 e 2018-2.

Seguindo o mesmo padrão descrito na Figura 3, os genótipos CD 250 RR (1), M-SOY 7901 (13), CD 254 RR (14), CD 229 RR (17), CD 217 (18), FUNDACEP 58 (22), BRS 284 (23), BRS MT PINTADO (25), TROPICAL RR (28), BRS 213 (32), TMG 115 RR (33), CD 226 RR (34), CD 253 (43), OCEPAR 3 (45) e CD 201 (47) foram classificados em azul, no primeiro quadrante, os genótipos tolerantes ao deficit hídrico e que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada. Já no segundo quadrante estão classificados os genótipos CD 288 (7), CD 246 (9), CD 251 RR (19), CD 5807 (20), CD 2630 RR (27), MG BR 45 (Conquista) (36), BMX TITAN RR (38), P98Y70 (41) e FUNDACEP 96 RR (48), que apresentaram bom desempenho apenas em condições de deficit hídrico (Figura 4).

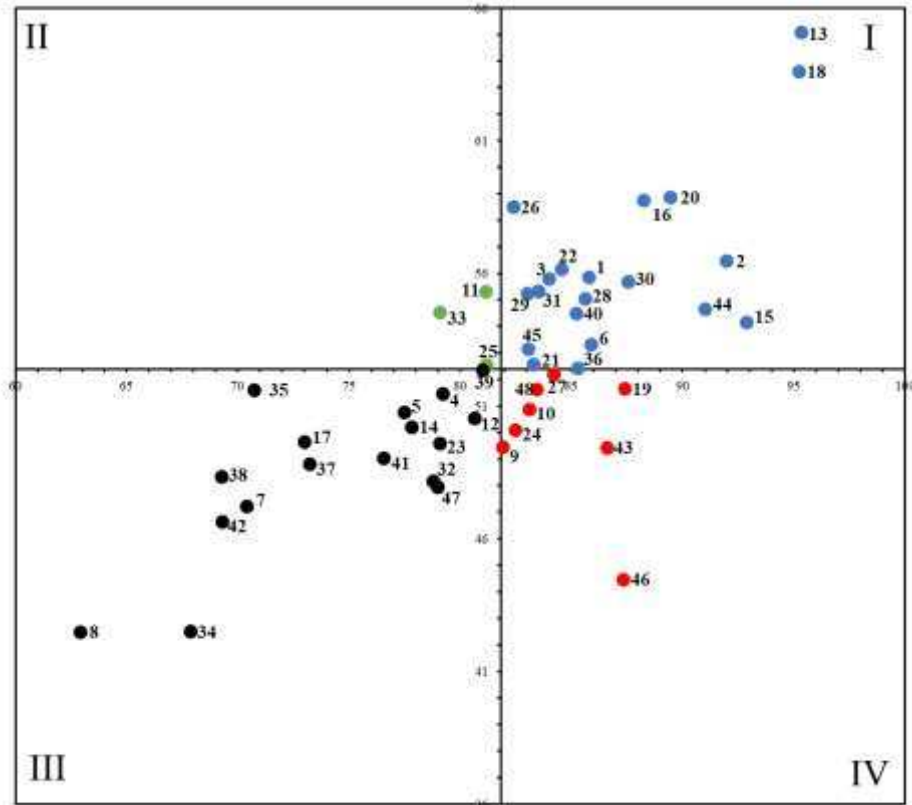


Figura 3. Classificação dos 48 genótipos de soja com as informações do índice de seleção aditivo, utilizando-se os pesos econômicos baseados no efeito direto das características MS, MV, NS e M100G, avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1, para os ambientes controle (eixo x) e sob deficit hídrico (eixo y). I = Genótipos que são tolerantes ao deficit hídrico e que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Azul); II = Genótipos que são tolerantes ao deficit hídrico, mas, não apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Verde); III = Genótipos não tolerantes ao deficit hídrico e que não apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Preto); e, IV = Genótipos não tolerantes ao deficit hídrico mas, que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Vermelho).

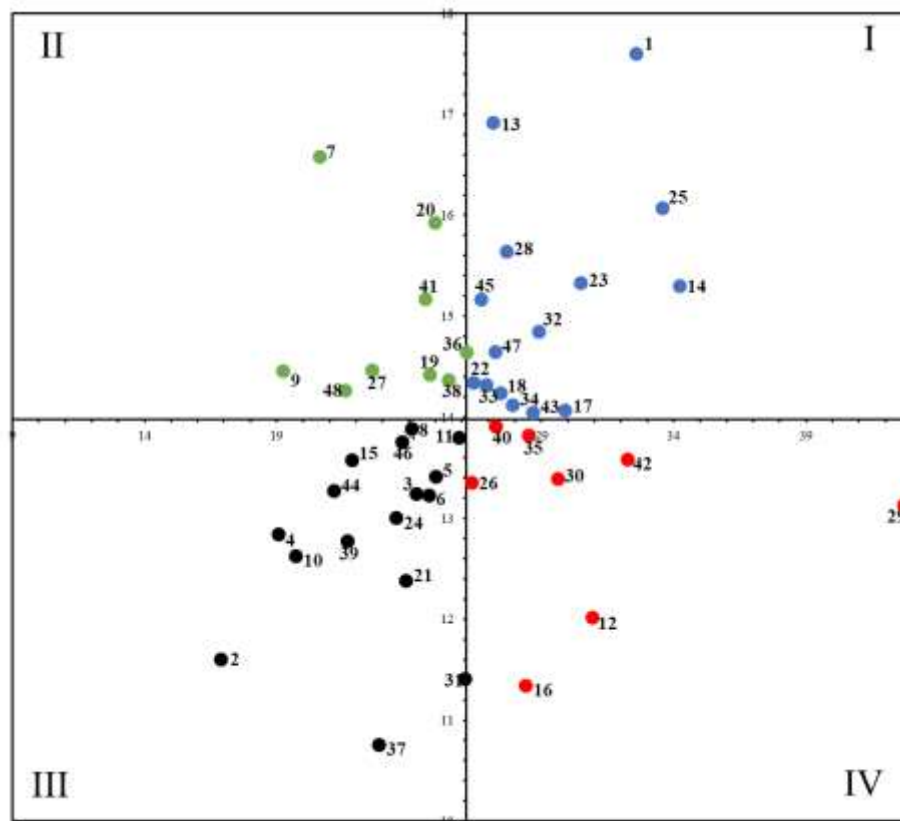


Figura 4. Classificação dos 48 genótipos de soja com as informações do índice de seleção aditivo, utilizando-se os pesos econômicos baseados no efeito direto das características MS, MV, NS e M100G, avaliados nos ensaios 2016-2 e 2018-2, para os ambientes controle (eixo x) e sob deficit hídrico (eixo y). I = Genótipos que são tolerantes ao deficit hídrico e que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Azul); II = Genótipos que são tolerantes ao deficit hídrico, mas, não apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Verde); III = Genótipos não tolerantes ao deficit hídrico e que não apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Preto); e, IV = Genótipos não tolerantes ao deficit hídrico mas, que apresentam incremento na produção sob condições de disponibilidade hídrica adequada (Vermelho).

4. DISCUSSÃO

Estudos relacionados à identificação de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico são importantes para o desenvolvimento de uma produção mais estável e sustentável (PENNISI, 2008). Para tanto, busca-se genótipos que produzam relativamente bem com escassez de água, mas, que tenham a capacidade de incrementar essa produção em disponibilidade hídrica adequada (FLEURY et al., 2010).

As características de interesse agrônomo são quantitativas, ou seja, controladas por vários genes (PATHAN et al., 2013) e, podem responder de diferentes formas devido ao tempo,

intensidade, duração e frequência do deficit hídrico influenciando nas respostas das plantas (FUGANTI-PAGLIARINI et al., 2017; IQBAL e al., 2018).

Neste trabalho, a metodologia de indução de deficit hídrico, desenvolvida por Dantas (2018), possibilitou o controle e a quantificação do déficit hídrico aplicado. Logo, pode ser observado nos Apêndices C, D, E e F, correspondentes aos ensaios de 2016-1, 2016-2, 2017-1 e 2018-2, os diferentes comportamentos das características sob condições de deficit hídrico em relação ao ambiente controle.

Contribuindo com este trabalho, os autores Anjum et al., (2011), Kobraee; Shamsi, (2011a) e Jumrani; Bhatia, (2018), afirmam que os componentes de rendimento massa de sementes, massa de vagem, número de sementes e massa de cem grãos, apresentam decréscimo sob condições de deficit hídrico, quando comparado ao controle durante o enchimento de grãos (R5), e, além do mais, auxiliam no processo de seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico.

Por meio das estimativas de parâmetros genéticos, é possível identificar a natureza da expressão dos genes envolvidos nos caracteres quantitativos (CÂMARA et al., 2007). Entre esses parâmetros, o coeficiente de variação genética e ambiental (CVg/CVe) pode ser empregado como um parâmetro indicativo para uma seleção efetiva. Quando essa razão CVg/CVe for igual ou maior que um (<1), a seleção é favorável, porque, a variação genética é responsável pelas diferenças entre os genótipos (SOUSA et al., 2016).

Nas tabelas 2 e 3, é possível verificar que a razão CVg/CVe , para a maioria das características, foram maiores no ambiente em condições de deficit hídrico. Isso indica, que em condições de estresse, a distinção entre os genótipos é mais visível, facilitando a seleção dos melhores genótipos em condições de deficit hídrico. Resultados semelhantes foram encontrados pelos autores Mahbud et al. (2015), Chandrawat et al. (2017) e Kuswanto (2019), em trabalhos desenvolvidos com soja.

Devido a isso, várias respostas são esperadas de diferentes genótipos quando submetidas às condições específicas devido à interação genótipos por ambientes (GXA) (MAIA et al., 2011; GRANATO et al., 2016). Resultado este que pode ser observado, na decomposição da interação, na tabela 5, em que a parte complexa é responsável pelo comportamento para maioria das características em estudo. De acordo com Cruz et al. (2012), a existência de maior contribuição da parte complexa da interação, a correlação entre as medidas do mesmo genótipo em diferentes ambientes é baixa, indicando inconsistência da superioridade do genótipo sob variações ambientais, o que impede a recomendação de cultivares com ampla adaptabilidade.

Em consequência da interação genótipos por ambientes (GXA), a associação entre o fenótipo e o genótipo é reduzida (LOPES et al., 2012).

Outro fator a ser levado em consideração é a interação genótipos por ensaios, conforme os resultados apresentados nas tabelas 5 e 6, que demonstram a necessidade de avaliar os grupos de genótipos no mínimo dois anos, para maior confiabilidade no processo de seleção. Segundo Ghanem et al. (2015), a fenotipagem visando o melhoramento para produtividade é influenciada por muitos fatores podendo sofrer variações ao longo do tempo e local, sendo necessário foco para estudo em características específicas. Nos trabalhos desenvolvidos visando a tolerância ao deficit hídrico na cultura da soja, para obtenção de êxito na coleta de dados, os autores He et al. (2016) e Giordani et al. (2019) repetiram o experimento nas condições de controle e deficit hídrico por dois anos. Bathia e Jumrani (2016) repetiram os experimentos em condição de controle e deficit hídrico por três anos, obtendo confiabilidade nos resultados obtidos, para seleção de genótipos de soja em condição de deficit hídrico.

Além disso, nota-se que os efeitos diretos e indiretos e as correlações das características, podem apresentar maior ou menor magnitude em relação ao ambiente, conforme os resultados apresentados neste trabalho, nas estimativas da análise de trilha nas tabelas 7 e 8. De acordo com Cruz et al. (2012), Pour-Siahbidi et al. (2013), em determinada condição experimental, a decomposição dos efeitos diretos e indiretos, torna-se dependente do conjunto de caracteres analisado.

Corroborando com os resultados, os autores Kobraee; Shamsi, (2011b), Pour-Siahbidi et al. (2013) e Mahbub et al. (2015), ao realizar análise de trilha sob condições de controle e deficit hídrico com a cultura da soja, observaram que as características massa de sementes, massa de vagem, número de sementes e massa de cem grãos, apresentam diferença nos efeitos diretos e indiretos em relação ao ambiente em condições de deficit hídrico e, além disso, essas características devem ser enfatizadas no programa de melhoramento, a fim de aumentar o rendimento de sementes.

Visando a seleção de genótipos tolerante ao deficit hídrico, a metodologia de estimativa de pesos econômicos, proposta por Viana e Resende (2014), em cada uma das disponibilidades hídricas dentro dos pares de ensaios que possuíam genótipos em comum, baseado nos efeitos diretos e indiretos da análise de trilha e, aplicadas ao índice aditivo, permitiu identificar genótipos (Figuras 3 e 4) que apresentaram baixa redução no rendimento de grãos sob condição de deficit hídrico.

Para o melhoramento de características com correlações favoráveis, mas, com baixo efeito direto, pode ser utilizado o índice de seleção, selecionando caracteres cujos efeitos

indiretos sejam negativos (CRUZ et al., 2012). Segundo Rangel et al., (2011) índices de seleção permitem ganhos simultâneos mesmo para características com efeitos opostos. Conseqüentemente, auxiliando no desenvolvimento de genótipos que produzam bem em condições limitantes de água (SINGH et al., 2010).

Neste trabalho, no grupo 1 dos genótipos avaliados nos ensaios 2016-1 e 2017-1, o genótipo EMBRAPA 48 foi selecionado como tolerante em condição de deficit hídrico. O mesmo genótipo foi estudado por Oya et al. (2004) e Giordani et al. (2019), apresentando uma tolerância moderada, devido baixa redução nos componentes de rendimento e maior estabilidade em condições de deficit hídrico no estágio reprodutivo, quando comparado a outros genótipos considerado suscetíveis. E, segundo Teixeira et al. (2008), por meio de avaliações fisiológicas, considerou o genótipo EMPRAPA 48 tolerante em condições de deficit hídrico. He et al. (2019), identificaram três genótipos de soja que apresentaram maior rendimento de em número de sementes, massa de cem grãos e número de vagem sob condições de deficit hídrico em campo, apresentando maior eficiência ao uso da água. Bathia e Jumrani (2016), por meio do índice de resistência à seca, com base nos componentes de rendimento sob condições normais de irrigação e deficit hídrico, classificaram genótipos de soja um genótipo de soja com resistente e de alto rendimento e, mais três genótipos como tolerante e de alto rendimento.

Diante dos resultados apresentados, os genótipos selecionados possuem genes associados à tolerância ao deficit hídrico e podem ser utilizados como fonte de germoplasma em programas de melhoramento para obtenção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico, conforme também relatado por Ribeiro et al. (2019) e Narayanan e Fallen (2019) que trabalharam com feijão comum e soja, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

O estudo dos caracteres sob condição de controle e deficit hídrico, permitiu identificar os componentes de rendimento massa de semente, número de semente, massa de vagem e massa de cem grãos como relevantes para seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico.

Com uso das características identificadas e empregadas ao índice de seleção, baseado no peso econômico das características, foram identificados 20 genótipos tolerantes apresentando um bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, além disso, 3 genótipos com bom desempenho somente no ambiente sob condição de deficit hídrico, nos ensaios 2016-1 e 2017-1.

Nos ensaios 2016-2 e 2018-2 foram selecionados 15 genótipos tolerantes apresentando um bom desempenho em condições de controle e deficit hídrico e, 9 genótipos com bom desempenho somente no ambiente sob condição de deficit hídrico.

Os genótipos selecionados podem ser utilizados no programa de melhoramento genético da soja, como fonte de germoplasma auxiliando no desenvolvimento de cultivares tolerantes ao deficit hídrico para região de Minas Gerais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKRAM, R.M.; FARES, W.M.; FATEH, H.S.A.; RIZK, A.M.A. Genetic variability, correlation and path analysis in soybean. **Egyptian Journal of Plant Breeding**, v. 15, n. 1, p. 89-102, 2011.

ANJUM, S. A. et al. Methyl jasmonate-induced alteration in lipid peroxidation, antioxidative defence system and yield in soybean under drought. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 296-301, 2011.

BASSO, S.M.S. **Caracterização morfológica e fixação biológica de nitrogênio de espécies de Adesmia DC. E Lotus L.** Tese de Doutorado (Doutorado em Zootecnia) – Departamento de Zootecnia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BHATIA, V.; JUMRANI, K. A maximin–minimax approach for classifying soybean genotypes for drought tolerance based on yield potential and loss. **Plant breeding**, v. 135, n. 6, p. 691-700, 2016.

CÂMARA, G.M.S. **Adubação**. In: Soja do plantio à colheita. Editores. SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Ed. UFV, 2015. 333 p.

CÂMARA, T.M.M.; BENTO, D.A.V.; ALVES, G.F.; SANTOS, M.F.; MOREIRA, J.U.V.; DE SOUZA, C.L. Parâmetros genéticos de caracteres relacionados à tolerância à deficiência hídrica em milho tropical. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 595-603, 2007.

CARVALHO, S.P.; CRUZ, C.D. Diagnosis of multicollinearity: assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Brazilian Journal of Genetics**, v. 19, n. 3, p. 479-484, 1996.

CHANDRAWAT, K.S.; BAIG, K.S.; HASHMI, S.; SARANG, D.H.; KUMAR, A.; DUMAI, P.K. Study on genetic variability, heritability and genetic advance in soybean. **Indian Journal of Pure & Applied Biosciences**, v. 5, n. 1, p. 57-63, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) (2019), Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>. Acesso em 18 de Nov. 2019.

CRUZ, C. D. Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4º ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 514 p.

CRUZ, C.D.; CASTOLDI, F.L. Decomposição da interação genótipos x ambientes em partes simples e complexa. **Revista Ceres**, v. 38, n. 219, 1991.

DANTAS, S.A.G. **Estratégia de indução de déficit hídrico em soja e desenvolvimento de GWAS para germinação e vigor de sementes**. Tese de Doutorado (Doutorado em Fitotecnia) – Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. Stages of soybean development. **Special Report, Agriculture and Home Economics Experiment Station**, v. 80, p. 11, 1977.

FLEURY, D.; JEFFERIES, S.; KUCHEL, H.; LANGRIDGE, P. Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. **Journal of experimental botany**, v. 61, n. 12, p. 3211-3222, 2010.

FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L.C.; RODRIGUES, F.A.; MOLINARI, H. B.; MARIN, S.R.; MOLINARI, M.D.; et al. Characterization of soybean genetically modified for drought tolerance in field conditions. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 448, 2017.

GHANEM, M.E.; MARROU, H.; SINCLAIR, T.R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 3, p. 139-144, 2015.

GIORDANI, W.; GONCALVES, L.S.A.; et al. Identification of agronomical and morphological traits contributing to drought stress tolerance in soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 1, p. 35, 2019.

GRANATO, I.S.C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; DE RESENDE, M.D.V.; SILVA, F.F. Effects of using phenotypic means and genotypic values in GGE biplot analyses on genotype by environment studies on tropical maize (*Zea mays*). **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 4 p., 2016.

HE, J.; DU, Y. L.; et al. Conserved water use improves the yield performance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 236-245, 2016.

HAGHI, Y.; et al. Correlation and path analysis for yield, oil and protein content of Soybean (*Glycine max* L.) genotypes under different levels of nitrogen starter and plant density. **Biharean Biologist**, v. 6, n. 1, p. 32-37, 2012.

HIRAKURI, M.H.; LAZZAROTTO, J.J. Soybean agribusiness in the world and Brazilian contexts. **Embrapa Soja**, Londrina, PR, 2014. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104753/1/O-agronegocio-da-soja-nos-contextos-mundial-e-brasileiro.pdf>. Acesso em 20 Nov. 2019.

IQBAL, N.; et al. Imbalance water deficit improves the seed yield and quality of soybean. **Agronomy**, v. 8, n. 9, p. 168, 2018.

JUMRANI, K.; BHATIA, V.S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular biology of Plants**, v. 24, n. 1, p. 37-50, 2018.

KOBRAEE, S.; SHAMSI, K. Effect of irrigation regimes on quantitative traits of soybean (*Glycine max* L.). **Asian Journal of Experimental Biological Sciences**, v. 2, n. 3, p. 441-448, 2011a.

KOBRAEE, S.; SHAMSI, K. Evaluation of soybean yield under drought stress by path analysis. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 10, p. 890-895, 2011b.

KU, Y.S.; YEUNG, W.K.A.; YUNG, Y.L.; LI, M.W.; WEN, C.Q.; LIU, X.; LAM, H.M. **Drought stress and tolerance in soybean.** In: A comprehensive survey of international soybean research - genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships. Editor James E. Board, InTech, 2013. 209–238 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/52945>. Acesso em 09 de Nov. 2019.

KUSWANTORO, H. Performance, similarity and genetic parameters of agronomical characters of soybean [*Glycine max* (L) Merrill.] germplasms. **Agriculture and Natural Resources**, v. 53, n. 3, p. 228–236-228–236, 2019.

LEITE, W.D.S.; UNÊDA-TREVISOLI, S.H.; SILVA, F.M.D.; SILVA, A.J.D.; MAURO, A.O.D. Identification of superior genotypes and soybean traits by multivariate analysis and selection index. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 491-500, 2018.

LEMOS, R.C.; SANTOS R.D. **Manual de descrição e coleta desolo no campo.** 2º ed., Campinas: Ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984. 46 p.

LOPES, M.S.; REYNOLDS, M.P.; MANES, Y.; SINGH, R.P.; CROSSA, J.; BRAUN, H.J. Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “historic” set representing 30 years of breeding. **Crop Science**, v.52, p.1123-1131, 2012.

MAHBUB, M.M.; RAHMAN, M.M.; HOSSAIN, M. S.; MAHMUD, F.; KABIR, M.M. Genetic variability, correlation and path analysis for yield and yield components in soybean. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v. 15, n. 2, p. 231-236, 2015.

MAIA, C.; DOVALE, J.C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; CAVATTE, P.C.; MIRANDA, G. V. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 11, n. 3, p. 270-275, 2011.

MONTGOMERY, D.C.; PECK E.A.; VINING, G.G. **Introduction to linear regression analysis.** 5º ed., New York: Ed. Wiley-Blackwell, 2012. 672p.

NARAYANAN, S.; FALLEN, B. Evaluation of soybean plant introductions for traits that can improve emergence under varied soil moisture levels. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 118, 2019.

NETO, R.F.; DA SILVA JÚNIOR, G.B.; DA ROCHA, L.F.; LUCENA, Í.H. Características biométricas de mudas de castanha-do-gurguéia em função de calagem e NPK1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 940-949, 2011.

OECD/FAO. Oilseeds and Oilseed Products", in OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026. **Organization for economic co-operation and development (OECD) Publishing**, Paris, 2017. DOI: https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-8-en. Acesso em 28 Nov. 2019.

OYA, T., NEPOMUCENO, A. L., NEUMAIER, N., FARIAS, J. R. B., TOBITA, S., ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars. **Plant Production Science**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PÁDUA, G.P. et al. Agroclimatic zoning of the state of Minas Gerais for the production of high quality soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 4, p. 413-418, 2014.

PATHAN, S.M.; VUONG, T.; CLARK, K.; LEE, J.D.; SHANNON, J.G.; ROBERTS, C.A.; ELLERSIECK, M.R.; BURTON, J.W.; CREGAN, P.B.; HYTEN, D.L.; NGUYEN, H.T.; SLEPER, D.A. Genetic mapping and confirmation of quantitative trait loci for seed protein and oil contents and seed weight in soybean. **Crop Science**, v. 53, n. 3, p. 765-774, 2013.

PEIRONE, L.S.; PEREYRA IRUJO, G.; BOLTON, A.; ERREGUERENA, I.; AGUIRREZABAL, L.A. Assessing the efficiency of phenotyping early traits in a greenhouse automated platform for predicting drought tolerance of soybean in the field. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 587, 2018.

PENNISI, E. The blue revolution, drop by drop, gene by gene. **Science**, v. 320, n. 5873, p. 171-173, 2008.

POUR-SIAHBIDI, M.M. et al. Character association and path analysis of soybean (*Glycine max* L.) genotypes under water deficit stress. **International Journal of Biosciences**, v. 3, n. 10, p. 126-132, 2013.

RANGEL, R.M.; AMARAL JÚNIOR, A.T.; GONÇALVES, L.S.A.; FREITAS JÚNIOR, S. de P.; CANDIDO, L.S. Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.473-481, 2011.

RIBEIRO, T. et al. Evaluation of common bean genotypes for drought tolerance. **Bragantia**, v. 78, n. 1, p.1-11, 2019.

SANTOS C. A. F.; REIS M. S.; CRUZ C. D.; SEDIYAMA C. S; SEDIYAMA T. Adequação de modelos no estudo de coeficiente de trilha nos componentes primários e secundário de progênies F6 de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Ceres**, v. 42, p. 111-121, 1995.

SOUSA, L.W. et al. Estimativas de parâmetros genéticos, correlações e índices de seleção para seis caracteres agronômicos em linhagens F8 de soja. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 302-310, 2016.

SINGH, R.; KUNDU, D.K.; BANDYOPADHYAY, K.K. Enhancing agricultural productivity through enhanced water use efficiency. **Journal of Agricultural Physics**, v. 10, n. 2, p. 1-15, 2010.

TEXEIRA, L.R. et al. Avaliação de cultivares de soja quanto à tolerância ao estresse hídrico em substrato contendo polietileno glicol. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 217-223, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VIANA, A.P.; RESENDE, M.D.V. de. **Genética Quantitativa no Melhoramento de Fruteiras**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014. 296 p.

WU, N.; GUAN, Y.; SHI, Y. Effect of water stress on physiological traits and yield in rice backcross lines after anthesis. **Energy Procedia**, v. 5, p. 255-260, 2011.

7. APÊNDICE

APÊNDICE A - Identificação dos genótipos do Banco de Germoplasma (BAG) mantido pelo Programa de Melhoramento Genético de Soja da Universidade Federal de Viçosa – UFV e seus respectivos grupos de maturidade relativa (GMR), correspondentes aos ensaios 2016-1 e 2017-1.

Identificação	Nome dos genótipos	GMR	Identificação	Nome dos genótipos	GMR
1	CD 240 RR	6.9	25	BRS 246 RR	7.2
2	M-SOY 6101	6.1	26	BRS 133	7.3
3	CD 216	5.5	27	CD 248 RR	6.4
4	CD 234 RR	8.0	28	TMG 1067 RR	6.7
5	CD 2800	8.0	29	EMBRAPA 48	6.8
6	CD 206	6.8	30	BRS 243 RR	7.0
7	CD 2840	8.4	31	CD 208	8.3
8	5D711 RR	7.3	32	BRS 185	6.8
9	CD 236 RR	6.4	33	RA 628	5.8
10	5D690 RR	6.9	34	CD 224	6.2
11	CD 235 RR	6.2	35	BRS 282	6.9
12	MA 4990 RG	SI	36	MG BR 45 (CONQUISTA)	8.1
13	NA 5909 RG	6.7	37	FT GUAÍRA	SI
14	CD 244 RR	8.0	38	BMX POTÊNCIA RR	6.6
15	FUNDACEP 56 RR	6.5	39	NK 7059 RR	5.9
16	RA 518	6.4	40	OC 14	6.0
17	CD 232	6.9	41	R7	SI
18	CD 213 RR	6.1	42	CD 233 RR	6.4
19	DMARIO 70i	6.2	43	CD 243 RR	8.0
20	CD FAPA 220	SI	44	BRS 232	6.9
21	BMX TURBO RR	5.8	45	P98Y11	8.1
22	FUNDACEP 57 RR	6.7	46	5D660 RR	SI
23	BRS 245 RR	7.3	47	BRS 268	6.9
24	CD 2737 RR	7.3	48	M 7211 RR	7.2

SI: Sem informação

APÊNDICE B – Identificação dos genótipos do Banco de Germoplasma (BAG) mantido pelo Programa de Melhoramento Genético de Soja da Universidade Federal de Viçosa – UFV e seus respectivos grupos de maturidade relativa (GMR), correspondentes aos ensaios 2016-2 e 2018-2.

Identificação	Nome dos genótipos	GMR	Identificação	Nome dos genótipos	GMR
1	CD 250 RR	5.5	25	BRS MT PINTADO	8.4
2	MG BR 48 GARIMPO	SI	26	BRS 184	6.7
3	CD 225 RR	5.8	27	CD 2630 RR	6.3
4	CD 237 RR	8.1	28	TROPICAL RR	6.7
5	CD 2792 RR	7.9	29	EMBRAPA 59	SI
6	CD 205	8.0	30	BRS 283	6.5
7	CD 288	SI	31	CD 215	6.0
8	BMX POTÊNCIA RR	6.6	32	BRS 213	SI
9	CD 246	8.1	33	TMG 115 RR	8.6
10	BMX ENERGIA RR	5.0	34	CD 226 RR	6.7
11	CD 242 RR	7.9	35	CD 202	6.5
12	M 6707 RR	SI	36	MG BR 45 (CONQUISTA)	8.1
13	M-SOY 7901	7.9	37	EMGOPA 304	SI
14	CD 254 RR	SI	38	BMX TITAN RR	5.3
15	FUNDACEP 33	SI	39	M-SOY 8001	7.9
16	TMG 1066 RR	6.6	40	NK 8350	SI
17	CD 229 RR	7.3	41	P98Y70	8.7
18	CD 217	SI	42	CD 235 RR	6.4
19	CD 251 RR	8.8	43	CD 253	SI
20	CD 5807	SI	44	BRS 257	6.7
21	BRAGG	SI	45	OCEPAR 3	SI
22	FUNDACEP 58	SI	46	5G770 RR	7.7
23	BRS 284	6.6	47	CD 201	6.7
24	CD 2721 RR	SI	48	FUNDACEP 96 RR	SI

SI: Sem informação

APÊNDICE C - Análise de variância individual do ensaio 2016-1.

Quadrado Médio (QM)									
FV	GL	MS	MV	MH	MR	VR	DH	CV	VCH
Bloco	2								
Genótipos	47	1,83**	12,50**	17,47**	5,10**	5,45**	6,47**	26,38**	3,62**
Ambientes	1	1504,53**	828,31**	5,21*	0,84 ^{ns}	3,03 ^{ns}	0,45 ^{ns}	2,88 ^{ns}	24,03**
GXA	47	0,78 ^{ns}	0,68 ^{ns}	3,24**	1,20 ^{ns}	1,17 ^{ns}	1,11 ^{ns}	2,36**	2,23**
Resíduo	190	9,59	1,19	1,98	2,16	40,38	0,43	0,34	1,95
Média		37,16	15,16	16,87	5,33	21,52	7,21	2,75	1,19
CV (%)		8,33	7,19	8,33	27,56	29,51	9,1	21,2	117,23
		V1G	V2G	V3G	V4G	NS	NV	NS/NV	M100G
Bloco	2								
Genótipos	47	2,31**	14,30**	14,16**	13,40**	8,30**	7,86**	4,54**	8,29**
Ambientes	1	1,30 ^{ns}	17,21**	15,55**	1,54 ^{ns}	294,29**	183,85*	10,47**	109,87**
GXA	47	1,88**	1,19 ^{ns}	1,81**	4,17**	1,04 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,32 ^{ns}	1,71**
Resíduo	190	29,69	191,39	117,56	2,05	434,86	122,58	0,05	2,22
Média		5,85	59,61	33,38	0,59	218,46	99,44	2,21	17,13
CV (%)		93,07	23,2	32,47	241,89	9,54	11,13	10,25	8,69

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

APÊNDICE E - Análise de variância individual do ensaio 2016-2.

Quadrado Médio (QM)									
FV	GL	MS	MV	MH	MR	VR	DH	CV	VCH
Bloco	2								
Genótipos	47	4,56**	4,24**	12,61**	5,83**	4,11**	2,23**	5,53**	1,51**
Ambientes	1	93,36**	137,65**	10,20**	23,72**	6,00*	16,96**	0,95 ^{ns}	7,71*
GXA	47	1,13 ^{ns}	1,03 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,05 ^{ns}	1,71**	0,82 ^{ns}
Resíduo	190	4,98	1,02	1,19	0,28	5,78	0,68	0,93	25,5
Média		4,54	2,79	3,019	1,19	4,4	4,54	4,13	4,63
CV (%)		49,13	36,21	36,14	44,16	54,61	18,26	23,36	109,02
		V1G	V2G	V3G	V4G	NS	NV	NS/NV	M100G
Bloco	2								
Genótipos	47	2,41**	3,36**	4,46**	1,38 ^{ns}	1,21 ^{ns}	3,16**	0,80 ^{ns}	1,61*
Ambientes	1	13,07**	93,32**	39,19**	0,02 ^{ns}	22,08**	111,13**	1,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}
GXA	47	0,58 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,97 ^{ns}	1,42 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,98 ^{ns}	1,23 ^{ns}	1,33 ^{ns}
Resíduo	190	17,67	27,58	14,81	0,12	2597,11	73,04	1,51	44,93
Média		4,23	11,08	6,72	0,07	45,65	22,12	1,94	9,85
CV (%)		99,25	47,37	57,23	479,09	111,62	38,63	63,17	68,04

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

APÊNDICE D - Análise de variância individual do ensaio 2017-1.

Quadrado Médio (QM)									
FV	GL	MS	MV	MH	MR	VR	DH	CV	VCH
Bloco	2								
Genótipos	47	1,95**	2,66**	15,86**	6,20**	3,15**	1,20 ^{ns}	25,53**	2,32**
Ambientes	1	226,35**	517,39**	0,09 ^{ns}	3,99 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,10 ^{ns}	64,22**
GXA	47	1,44*	1,09 ^{ns}	1,61*	4,36**	1,02 ^{ns}	1,05 ^{ns}	4,51**	1,41 ^{ns}
Resíduo	190	9,95	2,58	3,41	4,53	64,24	22,38	0,27	29,83
Média		25,71	13,61	16,38	6,5	24,74	8,87	3,53	7,69
CV (%)		12,27	11,80	11,27	32,73	32,39	53,32	14,85	70,95
		V1G	V2G	V3G	V4G	NS	NV	NS/NV	M100G
Bloco	2								
Genótipos	47	7,47**	14,68**	14,03**	3,21**	7,70**	7,41**	2,76**	7,61**
Ambientes	1	16,35**	60,92**	41,31**	2,20 ^{ns}	293,29**	293,68**	2,76 ^{ns}	3,71 ^{ns}
GXA	47	1,20 ^{ns}	1,07 ^{ns}	1,24 ^{ns}	0,75 ^{ns}	1,39 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,99 ^{ns}	1,46*
Resíduo	190	50,65	141,15	129,95	15,11	632,21	149,84	0,20	3,23
Média		11,25	48,69	37,34	0,91	206,48	98,20	2,13	12,82
CV (%)		63,24	24,40	30,52	425,78	12,17	12,46	21,33	14,02

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

APÊNDICE F - Análise de variância individual do ensaio 2018-2.

FV	GL	Quadrado Médio (QM)							
		MS	MV	MH	MR	VR	DH	CV	VCH
Bloco	2								
Genótipos	47	1,44 ^{ns}	5,19**	9,39**	4,44**	4,45**	2,57 **	10,20**	1,17 ^{ns}
Ambientes	1	116,73 **	102,94**	1,74 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,48 ^{ns}	46,76**
GXA	47	1,413 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,18 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,79 ^{ns}	2,25**
Resíduo	190	12,59	4,04	19,93	56,90	342,80	0,001	0,83	22,26
Média		23,28	12,34	17,51	13,57	43,72	0,36	4,07	5,15
CV (%)		15,23	16,29	25,48	55,57	42,34	10,42	22,47	91,46
		V1G	V2G	V3G	V4G	NS	NV	NS/NV	M100G
Bloco	2								
Genótipos	47	4,95**	22,68**	9,98**	6,84**	4,41**	7,87**	5,26**	4,48**
Ambientes	1	9,28**	22,01**	26,69**	0,02 ^{ns}	100,46**	80,84**	8,42**	0,04 ^{ns}
GXA	47	1,12 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,41 ^{ns}	1,02 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,98 ^{ns}
Resíduo	190	21,22	87,19	115,04	1,97	870,83	159,33	0,05	9,19
Média		7,21	33,84	43,14	0,79	177,35	85,00	2,10	13,72
CV (%)		63,82	27,59	24,86	176,01	16,63	14,84	10,86	22,08

MS: Massa de sementes (g Kg⁻¹); MV: Massa de vagem (g Kg⁻¹); MH: Massa de haste (g Kg⁻¹); MR: Massa de raiz (g Kg⁻¹); VR: Volume de raiz (g cm³); DH: Diâmetro da haste; CV: Cor de vagem; VCH: Vagem chocha; V1G: Vagem com um grão; V2G: Vagem com dois grãos; V3G: Vagem com três grãos; V4G: Vagem com quatro grãos; NS: Número de sementes; NV: Número de vagem; NS/NV: Razão entre o número de sementes e número de vagem; M100G: Massa de cem grãos (g Kg⁻¹).

RESUMO

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. Capítulo II. **Seleção de genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico com base no índice FAI-BLUP.** Orientador: Felipe Lopes da Silva. Coorientadores: Pedro Crescêncio Souza Carneiro e Luiz Antônio dos Santos Dias.

Este estudo teve como objetivo a selecionar genótipos de soja que apresentam adaptabilidade, estabilidade e produtividade sob condições de deficit hídrico por meio do índice FAI-BLUP. Noventa e três cultivares de soja foram avaliados na condição controle (-10 kPa e -33 kPa), e sob deficit hídrico (-900 kPa), utilizando-se metodologia baseada na determinação da capacidade de vaso, pelo método da curva de retenção de água no solo, em casa de vegetação. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com três repetições e as cultivares foram divididas em dois grupos para avaliação. O primeiro grupo, composto de 48 cultivares, foi avaliado nos anos de 2016 e 2017, ensaios denominados de 2016-1 e 2017-1, e o segundo grupo, com 48 cultivares, avaliado nos anos de 2016 e 2018, ensaios 2016-2 e 2018-2. Três cultivares foram coincidentes aos dois grupos de cultivares. A parcela experimental foi composta por uma planta por vaso, com dois tratamentos (controle e deficit hídrico). A indução do deficit hídrico ocorreu no estágio reprodutivo (R5) durante quinze dias. Após esse período, as plantas voltaram a ser irrigadas normalmente. No final do ciclo as características massa de vagem (MV), número de vagem (NV), número de sementes (NS) e massa de cem grãos (M100G) foram avaliadas. A seleção simultânea por produtividade média, estabilidade e adaptabilidade foi realizada pelo método da média harmônica do desempenho relativo dos valores genéticos preditos (MHPRVG*MG) e, em seguida, os valores foram aplicados no índice FAI-BLUP. Na predição de ganho genético foi observado ganho positivo para todas as características em estudo, exceto para M100G. Além disso, ganho desejável de 15,58% e indesejável de -53,58% para o grupo 1. Já para o grupo 2, observou-se ganho negativo somente para característica NS. O ganho desejável foi de 53,31% e indesejável de -8,79 %. O índice FAI-BLUP permitiu selecionar dez genótipos de cada grupo de cultivares, que apresentaram maior adaptabilidade, estabilidade e produtividade em condições de deficit hídrico. Os genótipos selecionados, podem ser utilizados em programas de melhoramento genético de soja visando a tolerância ao deficit hídrico como fonte de germoplasma.

Palavras-chave: Adaptabilidade. Estabilidade. Estresse abiótico. Melhoramento. MHPRVG*MG. Produtividade.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Heloisa Rocha do, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February de 2020. Chapter II. **Selection of water deficit tolerant soybean genotypes based on the FAI-BLUP index.** Adviser: Felipe Lopes da Silva. Co-advisers: Pedro Crescêncio Souza Carneiro and Luiz Antônio dos Santos Dias.

This study aimed to select soybean genotypes that show adaptability, stability and productivity under water deficit conditions through the FAI-BLUP index. Ninety-three soybean cultivars were evaluated in the control condition, field capacity, and under water deficit, using a methodology based on the determination of the pot capacity, using the soil water retention curve method, in a greenhouse. The experiment was conducted in a randomized block design, with three replications and the cultivars were divided into two groups for evaluation. The first group, composed of 48 cultivars, was evaluated in the years 2016 and 2017, trials named 2016-1 and 2017-1, and the second group, with 48 cultivars, evaluated in the years 2016 and 2018, trials 2016-2 and 2018-2. Three cultivars coincided in both cultivar groups. The experimental parcel consisted of one plant per pot, with two treatments (control and water deficit). The induction of water deficit occurred in the reproductive stage (R5) for fifteen days. After this period, the plants were irrigated normally again. At the end of the cycle, the characteristics of pod mass (MV), pod number (NV), number of seeds (NS) and mass of one hundred grains (M100G) were evaluated. The simultaneous selection for average productivity, stability and adaptability was carried out using the harmonic mean method of the relative performance of the predicted genetic values ($MHPRVG * MG$) and then the values were applied to the FAI-BLUP index. In the prediction of genetic gain, a positive gain was observed for all traits under study, except for M100G. In addition, a desirable gain of 15.58% and an undesirable gain of -53.58% for group 1. As for group 2, a negative gain was observed only for NS characteristic. The desirable gain was 53.31% and the undesirable gain was -8.79%. The FAI-BLUP index made it possible to select ten genotypes from each group of cultivars, which showed greater adaptability, stability and productivity in conditions of water deficit. The selected genotypes can be used in soybean breeding programs aiming tolerance to water deficit as a source of germplasm.

Keywords: Adaptability. Stability. Abiotic stress. Breeding. $MHPRVG * MG$. Productivity.

1. INTRODUÇÃO

Os estresses abióticos afetam diretamente o desenvolvimento, crescimento e produtividade das plantas, causando prejuízos na agricultura por limitar o rendimento e causar perdas econômicas (LAUER et al., 2012; BARKLA et al., 2013). Entre os estresses abióticos, o déficit hídrico é considerado o fator mais limitante ao desempenho das culturas e tornando-se uma ameaça para produção (BHATIA et al., 2016).

A cultura da soja (*Glycine max*) apresenta sensibilidade ao déficit hídrico, sendo afetada drasticamente durante o período reprodutivo, reduzindo a quantidade e a qualidade das sementes, conseqüentemente afetando a produtividade (MALEKI et al., 2013). Uma estratégia para contornar esse problema, é a seleção de genótipos de soja tolerantes ao déficit hídrico (GHOLINEZHAD et al., 2014). Vale ressaltar que a tolerância ao déficit hídrico, não está associada somente à capacidade das plantas sobreviverem a essas condições, mas também, de apresentarem rendimento de produção satisfatório onde a disponibilidade de água está abaixo da ideal para a cultura (FLEURY et al., 2010).

A ênfase à tolerância ao estresse hídrico é atribuída cada vez mais às características que melhoram a estabilidade de produção, ao invés de características que aumentam a sobrevivência das plantas às condições extremas (BLUM, 2009; PASSIOURA, 2010; SINCLAIR, 2011). Neste sentido a seleção de genótipos geneticamente superiores com base em várias características de importância simultaneamente promoverá ganhos genéticos satisfatórios. Rodrigues et al. (2013) relatou que a seleção direta de uma característica isoladamente pode causar desvantagem em outras características de interesse. Esse fato é observado em características que possuem magnitudes elevadas de correlações com a característica alvo do programa de melhoramento.

Além da seleção simultânea de características em programas para estresse abiótico, métodos de seleção que incorporam a estabilidade e a adaptabilidade em uma única análise, podem ser considerados superiores, em comparação àqueles que usam apenas a produção como critério de seleção (RESENDE, 2007).

Esse tipo de seleção simultânea pela produtividade, adaptabilidade e estabilidade, pode ser realizada pelo método da média harmônica da performance dos valores genéticos (MHPRVG) preditos. Ao utilizar a MHPRVG obtêm-se os valores genotípicos preditos expressos como proporção média geral de cada local (SILVA et al., 2011; ROSADO et al., 2012).

Características de importância em um programa de melhoramento para a seleção de genótipos tolerantes ao estresse abiótico, como as relacionadas à produtividade, ao crescimento de plantas e à adaptação, são complexas e controladas por muitos genes, geralmente de pequeno efeito e com alta interação com ambiente (LI et al., 2001). Conseqüentemente, apresentam baixos ganhos genéticos no melhoramento de plantas (CABRERA-BOSQUET et al., 2012). Assim sendo, o uso de índices de seleção, favorece a maior eficiência na seleção de genótipos (CRUZ et al., 2012).

Dentre os índices de seleção descritos na literatura, o índice FAI-BLUP, proposto por Rocha et al., (2018), auxilia na seleção de genótipos permitindo o ranqueamento de genótipos baseado em multicaracterísticas e livre de multicolinearidade. Além do mais, a correlação genética é considerada, permitindo preservar as relações entre as características e fornecendo um significado biológico aos ideótipos.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo selecionar genótipos de soja tolerantes ao déficit hídrico, que sejam mais adaptáveis, estáveis e produtivos associando a metodologia de modelos mistos, via valores de MHPRVG, e o índice FAI-BLUP.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material Genético

Foram utilizados 93 cultivares de soja oriundas de diferentes programas de melhoramento no Brasil. As cultivares foram divididas em dois grupos, no primeiro foram utilizadas 48 cultivares que foram avaliadas em dois ensaios um realizado em 2016 e 2017, um em cada ano, denominado neste trabalho de grupo 1.

No segundo grupo foram utilizadas 48 cultivares, sendo três pertencentes também ao primeiro grupo, que foram avaliadas em dois ensaios nos anos de 2016 e 2018, um em cada ano, denominados de grupo 2.

Os experimentos foram desenvolvidos em casa de vegetação e foram utilizados como unidade experimental vasos com capacidade de 7,5 litros em que foram impostos o déficit hídrico detalhada posteriormente. O delineamento experimental utilizado para cada ensaio, foi em blocos casualizados (DBC) com três repetições.

O substrato utilizado nos vasos foi composto por solo e areia na proporção de 3:2, respectivamente. Após a confecção do substrato foi realizada análise química e física necessárias para a correção da fertilidade e para a imposição da metodologia de estresse hídrico

utilizada no presente trabalho. Na correção da fertilidade do substrato utilizou-se as exigências nutricionais da cultura da soja seguindo os valores de extração e exportação da cultura para produção de três toneladas por hectare, conforme demonstrado por Câmara (2015).

Antes do plantio, as sementes foram tratadas com fungicida Carbedazin + Thiram, na dose de 200 mL por 100 kg de sementes. Na semeadura foram utilizadas cinco sementes por vaso e, após a emergência das plantas, foi efetuado o desbaste sendo deixado somente uma planta por vaso.

2.2 Metodologia de deficit hídrico

As plantas receberam suprimento hídrico, necessário para atingir a capacidade de campo do solo, até o estágio fenológico R5, correspondente ao período de enchimento de grãos de acordo com a escala de Fehr e Caviness (1977). A partir desse estágio o deficit hídrico foi induzido durante o período de quinze dias, pela metodologia desenvolvida pelo Programa de Melhoramento da Soja da Universidade Federal de Viçosa, conforme descrito por Dantas (2018).

Essa metodologia se baseia na determinação da capacidade de vaso pelo método da curva de retenção de água no solo. Para aplicação dessa metodologia de imposição do deficit hídrico, foi necessário a realização da análise física do solo dos experimentos conforme apresentado na Tabela 1. Em análise, verificou-se que os ensaios realizados apresentaram classe textural franco argiloso arenoso.

Tabela 1. Resumo da análise física dos solos utilizados em cada ensaio conforme classificação adotada por Lemos e Santos (1984).

Ensaio	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	-----%			
2016-1	50	15	35	Franco argiloso arenoso
2017-1	66	4	30	Franco argiloso arenoso
2016-2	56	13	31	Franco argiloso arenoso
2018-2	58	8	34	Franco argiloso arenoso

Em seguida, elaborou-se uma curva de retenção com base no teor de argila do solo, nas tensões -6, -10, -40, -80, -100, -400 e -1500 kPa, baseado no conteúdo de água no solo para

cada tensão. Por meio desta, ajustou-se uma equação de regressão do tipo potencial, sendo utilizado um solo de textura argilosa, pelo modelo de Van Genuchten (1980) para cada ensaio. Com essas informações, calculou-se o conteúdo de água no solo em capacidade de campo estabelecendo para isto os potenciais de -10 kPa, para os experimentos de 2016-1, 2017-1 e 2018-2, e -33 kPa para o experimento de 2016-2. Para o conteúdo de água aplicado no déficit hídrico adotou-se para todos os experimentos o potencial de -900 kPa.

No momento do enchimento dos vasos, a massa do sistema vaso + solo foi padronizada para 6,50 kg. Dez amostras de solo foram coletadas para determinação da umidade e obtenção da massa úmida do solo (M_{su}). Para a determinação da massa do solo seco (M_{ss}) as amostras foram levadas para a estufa de circulação de ar forçada a 105 °C por 48 horas e posteriormente foram pesadas em balança.

Após a instalação dos ensaios, foi elaborado um sistema, composto pela massa de água ($M_{\text{água}}$), do solo seco (M_{ss}), do vaso (M_{vas}) e da planta (M_{planta}), sendo definida a equação da massa do sistema (M_{sist}) por meio do estimador:

$$M_{\text{sist}} = M_{\text{vas}} + M_{ss} + M_{\text{água}} + M_{\text{planta}}$$

A massa da planta (M_{planta}) foi determinada a partir da mensuração da matéria fresca de plantas no respectivo estágio fenológico. Para isso, acrescentou-se plantas adicionais às parcelas, sendo cultivadas paralelamente com as plantas que foram avaliadas.

A massa do sistema, em seus respectivos ensaios, passou a ser monitorado e mantido como a massa a ser atingida todos os dias por meio de manejo de irrigação. Durante o período de imposição do estresse, uma amostra representativa de seis vasos por bloco foi pesados diariamente às 10 e 16 horas, e, a partir da diferença de massa correspondente a cada tratamento, a lâmina de água foi aplicada para atingir o potencial hídrico preestabelecido para a imposição do déficit hídrico (-900 kPa).

Passado o período de imposição do déficit hídrico as plantas voltaram a ser irrigadas à capacidade de campo até o final do ciclo. Ao atingirem o estágio R8 foram avaliadas as seguintes características por planta: massa de vagem (g planta^{-1}) (MV); massa de cem grãos (g) (M100G); número total de vagens por planta (NV) e, número de sementes (NS).

Para mensuração das massas secas das características avaliadas, o material vegetal foi colocado em estufa com à circulação de ar forçada à temperatura de 65° C até atingir o peso constante (NETO *et al.*, 2011). Após atingir o peso constante, as plantas foram pesadas com auxílio de uma balança digital da marca GEHAKA com capacidade máxima de 404 gramas.

2.3 Análise estatística

Os dados oriundos da avaliação de cada grupo de cultivares em seus respectivos ensaios (grupo 1 – ensaios 2016-1 e 2017-1, grupo 2 – ensaios 2016-2 e 2018-2) foram submetidas as análises utilizando a metodologia de modelos mistos. Para isso, utilizou-se o seguinte modelo estatístico:

$$y = Xb + Zg + Wc + e$$

Em que y , b , g , c e e correspondem, respectivamente, aos vetores de valores observados, efeitos de blocos dentro de diferentes ensaios (fixo), efeitos das cultivares (aleatório), efeitos da interação cultivares *versus* ensaios (aleatório) e de erros aleatórios; X , Z e W correspondem às matrizes de incidência para b , g e c , respectivamente.

A significância dos efeitos aleatórios foi obtida através da Análise de Deviance, por meio do teste da razão da máxima verossimilhança (LRT) (RESENDE, 2007). As deviances foram obtidas conforme descrito por Resende (2007), utilizando-se o modelo com e sem os respectivos efeitos, subtraindo a deviance obtida no modelo completo do modelo sem o efeito e comparada com o valor do Qui-quadrado (χ^2) com um grau de liberdade.

Por meio desse modelo foram obtidos os preditores BLUP dos valores genotípicos (Vg) de cada cultivar para cada ensaio j , dado por: $\hat{\mu}_j + \hat{g}_i + (\hat{g}\hat{e}_{ij})$, em que $\hat{\mu}_j$ é a média do ensaio j , \hat{g}_i é o efeito genotípico da cultivar i , no ensaio j , e $\hat{g}\hat{e}_{ij}$ é o efeito da interação cultivares *versus* ensaios relativo ao genótipo i .

A seleção conjunta, considerando-se simultaneamente a produtividade, a estabilidade e a adaptabilidade das cultivares de soja em cada grupo é dada pela estatística média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos preditos (MHPRVG). O estimador é dado por: $MHPRVG * MG_i = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{Vg_{ij}}} . MG$, em que, n é o número de ensaios onde se avaliou a cultivar i , Vg_{ij} é o valor genotípico da cultivar i no ensaio j , expresso como proporção da média desse ensaio, e MG é a média geral considerando todos os ensaios e cultivares avaliadas para cada grupo.

O software Selegen-REML/BLUP (RESENDE, 2016) foi utilizado para as referidas análises.

2.4 Seleção de genótipos pelo índice FAI-BLUP

Os valores de MHPRVG*MG de cada cultivar, para cada característica e avaliadas sob condição de déficit hídrico, foi utilizado para a seleção simultânea por meio do índice de seleção FAI-BLUP proposto por Rocha et al., (2018). Este índice baseia-se na análise de fatores e na distância genótipo-ideótipo para classificar os genótipos de forma multicaracterística. Os ideótipos foram definidos considerando o sentido desejável e indesejável para as quatro características, baseado nos objetivos do programa de melhoramento, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Níveis relativos a cada variável para estabelecimento dos ideótipos desejável e indesejável utilizados como critérios no índice FAI-BLUP.

Ideótipo	MV	NS	M100G	NV
Desejável	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
Indesejável	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo

MV: massa de vagem; NS: número de semente; M100G: massa de cem grãos; NV: número total de vagens por planta.

As etapas relacionadas à análise de fatores, componentes principais e do índice FAI-BLUP foram realizadas com o uso do software R (R Core Team, 2019), por meio da rotina disponibilizada por Rocha et al., (2018).

Realizou-se a comparação dos ganhos genéticos, em percentagem (GS%), das cultivares selecionadas via índice FAI-BLUP e das cultivares selecionadas para cada característica de forma direta. Para a seleção direta em cada característica utilizou-se os valores de MHPRVG*MG das cultivares selecionadas. Adotou-se neste trabalho a seleção de 10 cultivares em cada grupo avaliado.

3. RESULTADOS

O efeito genotípico significativo foi verificado pela análise de deviance para as quatro características avaliadas nas análises conjunta dos ensaios 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1) (Tabela 3) e 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2) (Tabela 4), indicando existência de variabilidade genética entre os genótipos.

Na tabela 5 são apresentados os autovalores e a variância acumulada referentes aos quatro componentes principais obtidos pela matriz de correlação genética entre as

características mensuradas para os dois grupos de cultivares avaliadas sob condições de deficit hídrico.

Tabela 3. Resumo da análise conjunta com os valores de deviance e significância pelo teste de razão de verossimilhança (LRT) referentes às características massa de vagem (MV), número de sementes (NS), massa de cem grãos (M100G) e número de vagens (NV) avaliadas em 48 cultivares de soja nos ensaios 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1) sob condições de deficit hídrico.

Modelo	MV		NS		M100G		NV	
	Deviance	LRT	Deviance	LRT	Deviance	LRT	Deviance	LRT
$\widehat{\sigma}_g^2 = 0^a$	1178,42	-46,16*	4431,67	-72,15*	1468,5	-6,95*	3651,75	-108,55*
Completo	1132,26	-	4359,52	-	1401,55	-	3543,2	-

a: parâmetro estabelecido como de valor zero para comparação com o modelo completo; LRT: teste de razão de verossimilhança; *: significativo a 5% de probabilidade pelo teste de χ^2 com 1 grau de liberdade.

Tabela 4. Resumo da análise conjunta com os valores de deviance e significância pelo teste de razão de verossimilhança (LRT) referentes às características massa de vagem (MV), número de sementes (NS), massa de cem grãos (M100G) e número de vagens (NV) avaliadas em 48 cultivares de soja nos ensaios 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2) sob condições de deficit hídrico.

Modelo	MV		NS		M100G		NV	
	Deviance	LRT	Deviance	LRT	Deviance	LRT	Deviance	LRT
$\widehat{\sigma}_g^2 = 0^a$	1263,5	-48,22*	4814,84	-13,68*	2438,75	-2,94*	3442,3	-45,62*
Completo	1215,28	-	4801,16	-	2435,81	-	3396,68	-

a: parâmetro estabelecido como de valor zero para comparação com o modelo completo; *: significativo a 5% de probabilidade pelo teste de χ^2 com 1 grau de liberdade.

Tabela 5. Autovalores e variância acumulada explicada pelos componentes principais determinados em dois grupos de cultivares de soja, primeiro grupo avaliado nos ensaios 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1) e o segundo avaliado nos ensaios 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2), avaliadas sob condições de deficit hídrico imposto no estádio R5 de desenvolvimento.

Grupo 1			
Componentes Principais	Autovalores		Variância
	Autovalores	Autovalor (%)	Cumulativa (%)
1	2,40	59,91	59,91
2	1,02	25,41	85,32
3	0,52	12,88	98,20
4	0,07	1,80	100,00
Grupo 2			
1	2,66	66,49	66,49
2	1,01	25,32	91,81
3	0,18	4,48	96,29
4	0,15	3,71	100,00

Segundo critério de Kaiser (1958), o número de fatores é definido pelo número de autovalores iguais ou superiores à unidade. Sendo assim, para os ensaios envolvendo o grupo 1 de cultivares, os dois primeiros autovalores explicaram 85,32% da variância total entre as

cultivares avaliadas (Tabela 5). Já para as cultivares pertencentes ao grupo 2, os dois primeiros autovalores explicaram 91,81% da variância genética total.

Após a rotação dos fatores, com base nas cargas fatoriais finais, pôde ser verificado que para os grupos 1 e 2 de cultivares, as características ficaram agrupadas em dois fatores (AF1 e AF2). No grupo 1, os valores de comunalidade variaram de 0,79 a 0,90. Já para as cultivares pertencentes ao grupo 2, os valores de comunalidades variaram de 0,89 a 0,98. Além disso, pode ser observado para ambas os grupos de cultivares, que as correlações genéticas entre as características podem ser dadas na mesma direção ou em direção oposta (Tabela 6).

A aplicação do índice FAI-BLUP possibilitou a classificação dos genótipos associados à probabilidade espacial para as características MV, NS, M100G e NV, permitindo a projeção do genótipo desejável e indesejável, conforme estabelecido neste trabalho, com a combinação da análise de fatores. A correlação genética, dentro de cada fator foi levada em consideração, preservando as relações entre as características.

Tabela 6. Cargas fatoriais e comunalidades para as variáveis massa de vagem (MV), número de sementes (NS), massa de cem grãos (M100G) e número de vagens (NV) mensuradas em dois grupos de cultivares de soja, primeiro grupo avaliado nos ensaios 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1) e o segundo avaliado nos ensaios 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2), avaliadas sob condições de deficit hídrico imposto no estádio R5 de desenvolvimento.

Grupo 1			
Variáveis	AF 1	AF 2	Comunalidades
MV	-0,85	-0,24	0,79
NS	-0,80	0,50	0,90
M100G	0,77	-0,56	0,90
NV	-0,02	0,91	0,82
Média	-	-	0,85
Grupo 2			
MV	-0,95	-0,05	0,91
NS	-0,80	0,50	0,90
M100G	0,08	-0,99	0,98
NV	-0,93	0,16	0,89
Média	-	-	0,92

As previsões de ganho genético para seleção direta e para o índice FAI-BLUP podem ser observadas na Tabela 7, em que, a seleção direta para ambos os conjuntos de cultivares, apresentou o ganho máximo para as características avaliadas.

As predições de ganho genético pelo índice FAI-BLUP foram de menor magnitude quando comparado aos oriundos da seleção direta. Entretanto, esse ganho foi simultâneo e positivo para as características MV, NV, NS com exceção à característica M100G, que

apresentou ganho negativo para o grupo 1. Já para o grupo 2, somente a características NS obteve ganho negativo.

A predição de ganho para o ideótipo (ganho genético desejável), visando a obtenção de maiores genótipos que maximizem os valores para todas as características das cultivares avaliadas no grupo 1, foi de 15,58% (Tabela 7). Já para o genótipo com o comportamento indesejável para as características, foi de -53,20%. Considerando as cultivares avaliadas no grupo 2, o ganho para o ideótipo foi de 53,31% e para o genótipo indesejável o ganho foi de -8,79%.

Tabela 7. Previsão de ganho genético baseado no Índice FAI-BLUP e na seleção direta pelos valores genéticos nas safras 2016-1 e 2017-1 (Grupo 1) e 2016-2 e 2018-2 (Grupo 2).

	Fatores	Características	Valor Genético Médio	CVG (%)	Ganho Genético	
					Seleção direta	FAI-BLUP
Grupo 1	1	MV	14,38	6,86	10,20	2,73
	1	NS	212,49	10,16	13,21	7,41
	1	M100G	14,98	10,27	14,53	-7,73
	2	NV	98,83	11,62	15,50	5,92
	Total de ganho desejável (%)			-	-	-
Total de ganho indesejável (%)			-	-	-	-53,20
Grupo 2	1	MV	7,64	14,73	27,16	16,31
	1	NS	112,60	14,36	23,57	-2,07
	1	NV	54,02	15,15	14,30	11,35
	2	M100G	12,10	10,45	24,57	8,56
	Total de ganho desejável (%)			-	-	-
Total de ganho indesejável (%)			-	-	-	-8,79

Os diferentes genótipos selecionados pelo índice no ambiente sob condição de deficit hídrico, apresentam os valores genéticos de produtividade, estabilidade e adaptabilidade (Figura 1 e 2).

Nas Figuras 1 e 2, pode ser observado o ranqueamento dos genótipos pertencentes aos dois grupos, respectivamente, de acordo com a probabilidade espacial associada, fornecida pelo índice FAI-BLUP, com uma intensidade de seleção de 15% (10 genótipos).

Os resultados permitiram um processo de seleção simples dos genótipos com base no ideótipo de interesse. Os dez genótipos selecionados no grupo 1 foram os genótipos CD FAPA 220, DMARIO 70i, FUNDACEP 56 RR, BRS 232, 5D690 RR, CD 235 RR, M-SOY 6101, CD 206, BRS 246 RR, CD 213 RR (Figura 1).

Na Figura 2, é possível visualizar a seleção dos genótipos no grupo 2, sendo eles: BRS 284, CD 242 RR, CD 201, M-SOY 7901, P98Y70, FUNDACEP 58, TMG 115 RR, CD 5807, OCEPAR 3, 5G770 RR.

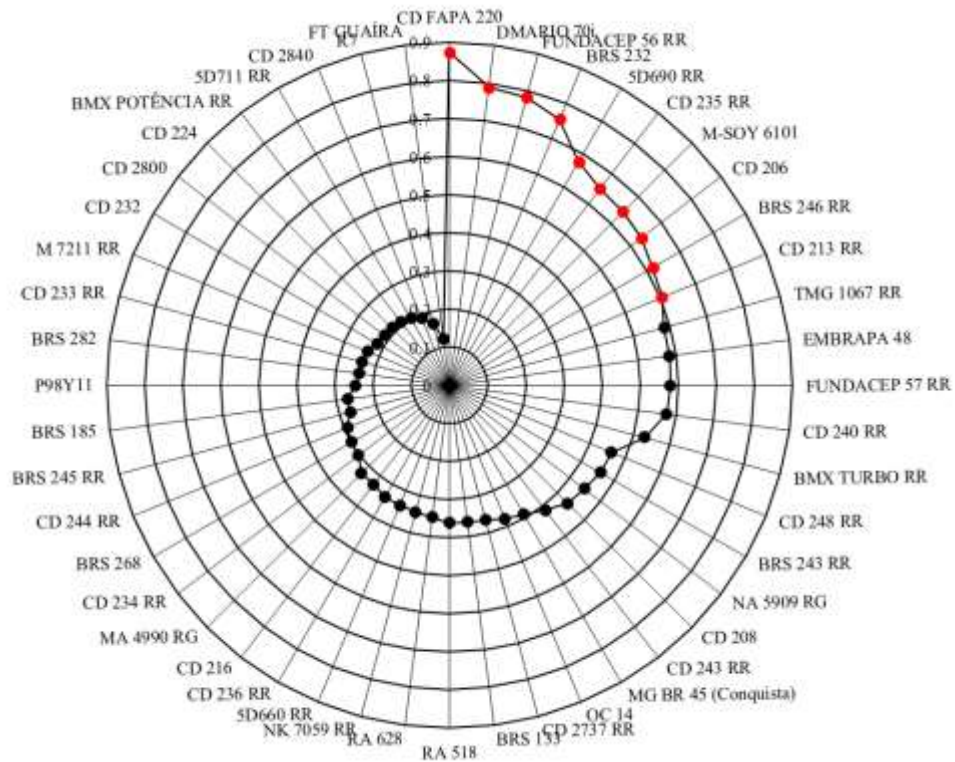


Figura 1. Ranqueamento baseado na distância genótipo-ideótipo (representado pelos círculos) e seleção dos 48 genótipos de soja do Grupo 1 (2016-1 e 2017-1) pelo Índice FAI-BLUP. ●: Genótipos selecionados; ●: Genótipos não-selecionados.

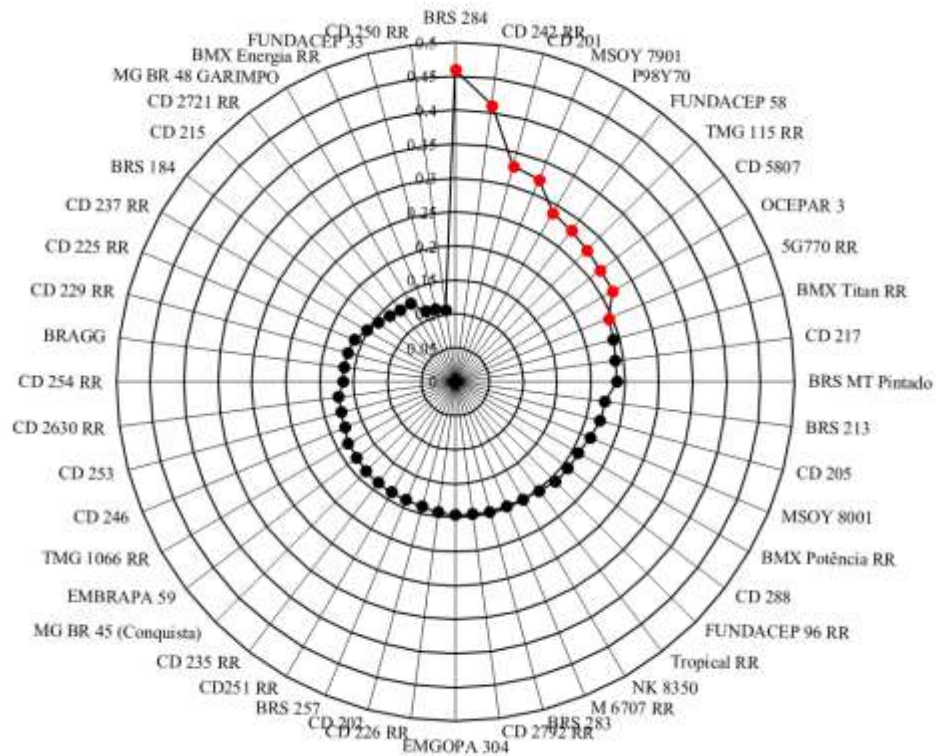


Figura 2. Ranqueamento baseado na distância-genótipo ideótipo (representado pelos círculos) e seleção dos 48 genótipos de soja do Grupo 1 (2016-2 e 2018-2) pelo Índice FAI-BLUP. ●: Genótipos selecionados; ●: Genótipos não-selecionados.

Nas Figuras 3 e 4, é possível verificar o comportamento dos dez genótipos selecionados pelo índice FAI-BLUP, com base no valor genotípico médio penalizado pela instabilidade e capitalizado pela adaptabilidade, multiplicado pela média geral de todas as safras (MHPRVG*MG) das características massa de vagem (MV), número de vagem (NV), massa de cem grãos (M100G) e número de sementes (NS).

Para a característica MV (Figura 3A), pode ser verificado que apenas três genótipos estão abaixo da média geral (14,37 g, linha azul), sendo eles: CD FAPA 220, CD206 e CD 213 RR, apresentando desempenho inferior sob condição de déficit hídrico. Entre a média dos dez selecionados (14,59 g, linha cinza), foi possível observar que os genótipos DMARIO 70i, BRS 232, 5D690 RR, M-SOY 6101 e BRS 246 RR.

Já para a característica NS (Figura 3B) todos os genótipos apresentaram comportamento superior à média geral de 212,16 sementes (linha azul). Vale ressaltar que dentre os três genótipos com pior desempenho para a característica MV, os genótipos CD FAPA 220 e CD 213 RR foram os que apresentaram melhor desempenho para a característica NS. Para M100G (Figura 3C) nota-se, que os dez genótipos selecionados, obtiveram valores de MHPRVG*MG abaixo da média geral (14,95 g, linha azul).

Considerando a característica NV (Figura 3D), os genótipos CD FAPA 220, DMARIO 70i, BRS 232, CD235 RR, M-SOY 6101, CD 206 e BRS 246 RR apresentaram desempenho acima da média geral 98,79 vagens e os demais, acima da média geral. E, os genótipos inferiores foram: FUNDACEP 56 RR, 5D690 RR e CD 213 RR.

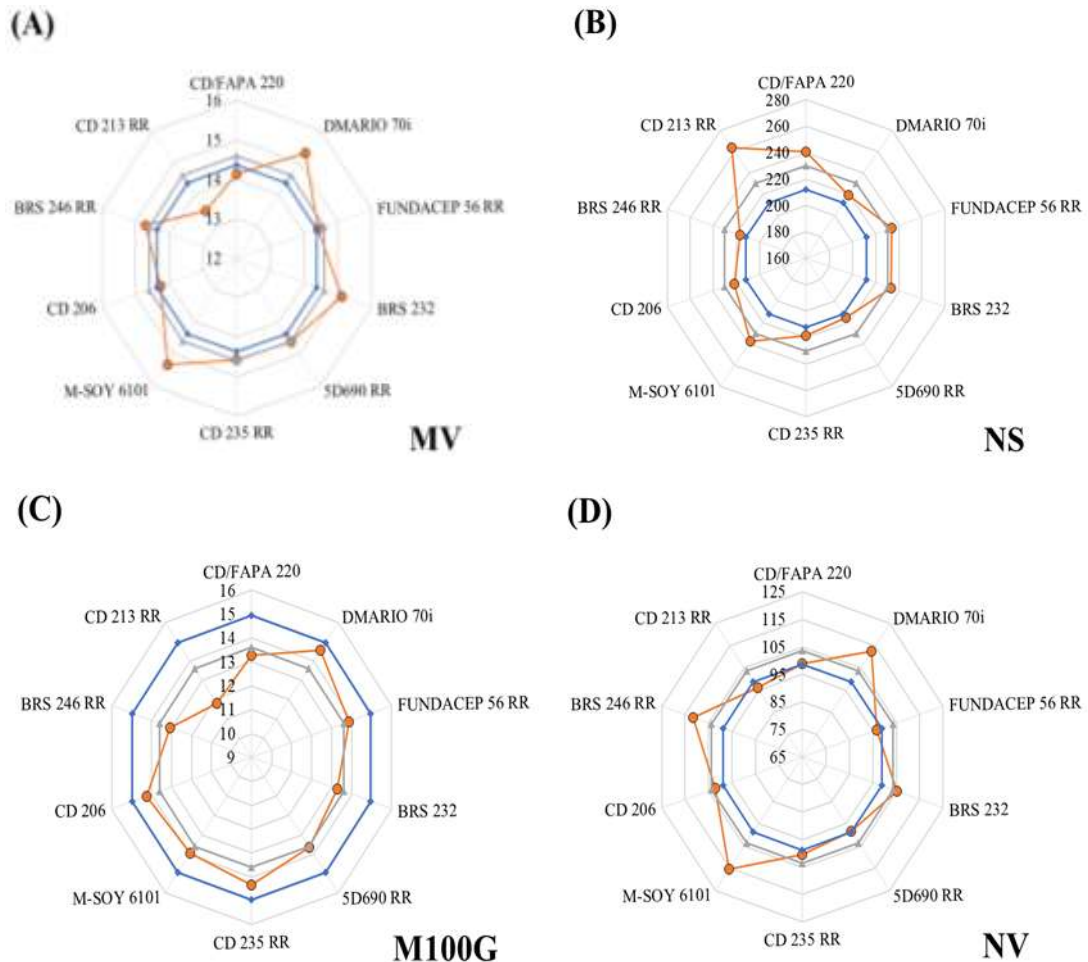


Figura 3. Representação gráfica do desempenho dos dez genótipos selecionados, no grupo 1 (2016-1 e 2017-1), pelo valor genotípico médio penalizado pela instabilidade e capitalizado pela adaptabilidade, multiplicado pela média geral de todas as safras ($MHPRVG \cdot MG$) das características massa de vagem (MV), número de sementes (NS), massa de cem grãos (M100G) e número de vagem (NV). O círculo cinza representa a média dos dez genótipos selecionadas pelo índice FAI-BLUP em condição de déficit hídrico. A média geral das características está representada em azul. Em laranja, é o valor absoluto das características em estudo. A – MV; B – NS; C – M100G; D – NV.

No segundo grupo de cultivares, os genótipos que apresentaram desempenho superior à média geral para a característica MV foram BRS 284, CD 242 RR, CD 201, M-SOY 7901, P98Y70, FUNDACEP 58, 5D5807 e OCEPAR 3. Já os genótipos inferiores foram TMG 115 RR e 5G770 RR (Figura 4A).

Para a característica NS os genótipos BRS 284, CD 201 e OCEPAR 3 apresentaram foram superiores à média geral de 111, 07 (linha azul). Abaixo da média geral estão os genótipos: CD 242 RR, M-SOY 7901, P98Y70, FUNDACEP 58, TMG 115, CD 5807 e 5G770 RR (Figura 4B).

Ao contrário do que ocorreu para o primeiro grupo de genótipos em relação à característica M100G, os genótipos pertencentes ao grupo 2 apresentaram média superior à

média geral 12,01 g (Figura 4C). Já para NV (Figura 4D), somente o genótipo TMG 1155 RR, apresentou desempenho inferior à média geral, tendo como destaque o genótipo BRS 284, que produziu aproximadamente 68 vagens sob condição de déficit hídrico.

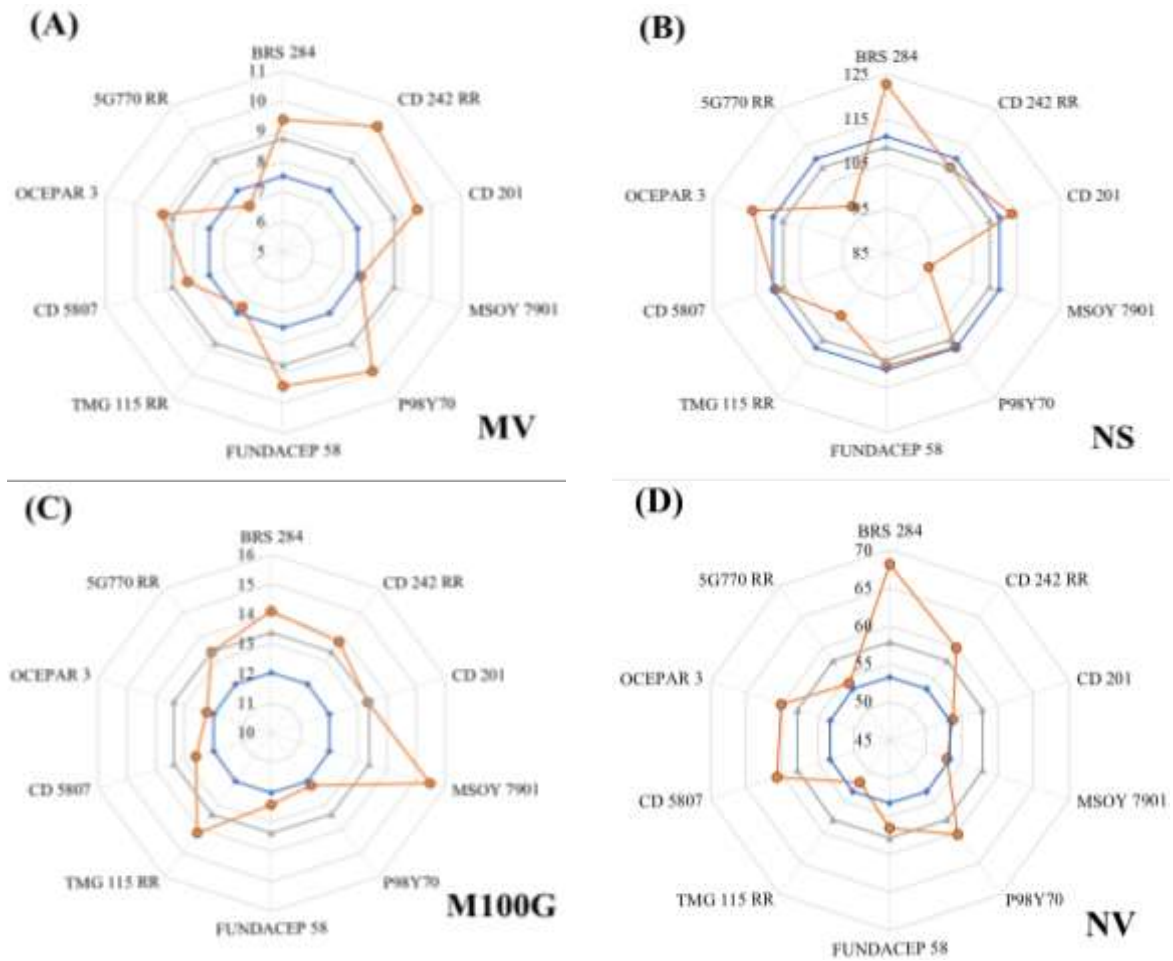


Figura 4. Representação gráfica do desempenho dos dez genótipos selecionados, no grupo 2 (2016-2 e 2018-2), pelo valor genotípico médio penalizado pela instabilidade e capitalizado pela adaptabilidade, multiplicado pela média geral de todas as safras (MHPRVG*MG) das características massa de vagem (MV), número de sementes (NS), massa de cem grãos (M100G) e número de vagem (NV). O círculo cinza representa a média dos dez genótipos selecionadas pelo índice FAI-BLUP em condição de déficit hídrico. A média geral das características está representada em azul. Em laranja, é o valor absoluto das características em estudo. A – MV; B – NS; C – M100G; D – NV.

Por meio da representação gráfica das características MV, NS, M100G e NV foi possível visualizar a variabilidade genética dos genótipos selecionados pelo índice FAI-BLUP mais adaptáveis, estáveis e produtivos em condição de deficit hídrico.

4. DISCUSSÃO

A cultura da soja é suscetível ao déficit hídrico, podendo expressar diferentes variações genóticas (YU et al., 2016). Por isso, genótipos tolerantes a estresses abióticos devem ser selecionados em ambiente específico por causa do comportamento dos diferentes genes que controlam as características em função do estímulo ambiental recebido (MAHAJAN; TUTEJA, 2005; SOUZA et al., 2008; VALE et al., 2012).

Contudo, a seleção de genótipos de soja é um processo complexo, pois as características relacionadas a produtividade são de natureza quantitativa, sendo alguns correlacionados entre si e de baixa herdabilidade (NOGUEIRA et al., 2012). Características com baixa correlação e efeito direto pode levar a ganhos negativos, como por exemplo, massa de cem grãos (SILVA et al., 2015). Além disso, as características massa de vagem, número de vagem e massa de semente podem ser afetadas diretamente em condições de estresse hídrico (KOBRAEE et al., 2011; MALEKI et al., 2013; SILVA et al., 2015). Devido a isso, torna-se importante a seleção de genótipos tolerantes, que apresentem rendimento de grãos, sob condições de déficit hídrico (CHOWDHURY et al., 2016).

Deste modo, o uso do índice de seleção tem sido uma ferramenta importante que envolve a seleção de várias características de interesse simultaneamente, explicando a superioridade relativa ou a inferioridade dos indivíduos (BERNARDO, 2010). Além do mais, o índice de seleção é mais eficiente do que a seleção direta, pois permite a distribuição dos ganhos entre as diversas características de forma homogênea e, de acordo com o objetivo do programa de melhoramento genético, gerar ganho simultâneo (FREITAS et al., 2012; CRUZ et al., 2012).

Com a predição de ganhos genéticos, via índice de seleção, é possível determinar a estratégia de seleção permitindo a orientação dos programas de melhoramento e a escolha de técnicas eficazes. No entanto, diferentes índices apresentam maneiras distintas para seleção e, consequentemente, de ganhos (CRUZ et al., 2012). Na seleção direta é possível identificar o ganho máximo de cada característica de interesse. Por meio dessa informação, um índice pode ser considerado ideal, o que combinar as características e, obter o ganho mais próximo da seleção direta (AZEREDO et al., 2017).

Com os ganhos genéticos observados, foi possível evidenciar que o uso do índice FAI-BLUP, juntamente com a média harmônica da performance relativa dos valores genóticos (MHPRVG), favoreceu a obtenção de ganhos genéticos mais equilibrado simultaneamente para

todas as características avaliadas, conservando a variabilidade genética dentro de um programa de melhoramento.

Aplicando-se o método da média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG) pode ser verificado a seleção de genótipos com alto desempenho e, na literatura pode ser encontrado diferentes trabalhos com a aplicação desse método. Trabalhos com a seleção de linhagens de feijão (CARBONELL et al., 2007), algodão (CARVALHO et al., 2016) e arroz (NETO et al., 2013), foram selecionados de forma coerente sobre os valores genotípicos e não fenotípicos.

Atribuindo a média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG*MG) ao índice FAI-BLUP, foi possível a seleção de genótipos adaptáveis, estáveis e produtivos de maneira eficaz, criando-se um ideótipo desejável em condição de déficit hídrico. Um índice baseado na distância genótipo-ideótipo permite fixar um valor ideal para as características, criando-se dessa maneira, um tipo ideal ou ideótipo de plantas (WRICKE; WEBER, 1986). Um ideótipo é definido como um genótipo hipotético com combinações das características para adaptação a um ambiente específico (DONALD, 1968) e consiste das características morfológicas e fisiológicas que contribuirão para uma maior produtividade do que as cultivares atuais (SHARMA et al., 2013).

Rocha et al., (2018) validou o potencial do índice FAI-BLUP, selecionando quinze genótipos de capim-elefante para cogeração de energia. O índice previu ganhos de 62% para as características que se desejam aumentar e, de 33% para características que se desejam diminuir, gerando ganhos para todas as características simultaneamente.

No trabalho desenvolvido por Woyann et al., (2019), utilizando o índice FAI-BULP baseado no ideótipo desejado, foi possível selecionar seis linhagens recombinantes de soja (RILs) para produção de biodiesel, no qual, apresentaram ganhos genéticos para produção de grãos de 4,92%. Contribuindo com a eficiência do índice, Salvador (2018) selecionou progênies de feijão com elevado potencial para arquitetura de plantas, produtividade de grãos e o aspecto de grãos do tipo carioca.

As predições de ganhos negativos observados para massa de cem grãos (2016-1 e 2017-1) e número de sementes (2016-2 e 2018-2), está relacionado aos baixos efeitos direto e indireto e as baixas correlações, conforme pode ser observado na análise de trilha no capítulo 1. Segundo os autores UD-DIN et al. (1992) e PASSOS et al. (2011), as características relacionadas ao rendimento de grãos, é dependente da herdabilidade, das correlações genéticas e, do efeito direto e indireto das características de interesse, que variam em relação ao ambiente e, de acordo

com POUR-SIAHBIDI et al. (2013), devem ser levadas em consideração pelos programas de melhoramento genético que visam a tolerância ao deficit hídrico.

Segundo os autores Ghassemi-Golezani e Lotfi (2012) e Wijewardana et al. (2019), os componentes de rendimento número de semente e massa de cem grãos podem ser afetados em condições de deficit hídrico, conseqüentemente, afetando a produtividade. Morsy et al. (2018), estudaram o efeito do deficit hídrico no crescimento, rendimento e qualidade de sementes de soja e, concluíram que, um período de quinze dias reduziu significativamente o peso de cem grãos e o rendimento de sementes quando comparado ao tratamento controle. Trabalhos desenvolvidos em casa de vegetação e em campo com soja, em diferentes épocas, pelos autores Sadeghipour et al. (2001) e Frederick et al. (2012), mostraram que o deficit hídrico, reduziu entre 24 a 50 % o rendimento de sementes. Jumrani e Bhatia (2018), observaram que a indução do deficit hídrico no estágio vegetativo e reprodutivo, reduziu em 9 e 36 %, respectivamente, comparado ao peso médio de cem grãos de 15,5 g das plantas sem deficit hídrico.

Isso ocorre devido à redução da translocação de fotoassimilados na planta, em condição de deficit hídrico, ocasionando a redução do tamanho do grão e ao abortamento de vagens (SEDIYAMA et al., 2015; SILVA et al., 2019). Além disso, a soja apresenta variabilidade genética em relação ao tamanho e forma da semente entre os genótipos (COSTA et al., 2004; MATSUO et al., 2015). Sendo assim, pode se notar que a redução da massa de cem grãos não reduziu o rendimento, devido ao aumento do número de sementes, na predição de ganho genético pelo índice FAI-BLUP, no grupo 1 (2016-1 e 2017-1).

Logo, a seleção de genótipos por meio do índice FAI-BLUP, possibilitou a seleção de genótipos conservando a variabilidade genética existente entre as características em estudo (ROCHA et al., 2018). Sendo assim, esses materiais podem ser inseridos no programa de melhoramento genético da soja visando aumentar a estabilidade e adaptabilidade e o rendimento da produção, conforme proposto por Salimi et al. (2012), ao identificar genótipos de soja tolerantes sob condições de deficit. Conseqüentemente, aumentando o número de alelos favoráveis por meio de cruzamentos direcionados, conforme proposto por Teodoro et al. (2019), contribuindo para maior eficiência dos programas de melhoramento da soja, ao estudar a capacidade de combinação de características fisiológicas em soja.

5. CONCLUSÕES

Os genótipos selecionados podem ser utilizados como fonte de germoplasma no programa de melhoramento genético da soja, visando o desenvolvimento de genótipos tolerantes ao deficit hídrico.

Em cada grupo de genótipos avaliado, o índice FAI-BLUP, possibilitou a seleção de dez genótipos, mais adaptáveis, estáveis e produtivos sob condições de deficit hídrico, baseado no ideótipo desejável. Em que, apresentou predição de ganho genético positivo. Entretanto, ganho negativo para a característica massa de cem grãos (M100G) no grupo 1 e número de sementes (NS) no grupo 2, estando diretamente relacionado aos efeitos diretos e indiretos em relação ao ambiente em estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEREDO, A.A.C.; BHERING, L.L.; BRASILEIRO, B.P.; FILHO, J.C.B.; CRUZ, C.D.; DAROS, E. Comparison between different selection indices in energy cane breeding, **Genetics and Molecular Research**, v. 16, p. 1-12, 2017.

BARKLA, B.J.; VERA-ESTRELLA, R.; PANTOJA, O. Progress and challenges for abiotic stress proteomics of crop plants. **Proteomics**, v. 13, n. 12-13, p. 1801-1815, 2013.

BERNARDO, R. **Breeding for Quantitative Traits in Plants**. 2º ed. Woodbury, Minnesota: Ed. Stemma Press, 2010. 369 p.

BHATIA, V.S., JUMRANI, K. A maximin–minimax approach for classifying soybean genotypes for drought tolerance based on yield potential and loss. **Plant breeding**, v. 135, n. 6, p. 691-700, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbr.12414>. Acesso em: 05 Nov. 2019.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field crops research**, v. 112, n. 2-3, p. 119-123, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>. Acesso em: 05 Nov. 2019.

CABRERA-BOSQUET, L.; CROSSA, J.; VON ZITZEWITZ, J.; SERRET, M.D.; ARAUS, L.J. High-throughput Phenotyping and Genomic Selection: The Frontiers of Crop Breeding Converge F. **Journal of integrative plant biology**, v. 54, n. 5, p. 312-320, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01116.x>. Acesso em: 05 Nov. 2019.

CÂMARA, G.M.S. **Adubação**. In: Soja do plantio à colheita. Editores. SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Ed. UFV, 2015. 333 p.

CARBONELL, S.A.M.; CHIORATO, A.F.; RESENDE, M.D.V.; DIAS, L.A.S.; BERALDO, A.L.A.; PERINA, E.F.; Estabilidade de cultivares e linhagens de feijoeiro em diferentes ambientes no estado de São Paulo, **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 193-201, 2007.

CARVALHO, L.P.; FARIAS, F.J.C.; MORELLO, C.L.; TEODORO, P.E.; Uso da metodologia REML/BLUP para seleção de genótipos de algodoeiro com maior adaptabilidade e estabilidade produtiva, **Bragantia**, v. 75, n. 3, p. 314-321, 2016.

CHOWDHURY, J. A.; KARIM, M. A.; KHALIQ, Q. A.; SOLAIMAN, A. R. M.; AHMED, J. U. Screening of soybean (*Glycine max* L.) genotypes under water stress condition. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v. 41, n. 3, p. 441-450, 2016.

COSTA, P.R. et al. Estresse hídrico induzido por manitol em sementes de soja de diferentes tamanhos. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 2, p. 105-113, 2004.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4^o ed, Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 514 p.

DANTAS, S.A.G. **Estratégia de indução de déficit hídrico em soja e desenvolvimento de GWAS para germinação e vigor de sementes**. Tese de Doutorado (Doutorada em Fitotecnia) – Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2018.

DONALD, C.M.T. The breeding of crop ideotypes. **Euphytica**, v. 17, n. 3, p. 385-403, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00056241>. Acesso em: 02 Nov. 2019.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. Stages of soybean development. **Special Report, Agriculture and Home Economics Experiment Station**, v. 80, p. 11, 1977.

FLEURY, D.; JEFFERIES, S.; KUCHEL, H.; LANGRIDGE, P. Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.12, p.3211-3222,2010.

FREDERICK, J.R.; CAMP, C.R.; BAUER, P.J. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. **Crop science**, v. 41, n. 3, p. 759-763, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.413759x>. Acesso em: 05 Nov. 2019.

FREITAS, J. P. X.; OLIVEIRA, E. J.; JESUS, O. N.; CRUZ NETO, A. J.; SANTOS, L. R. Formação de população base para seleção recorrente em maracujazeiro amarelo com uso de índices de seleção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 393-401, 2012.

GHASSEMI-GOLEZANI, K.; LOTFI, R. Response of soybean cultivars to water stress at reproductive stages. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, v. 17, p. 198-202, 2012.

GHOLINEZHAD, E.; DARVISHZADEH, R.; BERNOUSI, I. Evaluation of Drought Tolerance Indices for Selection of Confectionery Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Landraces under Various Environmental Conditions, **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 42, n. 1, p. 187-201, 2014.

JUMRANI, K.; BHATIA, V.S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular biology of Plants**, v. 24, n. 1, p. 37-50, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0480-5>. Acesso em: 06 Nov. 2019.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02289233>. Acesso em: 07 Nov. 2019.

KOBRAEE, S.; SHAMSI, K.; RASEKHI, B. Soybean production under water deficit conditions. **Annals of Biological Research**, v. 2, n. 2, p. 423-434, 2011.

LAUER, J.G., BIJL, C.G., et al. The scientific grand challenges of the 21st century for the Crop Science Society of America. **Crop Science**, Madison, v. 52, n. 3, p. 1003-1010, 2012. DOI: <https://doi:10.2135/cropsci2011.12.0668>. Acesso em: 07 Nov. 2019.

LI, Z.K.; LUO, J.L.; et al. Over dominant epistatic loci are the primary genetic basis of inbreeding depression and heterosis in rice. I. Biomass and grain yield. **Genetics**, v. 158, n. 4, p. 1737-1753, 2001.

MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: an overview. **Archives of biochemistry and biophysics**, v. 444, n. 2, p. 139-158, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>. Acesso em: 10 Nov. 2019.

MALEKI, A., NADERI, A., NASERI, R., FATHI, A., BAHAMIN, S., MALEKI, R. Physiological performance of soybean cultivars under drought stress. **Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences**, v. 2, n. 6, p. 38-44, 2013.

MATSUO, E.; FERREIRA, S.C.; SEDIYAMA, T. **Botânica e fenologia**. In: In. Soja do plantio à colheita. Editores: SEDIYAMA, T.; Silva, F.; BORÉM, A. Ed. UFV, 2015. 333 p.

MORSY, A. R. et al. Effect of Water Deficit on Growth, Yield and Quality of Soybean Seed. **Journal of Plant Production**, v. 9, n. 8, p. 709-716, 2018.

NETO, A.R.; JUNIOR, E.U.R.; GALLO, P.B.; FREITAS, J.G.; AZZINI, L.E. Comportamento de genótipos de arroz de terras altas no estado de São Paulo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 512-519, 2013.

NETO, R.F.; DA SILVA JÚNIOR, G.B.; DA ROCHA, L.F.; LUCENA, Í.H. Características biométricas de mudas de castanha-do-gurguéia em função de calagem e NPK1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 940-949, 2011.

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; DE SOUSA, L. B.; HAMAWAKI, O. T.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, D. G.; MATSUO, É. Análise de trilha e correlações entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 6, 2012.

PASSIOURA, J. B. Scaling up: the essence of effective agricultural research. **Functional Plant Biology**, v. 37, n. 7, p. 585-591, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP10106>. Acesso em: 06 Nov. 2019.

PASSOS, A. R. et al. Ganho por seleção direta e indireta em caupi considerando a interação G x E. **Revista da FZVA**, v. 18, n. 1, 2011.

POUR-SIAHBIDI, M.M. et al. Character association and path analysis of soybean (*Glycine max* L.) genotypes under water deficit stress. **International Journal of Biosciences**, v. 3, n. 10, p. 126-132, 2013.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria, 2019. Disponível em: URL <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 07 Nov. 2019.

RESENDE, M. D. V. de. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 330-339, 2016.

RESENDE, M.D.V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colomvo: Embrapa Florestas, 1º ed., 2007. 561 p.

ROCHA, J.R.D.A.S.; MACHADO, J.C.; CARNEIRO, P.C.S. Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. **Global Change Biololy Bioenergy**, v. 10, n. 1, p. 52-60, 2018.

RODRIGUES, J.I.S. et al. A. Associação de marcadores microssatélites com teores de óleo e proteína 594 em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n.3, p.255- 262, 2013.

ROSADO, A.M.; ROSADO, T.B.; ALVES, B.G.L.; BHERING, L.L. Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 966-973, 2012.

SADEGHIPOUR, O. et al. Soybean response to drought and seed inoculation. **World Applied Sciences Journal**, v. 17, n. 1, p. 55-60, 2001.

SALIMI, S.; LAHIJI, H. S.; ABADI, G. M.; SALIMI, S.; MORADI, S. Genetic diversity in soybean genotypes under drought stress condition using factor analysis and cluster analysis. **World Applied Sciences Journal**, v. 16, n. 4, p. 474-478, 2012.

SALVADOR, F. V. **Seleção recorrente no melhoramento do feijoeiro: otimização das etapas de seleção e recombinação de progênies**. 2018. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

SEDIYAMA, T.; GLASENAPP, J. S.; MATSUO, E. **Estresse abiótico**. In: Melhoramento Genético da Soja. Editor: SEDIYAMA, T. Ed. Mecenas, 2015. 352 p.

SHARMA, M.; SANGHERA, G.S.; SAHU, P. et al. Tailoring rice plants for sustainable yield through ideotype breeding and physiological interventions. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 40, p. 5004-5019, 2013.

SILVA, A. F. D.; SEDIYAMA, T.; SILVA, F. C. D. S.; BEZERRA, A. R. G.; FERREIRA, L. V. Correlation and path analysis of soybean yield components. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, v. 5, n. 1, p. 177-179, 2015.

SILVA, E.R. et al. Can co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* alleviate adverse effects of drought stress on soybean (*Glycine max* L. Merrill.)? **Archives of microbiology**, v. 201, n. 3, p. 325-335, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-018-01617-5>. Acesso em: 06 Dez. 2019.

SILVA, G.O.; CARVALHO, A.D.F.; VEIRA, J.V.E.; BENIN, G. Verificação da adaptabilidade e estabilidade de populações de cenoura pelos métodos AMMI, GGE biplot e REML/BLUP. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p.494-501, 2011.

SINCLAIR, T.R. Challenges in breeding for yield increase for drought. **Trends in plant science**, v. 16, n. 6, p. 289-293, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.02.008>. Acesso em: 10 Nov. 2019.

SOUZA, L.V. de; MIRANDA, G.V., et al. Genetic control of grain yield and nitrogen use efficiency in tropical maize. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1517-1523, 2008.

TEODORO, L.P. et al. Understanding the combining ability for physiological traits in soybean. **PloS one**, v. 14, n. 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226523>. Acesso em: 10 Jan. 2020.

UD-DIN, N.; CARVER, B. F.; CLUTTER, A. C. Genetic analysis and selection for wheat yield in drought-stressed and irrigated environments. **Euphytica**, v. 62, n. 2, p. 89-96, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00037933>. Acesso em: 10 Nov. 2019.

VALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; BERMUDEZ, F.; MIRANDA, G. V. Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 385-392, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acesso em: 10 Nov. 2019.

WIJEWARDANA, C.; REDDY, K.R.; BELLALLOUI, N. Soybean seed physiology, quality, and chemical composition under soil moisture stress. **Food chemistry**, v. 278, p. 92-100, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.035>. Acesso em: 10 Jan. 2020.

WOYANN, L. G.; MEIRA, D.; ZDZIARSKI, A. D. et al. Multiple-trait selection of soybean for biodiesel production in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 140, p. 111721, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111721>. Acesso em: 10 Nov. 2019.

WRICKE, G.; WEBER, E. **Quantitative genetics and selection in plant breeding**. Walter de Gruyter, Nova Iorque, 1986. Disponível em: <https://worldveg.tind.io/record/3460/>. Acesso em: 02 Nov. 2019.

YU, X.; JAMES, A. T.; et al. A comparative proteomic study of drought-tolerant and drought-sensitive soybean seedlings under drought stress. **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 5, p. 528-540, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP15314>. Acesso em: 11 Nov. 2019.

CONCLUSÃO GERAL

Com base nos objetivos definidos nesse trabalho, buscando selecionar genótipos de soja tolerantes ao deficit hídrico, conclui-se que existe variabilidade genética entre os grupos de genótipos estudados.

O capítulo 1, permitiu compreender o comportamento das características estudadas em relação ao ambiente e, identificar características relevantes, relacionadas ao rendimento de grãos. Além disso, possibilitou selecionar genótipos com bom desempenho nas condições de controle e deficit hídrico e, somente na condição específica de deficit hídrico, via índice de seleção.

No segundo capítulo, a seleção por meio do índice FAI-BLUP, em conjunto com a média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG), permitiu selecionar genótipos mais adaptáveis, estáveis e produtivos em cada grupo de genótipo estudado. Com as informações das predições de ganhos genéticos, torna-se possível definir estratégias eficazes em programas de melhoramento, para aumento desse ganho e da variabilidade, visando o desenvolvimento de cultivares tolerantes ao deficit hídrico.

Os índices utilizados nos capítulos desenvolvidos, apresentaram diferentes metodologias para seleção de genótipos tolerantes ao deficit hídrico. Os dez genótipos selecionados pela metodologia do índice FAI-BLUP em ambos grupos de genótipos, sete de cada grupo, coincidiram com a seleção do capítulo 1.

Logo, as informações contidas em ambos os estudos, foram complementares para obtenção de resultados favoráveis a seleção de genótipos, que podem ser inseridos no programa de melhoramento genético da soja como fonte de germoplasma para desenvolvimento de cultivares tolerantes ao deficit hídrico para regiões produtoras que apresentam veranicos.