

Índices de seleção para identificar cultivares de soja tolerantes à seca
Selection indices to identify drought-tolerant soybean cultivars
Índices de selección para identificar cultivares de soja tolerantes a la sequía

Recebido: 20/04/2020 | Revisado: 22/04/2020 | Aceito: 05/05/2020 | Publicado: 12/05/2020

Rogério do Carmo Cabral

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-9030>

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil

E-mail: rogeriocarmocabral@gmail.com

Simone Cândido Ensinas Maekawa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2919-4879>

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil

E-mail: simone-ensinas@uems.br

Alan Mario Zuffo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9704-5325>

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

E-mail: alan_zuffo@hotmail.com

Fábio Steiner

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9091-1737>

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil

E-mail: steiner@uems.br

Resumo

A ocorrência de deficiência hídrica é um dos estresses ambientais que mais limitam a produtividade da cultura da soja. Estudos que buscam identificar cultivares de soja com maior tolerância à seca são importantes para a produção agrícola. Este estudo foi realizado com a propósito de avaliar a resposta de 22 cultivares de soja cultivados em condições ambientais adversas (sistema irrigado e sequeiro), visando determinar os melhores índices de seleção para identificar os cultivares de soja tolerantes à seca. Foram conduzidos dois experimentos em condições de campo no município de Cassilândia (MS) durante a safra de 2018/2019, um em condições de sequeiro com ocorrência de restrição hídrica e outro em sistema de irrigação

com pivô central. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos casualizados, em esquema fatorial 2×22 com três repetições. Os tratamentos foram constituídos por duas condições de cultivo (sistema irrigado e sequeiro) e por 22 cultivares de soja. A partir dos dados da produtividade de grãos nos sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, foram estimados 12 índices de tolerância à seca. A identificação dos cultivares de soja tolerantes e/ou suscetíveis à restrição hídrica foi realizada utilizando-se diferentes métodos de análises multivariadas (método do ranqueamento, análise de agrupamentos hierárquico e análise de componentes principais). Os cultivares de soja 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO e RK 8115 IPRO foram classificados com maior tolerância à seca, e por isso são os cultivares mais indicados para serem cultivadas em regiões do Cerrado com ocorrência de restrição hídrica. Por outro lado, os cultivares TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO foram classificados com maior susceptibilidade à restrição hídrica, e não devem ser recomendados para o cultivo na região de Cassilândia (MS) em condições de sequeiro em época com alta probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica. Os índices de tolerância MP, STI, GMP e HM foram os mais indicados para identificar os cultivares de soja com maior tolerância à seca e com alto potencial de rendimento de grãos em sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro na região de Cassilândia, Estado de Mato Grosso do Sul.

Palavras-chave: Deficiência hídrica; Estresse abiótico; Índices de tolerância à seca.

Abstract

The occurrence of water restriction is one of the environmental stresses that most limit soybean grain yield. Studies that seek to identify soybean cultivars with greater drought tolerance are important for agricultural production. This study was carried out with the purpose of evaluating the response of 22 soybean cultivars grown under adverse environmental conditions (irrigated and rainfed system), aiming to determine the best selection indexes to identify drought-tolerant soybean cultivars. Two experiments were carried out under field conditions in the municipality of Cassilândia (MS) during the 2018/2019 growing season, one in rainfed conditions with water restriction and the other in an irrigation system with central pivot. A randomized block design was used, in a 2×22 factorial scheme with three replications. The treatments consisted of two cultivation conditions (irrigated and rainfed system) and 22 soybean cultivars. From the data of grain yield in irrigated and rainfed systems, 12 drought tolerance indexes were estimated. The identification of soybean cultivars tolerant and/or susceptible to water restriction was carried out using different multivariate analysis methods (ranking method, hierarchical cluster analysis and

principal component analysis). The 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO and RK 8115 IPRO cultivars were classified as having greater drought tolerance, and are therefore the most suitable cultivars to be cultivated in Cerrado regions with water restriction. On the other hand, the TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO cultivars were classified as more susceptible to water restriction, and should not be recommended for cultivation in the region of Cassilândia (MS) under rainfed conditions in season with high probability occurrence of water deficiency. The indices of tolerance MP, STI, GMP and HM were the most indicated to identify soybean cultivars with greater tolerance to drought and with high grain yield potential in irrigated and rainfed systems in the region of Cassilândia, State of Mato Grosso do Sul.

Keywords: Water restriction; Abiotic stress; Drought tolerance indices.

Resumen

La restricción de agua es uno de los estreses ambientales que más limitan la productividad de la soja. Los estudios que buscan identificar cultivares de soja con mayor tolerancia a la sequía son importantes para la producción agrícola. Este estudio se realizó con el propósito de evaluar la respuesta de 22 cultivares de soja cultivados en condiciones ambientales adversas (sistema de riego y de secano), con el objetivo de determinar los mejores índices de selección para identificar los cultivares de soja tolerantes a la sequía. Se llevaron a cabo dos experimentos en condiciones de campo en el municipio de Cassilândia (MS) durante la cosecha 2018/2019, uno en condiciones de secano con deficiencia de agua y el otro en un sistema de riego con pivote central. Se utilizó un diseño de bloques al azar, en un esquema factorial 2×22 con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en dos condiciones de cultivo (sistema de riego y de secano) y 22 cultivares de soja. A partir de los datos de rendimiento de grano en sistemas de riego y de secano, se estimaron 12 índices de tolerancia a la sequía. La identificación de cultivares de soja tolerantes y/o susceptibles a la restricción de agua se llevó a cabo utilizando diferentes métodos de análisis multivariados (método de clasificación, análisis de agrupamiento jerárquico y análisis de componentes principales). Los cultivares de soja 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO y RK 8115 IPRO se clasificaron por tener mayor tolerancia a la sequía y, por lo tanto, son los cultivares más adecuados para ser cultivados en las regiones de Cerrado con restricción de agua. Por otro lado, los cultivares TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO se clasificaron como más susceptibles a la restricción de agua, y no deberían recomendarse para el cultivo en la región de Cassilândia (MS) en condiciones de secano en temporada de alta probabilidad de ocurrencia de deficiencia de agua. Los índices de tolerancia MP, STI, GMP y HM fueron los más indicados para

identificar cultivares de soja com maior tolerância a la sequía y con alto potencial de rendimiento de grano en sistemas de riego y de secano en la región de Cassilândia, Estado de Mato. Grosso do Sul.

Palabras clave: Deficiencia de agua; Estrés abiótico; Índices de tolerancia a la sequía.

1. Introdução

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas de maior importância socioeconômica para o agronegócio mundial. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de soja do mundo, na safra 2019/2020 a cultura ocupou uma área de 36,85 milhões de hectares, com uma produção de 121,1 milhões de toneladas, o que representou uma produtividade média de 3.313 kg ha⁻¹ (Conab, 2020). Atualmente, a região do Cerrado é a maior produtora de soja do país, representando cerca de 60% da produção nacional (Dickie et al., 2016). A produção de soja nesta região certamente continuará a ser um importante impulsionador do crescimento econômico agrícola do Brasil nos próximos anos.

Apesar desse cenário favorável para o cultivo de soja na região Centro-Oeste do Brasil, a ocorrência de adversidades climáticas ainda é um fator de risco e de insucesso para o cultivo desta cultura. Dentre estas adversidades climáticas, a ocorrência de deficiência hídrica é apontada como o principal fator que limita o desenvolvimento e a produtividade de grãos da cultura (Mertz-Henning et al., 2018). Portanto, estudos que visam identificar cultivares de soja com maior tolerância à seca são de importantes para impulsionar a produção agrícola em regiões com ocorrência de deficiência hídrica.

A restrição hídrica afeta diversos processos bioquímicos, fisiológicos e morfológicos nas plantas, e as respostas das plantas de soja à deficiência hídrica dependem do genótipo, do estágio de desenvolvimento da planta, da severidade e da duração da restrição hídrica, dentre outros fatores ambientais (Kron et al., 2008; Catuchi et al. 2012; Zoz et al., 2013). Plantas expostas às condições de restrição hídrica possuem redução da condutância estomática, da taxa de transpiração, da área foliar, da taxa fotossintética, redução da taxa de crescimento relativo e aumento da taxa da abscisão de folhas e flores (Kron et al., 2008; Fioreze et al., 2011; Vieira et al., 2017; Silva et al., 2019), além, de modificações na atividade das enzimas do metabolismo do nitrogênio e carbono e mudanças nos níveis de antioxidantes (Mantovani et al., 2015). Algumas destas respostas fazem parte de estratégias que visam reduzir os efeitos negativos da restrição hídrica, constituindo, portanto, mecanismos de tolerância à seca.

As principais características para tolerância à seca em cultivares de soja estão

relacionadas à eficiência do uso da água pelas plantas, à redução na área foliar, à capacidade das células realizar o ajuste osmótico e à capacidade das raízes em explorar camadas mais profundas do solo (Kron et al., 2008; Fioreze et al., 2011; Basu et al., 2016). Bahrami-Radb e Hajiboland (2017) reportaram que sob condições de restrição hídrica, o ajustamento osmótico tem implicação direta na manutenção da condutância estomática, do conteúdo de água das folhas, da taxa fotossintética, conseqüentemente, na taxa de crescimento das plantas. Diferenças genéticas na tolerância à seca em condições de casa de vegetação têm sido relatadas em cultivares brasileiras de soja (Zoz et al., 2013), o que pode ser útil na identificação de genótipos mais adaptados as condições ambientais adversas. No entanto, a identificação de genótipos tolerantes à seca não é uma tarefa fácil devido ao fato de ocorrer fortes interações entre genótipos e ambiente, além do conhecimento restrito a respeito da função e do papel dos mecanismos de tolerância (Naghavi et al., 2013).

O desempenho relativo da produção de grãos em condições ambientais ótimas com adequada disponibilidade de água ou em ambientes com restrição hídrica parece ser o ponto de partida para a identificação de genótipos desejáveis para o cultivo em condições de restrição hídrica (Mohammadi et al., 2010). Portanto, as principais condições que devem ser consideradas durante o processo de seleção e identificação de cultivares tolerantes e/ou suscetíveis à seca são o cultivo sob condições ótimas não estressantes (sistema irrigado, por exemplo) e sob condições de sequeiro com ocorrência de restrição hídrica (Naghavi et al., 2013; Menezes et al., 2014).

Diversos estudos têm proposto a utilização de diferentes métodos e/ou índices de seleção para avaliar as diferenças genéticas para a tolerância à seca. Alguns destes índices de seleção foram utilizados para avaliar as diferenças genéticas em genótipos de milho (Naghavi et al., 2013), sorgo (Menezes et al., 2014), trigo (Akçura et al., 2011; Farshadfar et al., 2013; El-Rawy e Hassan, 2014), girassol (Gholinezhad et al., 2014) e feijão (Sánchez-Reinoso et al., 2020). No entanto, estes estudos para a cultura da soja ainda são desconhecidos.

Esta pesquisa foi realizada com a finalidade de avaliar a resposta de 22 cultivares de soja cultivados em condições ambientais adversas (sistema irrigado e sequeiro), visando determinar os melhores índices de seleção para identificar os genótipos tolerantes à seca.

2. Material e Métodos

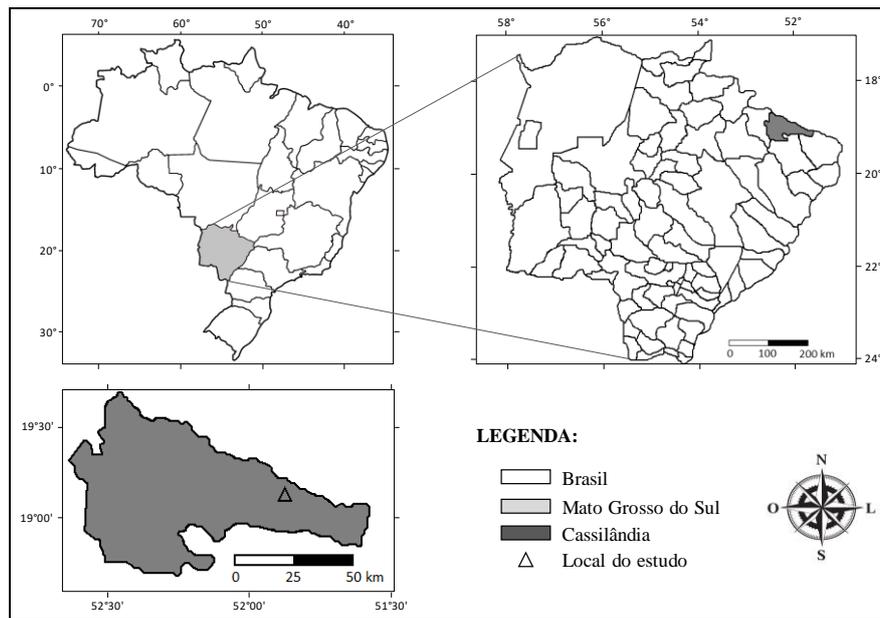
As pesquisas em campo são realizada em condições com menos controle das variáveis em relação às laboratoriais como afirma Pereira et al. (2018). Realiza-se uma pesquisa em campo nas condições seguintes.

Localização e Caracterização da Área Experimental

Dois experimentos de campo foram conduzidos durante a safra agrícola de 2018/2019 no município de Cassilândia, estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1). O primeiro experimento foi conduzido em condições de sequeiro na área experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS (19°05'45" S, 51°48'51" W, e altitude de 520 m). O segundo experimento foi conduzido em uma área irrigada com sistema de pivô central, localizada em uma propriedade particular próxima da Estação Experimental da UEMS/Cassilândia (19°05'16" S, 51°48'04" W, e altitude média de 470 m).

O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso (Aw), com verão chuvoso e inverno seco entre os meses de maio e setembro (precipitação no inverno menor que 60 mm), com precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.520 mm e 24,1 °C, respectivamente. Os dados de precipitação pluvial coletados durante a condução dos experimentos são mostrados na Figura 2.

Figura 1. Localização da área de estudo no município de Cassilândia, Estado de Mato Grosso do Sul.

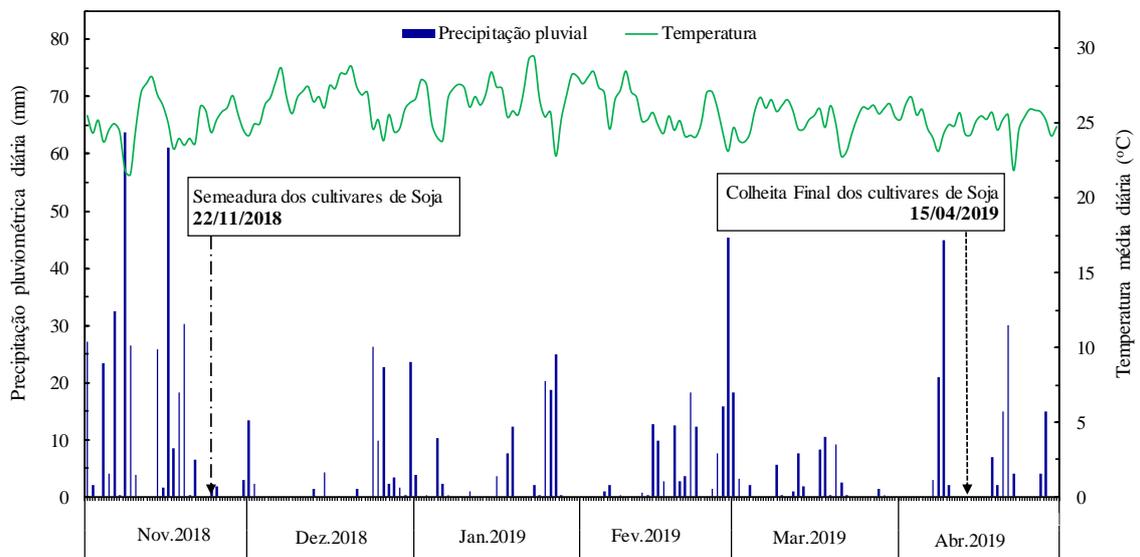


Fonte: arquivo dos autores.

Observa-se na Figura 1 que o município onde ocorrem os estudos está localizado mais a noroeste do Estado do Mato Grosso do Sul e faz divisa com o Estado de Goiás.

A precipitação total acumulada durante o cultivo das cultivares de soja na área de sequeiro foi de 520 mm, com precipitação pluviométrica mensal de 143, 108, 149 e 72 mm durante os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março (Figura 2).

Figura 2. Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média diária (°C) durante a condução dos experimentos de soja no município de Cassilândia, MS, Brasil.



Fonte: Autores.

O solo das duas áreas experimentais foram classificados como Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico (NQo), profundo, bem drenado e de textura arenosa (120 g kg⁻¹ de argila, 40 g kg⁻¹ de silte e 840 g kg⁻¹ de areia).

Antes da implantação dos experimentos, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,0–0,20 de profundidade, e as principais propriedades químicas dos solos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais propriedades químicas dos solos na camada de 0,0–0,20 m de profundidade antes da implantação dos experimentos.

Área	pH	P	MO	H + Al	Al	K	Ca	Mg	CTC	V
		mg dm ⁻³	g dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----			-----			%
Sequeiro	5,5	12,3	19,0	2,10	0,00	0,15	2,50	1,10	5,6	64
Irigada	5,2	10,7	14,4	2,30	0,00	0,12	2,10	0,90	5,4	57

pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. Extrator de P Mehlich-1.
Fonte: Autores.

Na Tabela observam-se as características do pH e outras para os solo sequeiro e irrigada ambas ligeiramente ácidas. O pH da sequeiro mostra-se maior.

Delineamento Experimental e Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 × 22 com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por duas condições de cultivo (sequeiro e irrigado) e por 22 cultivares de soja. O manejo da irrigação na área experimental com sistema de pivô central foi realizado com a aplicação de uma lâmina de irrigação diária de 15 mm, a qual foi aplicada todos os dias que não houve a ocorrência de precipitação pluvial. As sementes dos 22 cultivares de soja foram adquiridas diretamente das empresas detentoras do seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). As principais características agrônômicas das cultivares de soja são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características agrônômicas das 22 cultivares de soja utilizadas no estudo.

Nº	Cultivar	Empresa	Características Agrônômicas		
			Ciclo ¹	GMR	Tipo crescimento
1	TMG 2383 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	120	8,3	Semideterminado
2	TMG 2381 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	120	8,1	Indeterminado
3	TMG 2378 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	125	7,8	Semideterminado
4	TMG 7067 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	112	7,2	Semideterminado
5	TMG 7063 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	110	7,0	Indeterminado
6	TMG 2165 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	112	6,5	Indeterminado
7	TMG 7061 IPRO	Tropical Melhoramento & Genética	110	6,1	Indeterminado
8	97R50 IPRO	DuPont Pionner®	115	7,5	Indeterminado
9	98R31 IPRO	DuPont Pionner®	130	8,3	Indeterminado
10	98R35 IPRO	DuPont Pionner®	130	8,3	Indeterminado
11	HO Cristalino IPRO	HO Genética	125	8,3	Indeterminado
12	HO Maracaí IPRO	HO Genética	120	7,7	Indeterminado
13	HO Paranaíba IPRO	HO Genética	115	7,4	Indeterminado
14	BMX Foco IPRO	BRASMAX® Genética	110	7,2	Indeterminado
15	BMX Bônus IPRO	BRASMAX® Genética	120	7,9	Indeterminado
16	ST 777 IPRO	SoyTech®	108	7,7	Indeterminado
17	ST 797 IPRO	SoyTech®	110	7,9	Indeterminado
18	RK 8115 IPRO	Riber KWS® Sementes	120	8,1	Indeterminado
19	RK 6719 IPRO	Riber KWS® Sementes	105	6,7	Indeterminado
20	RK 7518 IPRO	Riber KWS® Sementes	112	7,5	Indeterminado
21	RK 8317 IPRO	Riber KWS® Sementes	125	8,3	Indeterminado
22	M 5917 IPRO	Monsoy®	95	5,9	Indeterminado

¹ Ciclo médio em dias da emergência ao ponto de colheita. GMR: Grupo de maturidade relativa.

Fonte: Autores.

Observa-se na Tabela 2 que cada unidade experimental foi constituída de 5,0 m de comprimento por 2,25 m de largura (5 linhas de semeadura com espaçamento de 0,45 m). Para as avaliações da produtividade de grãos foram consideradas as três linhas centrais desprezando-se 1,0 m das extremidades de cada fileira de plantas, totalizando , uma área útil de 4,05 m² (3,0 × 1,35 m).

Implantação e Condução dos Experimentos

O preparo de solo foi realizado mediante uma gradagem pesada seguida de gradagem leve, deixando o terreno nivelado, apto ao cultivo da soja e livre de plantas daninhas. A semeadura dos cultivares de soja foi realizada no dia 22/11/2018, em espaçamento entrelinhas de 0,45 m. A densidade de semeadura foi definida com base nas recomendações técnicas para cada uma das cultivares.

Sementes de soja previamente tratadas com piraclostrobina + tiofanato metílico + fipronil (Standak Top®) na dose de 2 mL p.c. kg⁻¹ de semente foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando-se inoculante comercial líquido Simbiose Nod Soja® (Simbiose: Agrotecnologia Biológica) contendo as estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080 5080 (concentração mínima de 7,2 x 10⁹ unidades formadoras de colônias por mL), na dose de 3 mL p.c. kg⁻¹ de semente. A adubação de semeadura foi realizada com aplicação de 600 kg ha⁻¹

¹ da formulação de fertilizante NPK 04-22-09 no sulco de semeadura. Adubação de cobertura foi realizada, aos 30 e 50 dias após a emergência das plantas, com a aplicação de 200 kg ha⁻¹ da formulação de fertilizante NPK 20-00-20.

Durante o desenvolvimento dos cultivares de soja, o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças foi realizado de acordo com a necessidade da cultura e recomendações técnicas (Embrapa, 2011), utilizando-se os seguintes produtos: glifosato, piraclostrobina + epoxiconazol, azoxistrobina + ciproconazol, teflubenzurom, clorpirifós e cipermetrina.

Produtividade e Cálculo dos Índices de Tolerância à Seca

A colheita dos cultivares de soja foi realizada manualmente quando as plantas estavam no estágio de desenvolvimento R8 (95% das vagens maduras).

Todas as plantas contidas nos 3,0 m de comprimento das três linhas centrais de cada parcela foram colhidas, colocadas à sombra para secagem por 5 dias, e então trilhadas mecanicamente. A produtividade de grãos foi convertida para kg ha⁻¹, corrigindo-se para 13% de umidade (base umidade).

A partir dos dados da produtividade de grãos, registrados para cada cultivar, em cada ambiente de produção, foram calculados os índices de tolerância à seca (Tabela 3).

Tabela 3. Índices de tolerância à seca para avaliar a resposta da produtividade de grãos dos 22 cultivares de soja cultivados em condições ambientais adversas (sistema sequeiro e irrigado).

Índice de tolerância à seca	Abreviação e Equação [†]	Referência
1. Índice de tolerância	$TOL = Y_P - Y_S$	Rosielle & Hamblin (1981)
2. Produtividade média	$MP = (Y_S + Y_P)/2$	Rosielle & Hamblin (1981)
3. Índice de estabilidade de rendimento	$YSI = Y_S/Y_P$	Bousslama & Schapaugh (1984)
4. Índice de resistência à seca	$DI = [Y_S \times (Y_S/Y_P)] / \bar{Y}_S$	Blum (1988)
5. Índice de tolerância de estresse	$STI = (Y_S \times Y_P) / (\bar{Y}_P)^2$	Fernández (1992)
6. Produtividade média geométrica	$GMP = \sqrt{Y_S \times Y_P}$	Fernández (1992)
7. Índice de rendimento	$YI = Y_S/\bar{Y}_S$	Gavuzzi et al. (1997)
8. Tolerância de estresse modificado (k_1)	$k_1STI = Y_P^2 / \bar{Y}_P^2$	Farshadfar & Sutka (2002)
9. Tolerância de estresse modificado (k_2)	$k_2STI = Y_S^2 / \bar{Y}_S^2$	Farshadfar & Sutka (2002)
10. Percentual de suscetibilidade ao estresse	$SSPI = [Y_P - Y_S/2 \times \bar{Y}_P] \times 100$	Moosavi et al. (2008)
11. Índice de tolerância abiótica	$ATI = [(Y_P - Y_S) / (\bar{Y}_P/\bar{Y}_S)] \times \sqrt{Y_P \times Y_S}$	Moosavi et al. (2008)
12. Média harmônica	$HM = [2 \times (Y_S \times Y_P)] / (Y_S + Y_P)$	Jafari et al. (2009)

[†] Nas equações acima, Y_S , Y_P , representam a produtividade de grãos de soja sob condições de restrição hídrica (cultivo em sequeiro) e sob condições de adequada disponibilidade de água (cultivo em sistema irrigado) para cada cultivar, respectivamente, enquanto \bar{Y}_S e \bar{Y}_P representam a produtividade média de grãos sob condições de restrição hídrica (cultivo em sequeiro) e sob condições de adequada disponibilidade de água (cultivo sob sistema irrigado) de todos os cultivares de soja, respectivamente. Fonte: Autores.

Os diferentes índices de tolerância à seca utilizados neste estudo são mostrados na Tabela 3. Neste estudo, foram utilizados 12 índices de tolerância à seca propostos por diversos pesquisadores foram utilizados para avaliar a resposta de produtividade de grãos dos 22 cultivares de soja, cultivados em condições ambientais ótimas (sistema irrigado por pivô central) e em condições de restrição hídrica (sistema de sequeiro).

Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade, com o objetivo de discriminar os cultivares de soja dentro dos ambientes de produção adversos (sistema irrigado e de sequeiro) e entre os ambientes pelos índices de tolerância à seca. As análises foram realizadas utilizando-se o software Sisvar versão 5.6 para Windows (Ferreira, 2014).

Análise de correlação linear de Pearson foram realizadas entre os diferentes índices de tolerância à seca e a produtividade de grãos de soja nos distintos ambientes de produção. A identificação dos cultivares tolerantes e/ou suscetíveis à restrição hídrica foi realizada com base em todos os índices de tolerância à seca, por meio do três métodos de análise multivariada (método do ranqueamento, método de agrupamentos hierárquico e análise de componentes principais).

O método do ranqueamento foi utilizado como proposto por Farshadfar et al. (2012), com modificações. Neste método, uma cultivar com o maior valor para cada um dos índices de tolerância YP, YS, MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, ATI e HM recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que para o cultivar com o menor valor para o índice de tolerância TOL foi atribuído uma pontuação de classificação igual a 1. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DPR) para todos os índices de tolerância à seca dos 22 cultivares de soja em condições irrigada ou de sequeiro. A discriminação dos cultivares de soja quanto ao nível de tolerância à seca foi realizada com base na pontuação média do ranqueamento de cada cultivar, considerando-se o valor do quartil que divide as 22 posições possíveis do ranqueamento em quatro partes iguais. Portanto, uma cultivar com pontuação média do ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (<6,25 pontos) é classificada como tolerante (T) à seca; uma cultivar com pontuação média entre o valor do primeiro e segundo quartil (6,25 a 11,50 pontos) é classificada como moderadamente tolerante (MT) à seca; uma cultivar com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo e terceiro quartil (11,51 a 16,75 pontos) é

classificada como moderadamente suscetível (MS) à seca; e, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis (S) à seca é representado pelos cultivares com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil ($>16,75$ pontos).

A análise multivariada pelo método de agrupamento hierárquico foi realizada com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, para classificar os 22 cultivares de soja em diferentes níveis de tolerância à seca (cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e cultivares suscetíveis). Análise de componentes principais (ACP) com base na matriz de correlação dos índices de tolerância à seca e análise Biplot foram realizadas utilizando-se o software estatístico Action Stat Pro® versão 3.6 para Windows.

3. Resultados e Discussão

Produtividade de grãos e Índices de tolerância à seca

A produtividade de grãos no sistema irrigado (Y_P) permitiu separar os cultivares de soja em sete grupos; os cultivares RK 8317 IPRO e 98R35 IPRO representaram os dois grupos com maior produtividade de grãos, e as cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO representaram o grupo com menor produtividade de grãos (Tabela 4). Em condições de sequeiro com restrição hídrica, a produtividade de grãos (Y_S) permitiu classificar os cultivares de soja em seis grupos, na qual os cultivares RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO, 98R35 IPRO e TMG 2381 IPRO foram enquadrados nos dois grupos de maior produtividade de grãos, ao passo que o grupo de menor produtividade de grãos foi representado pelos cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO (Tabela 4).

A produtividade média de grãos no sistema irrigado foi de 2.620 kg ha^{-1} , e em condições de sequeiro foi de 1.150 kg ha^{-1} , o que representa uma perda de produtividade de aproximadamente 56% (Tabela 3). A produtividade média de grãos obtido no sistema irrigado com pivô central foi menor a produtividade média de grãos de soja 2.960 kg ha^{-1} , registrado para o estado de Mato Grosso do Sul na safra 2018/2019 (Conab, 2019). Dos 22 cultivares de soja testados no município de Cassilândia (MS), apenas sete cultivares tiveram produtividade de grãos superior à produtividade média do estado do Mato Grosso do Sul para a safra de 2018/2019. Portanto, com base no exposto, verifica-se que os cultivares TMG 2378 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO, ST 797 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO

são os materiais genéticos mais adaptados as condições edafoclimáticas do município de Cassilândia (MS). Cabe ressaltar que devido à estiagem e excesso de temperatura durante as fases vegetativa e durante a floração e enchimento de grãos, entre os meses de dezembro de 2018 e janeiro de 2019 (Figura 2), a produtividade de grãos de todas os cultivares de soja no sistema de sequeiro foi inferior ao rendimento médio da cultura na safra 2018/2019 para o estado de Mato Grosso do Sul.

Tabela 4. Produtividade de grãos e índices de tolerância à seca para os 22 cultivares de soja em condições ótimas sob irrigação por pivô central e em condições de sequeiro com ocorrência de deficiência hídrica durante a safra 2018/2019, no município de Cassilândia, MS.

Cultivar	Y _P (kg/ha)	Y _S (kg/ha)	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k ₁ STI	k ₂ STI	SSPI	ATI	HM
TMG 2383 IPRO	2240f	1423c	817b	1832f	0,64b	0,79b	0,47e	1785e	1,24c	0,73e	1,54c	15,6h	642910f	1740c
TMG 2381 IPRO	2500e	1683b	817b	2092e	0,67a	0,99a	0,62d	2051d	1,46b	0,91e	2,16b	15,6h	733731f	2011b
TMG 2378 IPRO	3.487c	1123d	2363g	2305d	0,32g	0,32f	0,57d	1979d	0,98d	1,77c	0,96e	45,1c	2055328d	1699c
TMG 7067 IPRO	1220g	737f	483a	978h	0,60b	0,39e	0,13g	948g	0,64f	0,22f	0,41f	9,2i	200816g	918f
TMG 7063 IPRO	1883f	1177d	707b	1530g	0,63b	0,64c	0,32f	1488f	1,02d	0,52f	1,05d	13,5h	463025g	1447d
TMG 2165 IPRO	2277f	1300c	977c	1788f	0,57c	0,65c	0,43e	1720e	1,13c	0,76e	1,29d	18,6g	741840f	1655c
TMG 7061 IPRO	1487g	733f	753b	1110h	0,49d	0,32f	0,16g	1044g	0,64f	0,32f	0,41f	14,4h	345104g	982f
97R50 IPRO	1560g	740f	820b	1150h	0,47e	0,31f	0,17g	1074g	0,64f	0,36f	0,42f	15,6h	388141g	1004f
98R31 IPRO	3537c	1417c	2120f	2477d	0,40f	0,49d	0,73c	2238c	1,23c	1,82c	1,52c	40,5d	2083048d	2023b
98R35 IPRO	4237b	1693b	2543g	2965b	0,40f	0,59c	1,05b	2678b	1,47b	2,62b	2,18b	48,5c	2996440b	2419a
HO Cristalino IPRO	2833d	1070d	1763e	1952f	0,38f	0,35e	0,44e	1741e	0,93d	1,18d	0,87e	33,7e	1354237e	1553c
HO Maracá IPRO	2197f	853f	1343d	1525g	0,39f	0,29f	0,27f	1369f	0,74f	0,70e	0,55f	25,6f	807998f	1229e
HO Paranaíba IPRO	2153f	973e	1180d	1563g	0,45e	0,38e	0,31f	1448f	0,85e	0,68e	0,72e	22,5f	751089f	1340d
BMX Foco IPRO	2907d	900e	2007f	1903f	0,31g	0,24f	0,38e	1617e	0,78e	1,24d	0,62f	38,3d	1430068e	1374d
BMX Bônus IPRO	2637e	983e	1653e	1810f	0,37f	0,32f	0,38e	1610e	0,86e	1,02d	0,73e	31,6e	1171278e	1432d
ST 777 IPRO	3403c	990e	2413g	2197e	0,29g	0,25f	0,49e	1835e	0,86e	1,69c	0,74e	46,1c	1951363d	1534c
ST 797 IPRO	3773c	1020e	2753h	2397d	0,27g	0,24f	0,56d	1962d	0,89e	2,08c	0,79e	52,6b	2377613c	1606c
RK 8115 IPRO	3590c	1880a	1710e	2735c	0,52d	0,86b	0,98b	2598b	1,63a	1,88c	2,68a	32,6e	1949428d	2467a
RK 6719 IPRO	1547g	667f	880b	1107h	0,43e	0,25f	0,15g	1015g	0,58f	0,35f	0,34f	16,8h	393709g	932f
RK 7518 IPRO	2077f	1430c	647a	1753f	0,69a	0,86b	0,43e	1723e	1,24c	0,63e	1,55c	12,3i	494134g	1692c
RK 8317 IPRO	4770a	1827a	2943i	3298a	0,38f	0,61c	1,27a	2952a	1,59a	3,32a	2,53a	56,2a	3818061a	2641a
M 5917 IPRO	1320g	680f	640a	1000h	0,51d	0,31f	0,13g	947g	0,59f	0,26f	0,36f	12,2i	266035g	896f
Média	2620	1150	1470	1885	0,46	0,47	0,48	1719	1,00	1,14	1,11	28,0	1246154	1572
CV (%)	6,82	8,87	7,28	7,18	5,37	12,90	16,76	7,57	8,87	14,78	19,98	7,28	14,88	8,02

Para abreviação dos índices de tolerância à seca, ver Tabela 3. CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autores.

O índice de tolerância (TOL) permitiu separar as cultivares em nove grupos distintos, sendo que o grupo com o melhor índice foi representado pelos cultivares TMG 7067 IPRO, RK 7518 IPRO e M 5917 IPRO, e o cultivar RK 8317 IPRO foi classificado no grupo de pior índice TOL (Tabela 4). Já o índice de tolerância à seca da produtividade média (MP) permitiu classificar os cultivares de soja em oito grupos; as cultivares 98R50 e RK 8317 IPRO representaram os dois grupos com os maiores índices MP, ao passo que o grupo de o menor índice MP foi representado pelas cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO (Tabela 4).

O índice de estabilidade do rendimento (YSI), permitiu separar os cultivares de soja em sete grupos; os cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 2381 IPRO, TMG 7067 IPRO, TMG

7063 IPRO e RK 7518 IPRO foram classificados nos dois grupos com os maiores índices YSI, e os cultivares TMG 2378 IPRO, BMX Foco IPRO, ST 777 IPRO e ST 797 IPRO foram classificadas no grupo de o menor índice YSI. O índice de resistência à seca (DI) permitiu enquadrar os cultivares de soja em seis grupos, no qual os cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 2381 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 7518 IPRO foram classificados nos dois grupos com os maiores índices DI, enquanto que o grupo com menor índice DI foi representado pelos cultivares TMG 2378 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, BMX Foco IPRO, BMX Bônus IPRO, ST 777 IPRO, ST 797 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO (Tabela 4).

O índice de tolerância de estresse (STI) e a produtividade média geométrica (GMP) permitiram classificar os cultivares de soja em sete grupos distintos, sendo que os dois grupos com os maiores índices STI e GMP foram representados pelos cultivares 98R35 IPRO, RK8115 IPRO e RK 8317 IPRO, ao passo que o grupo com os menores índices STI e GMP foram representado pelos cultivares de soja TMG 7067 IPRO, TMG7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO. O índice de rendimento (YI) permitiu classificar os cultivares de soja em seis grupos; os dois grupos com os maiores índices YI foram representados pelos cultivares TMG 2381 IPRO, 98R35 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO, ao passo que o grupo de menor índice YI foi representado pelos cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO (Tabela 4).

O índice de tolerância de estresse modificado k_1 (k_1 STI), permitiu classificar os cultivares de soja em seis grupos; os dois grupos com os maiores índices k_1 STI foram representados pelos cultivares 98R50 IPRO e RK 8317 IPRO, e os cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO foram classificados no grupo com menor índice k_1 STI. O índice de tolerância de estresse modificado k_2 (k_2 STI), permitiu classificar as cultivares de soja em seis grupos, sendo que os dois grupos com os maiores índices k_2 STI foram representados pelos cultivares TMG 2381 IPRO, 98R50 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO, ao passo que o grupo com menor índice k_2 STI foi representado pelos cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, BMX Foco IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO (Tabela 4).

O índice do porcentual de suscetibilidade ao estresse (SSPI), permitiu enquadrar os cultivares de soja em nove grupos distintos, sendo que os dois grupos com os maiores índices SSPI foram representados pelos cultivares ST 797 IPRO e RK 8317 IPRO, e os cultivares TMG 7067 IPRO, RK 7518 IPRO e M 5917 IPRO foram classificados no grupo de menor índice SSPI. O índice de tolerância abiótica (ATI) permitiu enquadrar os cultivares de soja em

sete grupos, nos quais os cultivares 98R50 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificados nos dois grupos com os maiores índices ATI, enquanto que o grupo com o menor índice ATI foi representado pelos cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO, RK 7518 IPRO e M 5917 IPRO. O índice de tolerância baseado na média harmônica (HM) permitiu separar os cultivares de soja em seis grupos, sendo que os cultivares TMG 2381 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram agrupados nos dois grupos com os maiores índices HM, e os cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO foram agrupados no grupo com menor índice HM (Tabela 4).

Os índices HM, YI, DI, k_1 STI e k_2 STI permitiram separar as cultivares de soja em seis grupos, ao passo que os índices STI, GMP, YSI e ATI permitiram classificar as cultivares em sete grupos distintos. Estes resultados indicam que estes índices de tolerância à seca foram menos sensíveis para diferenciar os cultivares de soja quanto a tolerância à seca. Por sua vez, o índice MP permitiu classificar os cultivares de soja em oito grupos, e os índices TOL e SSPI permitiram separar os cultivares em nove grupos (Tabela 4). Estes resultados indicam que estes índices de tolerância são os mais sensíveis para identificar e diferenciar os cultivares de soja quanto a tolerância à seca. Menezes et al. (2014) avaliando oito índices de tolerância à seca, reportaram que os índices TOL e YSI não foram adequados para diferenciar os genótipos de sorgo granífero tolerantes à seca. Em outro estudo, Naghavi et al. (2013) verificaram que os índices STI, YI, SSPI, k_1 STI e k_2 STI foram os mais adequados, e podem ser utilizados para identificar os cultivares de milho tolerantes à seca.

Análise de Correlação

O coeficiente de correlação linear de Pearson foi utilizado para determinar os índices de tolerância à seca mais desejáveis em condições ambientais ótimas e em condições com restrição hídrica. A análise de correlação reportou associação positiva entre os índices de tolerância à seca e a produtividade de grãos em condições irrigadas (Y_P) e de sequeiro (Y_S) (Tabela 5). Os maiores valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson foram obtidos para os índices GMP ($r = 0,93$ para Y_P e $r = 0,90$ para Y_S), STI ($r = 0,91$ para Y_P e $r = 0,89$ para Y_S), MP ($r = 0,97$ para Y_P e $r = 0,82$ para Y_S), HM ($r = 0,85$ para Y_P e $r = 0,96$ para Y_S), YI ($r = 0,67$ para Y_P e $r = 1,00$ para Y_S), k_1 STI ($r = 0,98$ para Y_P e $r = 0,66$ para Y_S) e k_2 STI ($r = 0,65$ para Y_P e $r = 0,99$ para Y_S). Todos estes coeficientes de correlação foram significativos à 0,1%. Portanto, estes índices são os mais adequados para identificar os cultivares de soja

com maior potencial de rendimento de grãos, tanto em condições de restrição hídrica (sequeiro), como em condições de adequada disponibilidade de água (sistema irrigado).

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre a produtividade de grãos de soja sob condições ótimas em sistema irrigado (Y_P) e em condições de sequeiro com ocorrência de restrição hídrica (Y_S) e os índices de tolerância à seca durante a safra 2018/2019, em Cassilândia, MS.

	Y_P	Y_S	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k_1 STI	K_2 STI	SSPI	ATI
Y_S	0,67***												
TOL	0,93***	0,36 ^{NS}											
MP	0,97***	0,82***	0,83***										
YSI	-0,54**	0,24 ^{NS}	-0,80***	-0,35 ^{NS}									
DI	0,14 ^{NS}	0,82***	-0,22 ^{NS}	0,35 ^{NS}	0,74***								
STI	0,91***	0,89***	0,72***	0,97***	-0,19 ^{NS}	0,47*							
GMP	0,93***	0,90***	0,73***	0,99***	-0,20 ^{NS}	0,49*	0,98***						
YI	0,67***	1,00***	0,36 ^{NS}	0,82***	0,24 ^{NS}	0,82***	0,89***	0,90***					
k_1 STI	0,98***	0,66***	0,92***	0,96***	-0,52*	0,12 ^{NS}	0,92***	0,91***	0,66***				
K_2 STI	0,65**	0,99***	0,34 ^{NS}	0,80***	0,24 ^{NS}	0,81***	0,89***	0,89***	0,99***	0,66***			
SSPI	0,93***	0,36 ^{NS}	1,00***	0,83***	-0,80***	-0,22 ^{NS}	0,72***	0,73***	0,36 ^{NS}	0,92***	0,34 ^{NS}		
ATI	0,98***	0,59**	0,94***	0,93***	-0,59***	0,03 ^{NS}	0,89***	0,87***	0,59**	0,99***	0,59**	0,94***	
HM	0,85***	0,96***	0,60**	0,94***	-0,04 ^{NS}	0,62**	0,97***	0,98***	0,96***	0,84***	0,95***	0,60**	0,78***

Para abreviação dos índices de tolerância à seca, ver Tabela 2. *, ** e ***: significativo à 5%, 1% e 0,1%, respectivamente. ^{NS}: não significativo. Fonte: Autores.

Os índices TOL ($r = 0,93$ para Y_P e $r = 0,36$ para Y_S), SSPI ($r = 0,93$ para Y_P e $r = 0,36$ para Y_S) e ATI ($r = 0,98$ para Y_P e $r = 0,58$ para Y_S), também apresentaram altos valores de coeficientes de correlação com a produtividade de grãos no sistema irrigado (Y_P), e valores de coeficientes de correlação relativamente baixos para as condições de sequeiro com restrição hídrica (Y_S). Por sua vez, o índice DI ($r = 0,14$ para Y_P e $r = 0,82$ para Y_S) mostrou altos valores de coeficiente de correlação para as condições de sequeiro com restrição hídrica (Tabela 4). Os índices YSI, TOL, SSPI e ATI não são adequados para identificar os cultivares de soja com alto potencial de rendimento em condições de restrição hídrica (Tabela 12).

Os valores relativamente baixos dos coeficientes de correlação ($r = 0,67$; $p = 0,001$) entre (Y_P) e (Y_S), apontam que os cultivares que tiveram maior produtividade de grãos em condições irrigadas com adequada disponibilidade de água, não necessariamente foram os cultivares mais produtivos no sistema de sequeiro com restrição hídrica (Tabela 4). Estes resultados indicam a complexidade da seleção de genótipos de soja que são tolerantes à seca e, que possuem também, alto potencial produtivo em condições hídricas ótimas, de modo que, os genótipos em sua maioria, possuem respostas distintas às condições ambientais contrastantes. A seleção com base em uma combinação de índices pode ser mais útil para selecionar genótipos tolerantes à seca. No entanto, o coeficiente de correlação determina o grau de associação linear apenas entre duas características. Assim, torna-se necessário uma

abordagem melhor do que a análise de correlação, como os métodos de análise multivariada, para identificar genótipos superiores para os ambientes adversos.

Método do Ranqueamento

O ranqueamento dos 22 cultivares de soja a partir dos diferentes índices de tolerância à seca calculados com base na produtividade de grãos em sistema irrigado (Y_P) e sob condições de sequeiro com restrição hídrica (Y_S) são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Ranqueamento, pontuação média dos ranqueamentos (\bar{R}) e desvio padrão dos ranqueamentos (DP) para a produtividade de grãos (Y_P e Y_S) e os índices de tolerância à seca dos 22 cultivares de soja em condições ótimas (sistema irrigado) e sob restrição hídrica (sistema de sequeiro) durante a safra 2018/2019, no município de Cassilândia, MS.

Cultivar	Y_P	Y_S	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k_1 STI	k_2 STI	SSPI	ATI	HM	\bar{R} (\pm DP)	Nível de tolerância [†]
TMG 2383 IPRO	13	6	7	11	3	4	9	9	6	13	6	17	15	6	8,9 (\pm 3,5)	MT
TMG 2381 IPRO	11	4	6	8	2	1	5	5	4	11	4	16	14	5	6,9 (\pm 3,7)	MT
TMG 2378 IPRO	6	10	18	6	19	15	6	6	10	6	10	5	5	7	9,2 (\pm 3,8)	MT
TMG 7067 IPRO	22	19	1	22	5	10	22	21	19	22	19	22	22	21	17,6 (\pm 5,3)	S
TMG 7063 IPRO	17	9	4	16	4	6	15	15	9	17	9	19	17	13	12,1 (\pm 4,6)	MS
TMG 2165 IPRO	12	8	10	13	6	5	11	12	8	12	8	13	13	9	10,0 (\pm 2,3)	MT
TMG 7061 IPRO	20	20	5	19	9	14	19	19	20	20	20	18	20	19	17,3 (\pm 3,4)	S
97R50 IPRO	18	18	8	18	10	17	18	18	18	18	18	15	19	18	16,5 (\pm 2,4)	MS
98R31 IPRO	5	7	17	4	13	9	4	4	7	5	7	6	4	4	9,9 (\pm 2,7)	MT
98R35 IPRO	2	3	20	2	14	8	2	2	3	2	3	3	2	3	4,9 (\pm 3,9)	T
HO Cristalino IPRO	9	11	15	9	17	12	10	10	11	9	11	8	9	11	10,9 (\pm 1,7)	MT
HO Maracaí IPRO	14	17	12	17	15	18	17	17	17	14	17	11	11	17	15,3 (\pm 2,1)	MS
HO Paranaíba IPRO	15	15	11	15	11	11	16	16	15	15	15	12	12	16	13,9 (\pm 1,8)	MS
BMX Foco IPRO	8	16	16	10	20	21	13	13	16	8	16	7	8	15	13,4 (\pm 3,8)	MS
BMX Bônus IPRO	10	14	13	12	18	13	14	14	14	10	14	10	10	14	12,9 (\pm 1,8)	MS
ST 777 IPRO	7	13	19	7	21	19	8	8	13	7	13	4	6	12	11,2 (\pm 4,5)	MT
ST 797 IPRO	3	12	22	5	22	22	7	7	12	3	12	2	3	10	10,1 (\pm 5,8)	MT
RK 8115 IPRO	4	1	14	3	7	3	3	3	1	4	1	9	7	2	4,4 (\pm 2,8)	T
RK 6719 IPRO	19	22	9	20	12	20	20	20	22	19	22	14	18	20	18,4 (\pm 2,9)	S
RK 7518 IPRO	16	5	3	14	1	2	12	11	5	16	5	20	16	8	9,6 (\pm 5,4)	MT
RK 8317 IPRO	1	2	21	1	16	7	1	1	2	1	2	1	1	1	4,2 (\pm 4,6)	T
M 5917 IPRO	21	21	2	21	8	16	21	22	21	21	21	21	21	22	18,5 (\pm 4,2)	S

[†] T = refere-se a um cultivar de soja tolerante à seca, recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 6,25; MT = cultivar moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 6,26 a 11,50; MS = cultivar moderadamente suscetível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 11,51 a 16,75; S = cultivar de soja suscetível à seca com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 16,76 a 22. Fonte: Autores.

A discriminação do nível de tolerância, ou de susceptibilidade dos cultivares de soja à restrição hídrica com base em apenas um único critério ou índice de tolerância à seca pode ser contraditória (Tabela 6). Por exemplo, de acordo com o índice YSI os cultivares de soja RK 7518 IPRO, TMG 2381 IPRO e TMG 2383 IPRO foram considerados os mais tolerantes à seca, enquanto que de acordo com os índices MP, STI, GMP, YI, k_2 STI e HM os cultivares RK 8317 IPRO, 98R35 IPRO e RK 8115 IPRO foram considerados os mais tolerante à seca. Portanto, a diferenciação e a separação dos cultivares em diferentes níveis de tolerância à seca

deve ser realizada levando-se em consideração todos os índices de tolerância (Naghavi et al., 2013). Neste sentido, o método do ranqueamento tem sido utilizado para classificar os genótipos em distintos níveis de tolerância à seca (Farshadfar et al., 2012).

Considerando todos os índices de tolerância à seca, os cultivares de soja 98R35 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram enquadrados na melhor classificação média no método do ranqueamento, recebendo pontuações entre 4,2 e 4,9 (Tabela 6) e, portanto, estes cultivares foram classificados como tolerantes à seca.

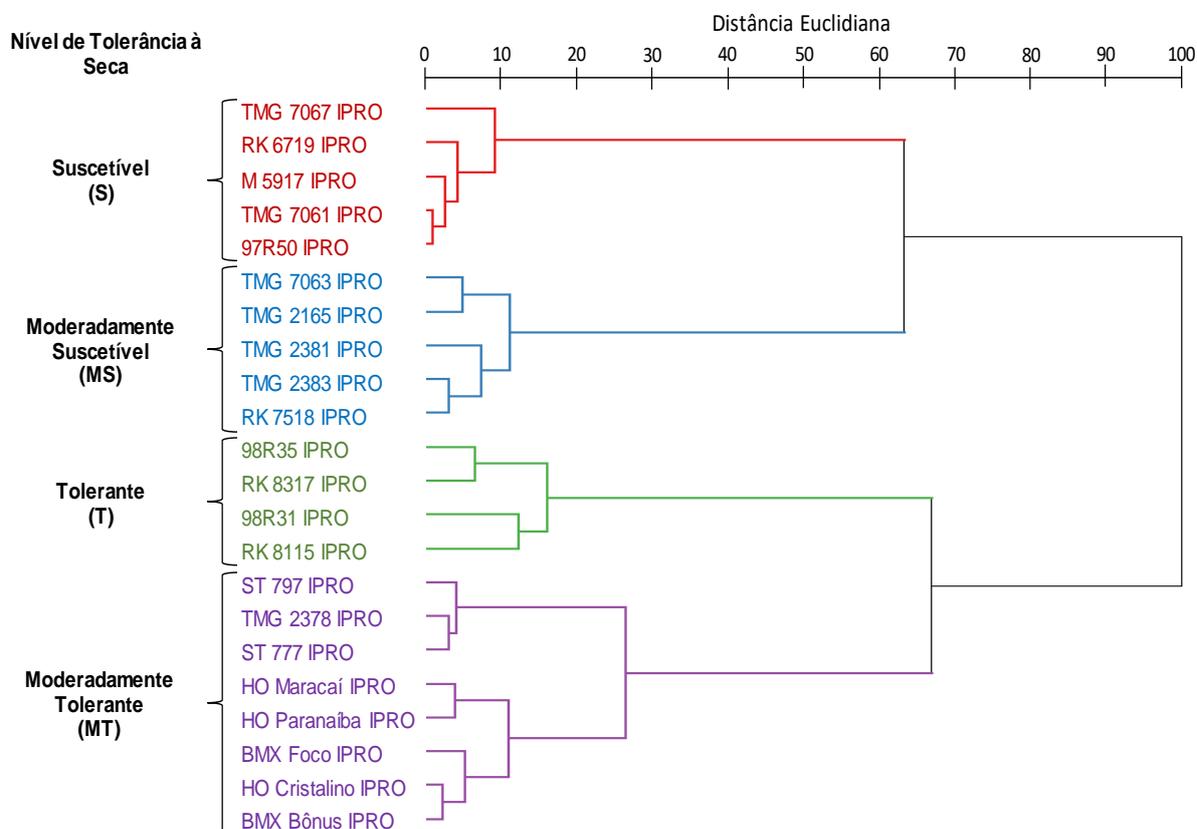
Os cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO receberam a maior pontuação no método do ranqueamento e, então, foram classificados como suscetível à restrição hídrica para o cultivo na região de Cassilândia, Estado de Mato Grosso do Sul (Tabela 6).

Análise Multivariada de Agrupamento Hierárquico

A análise multivariada de agrupamento hierárquico, dos 22 cultivares de soja, com base na produtividade de grãos em condições irrigadas e de sequeiros e nos 12 índices de tolerância à seca enquadraram os cultivares de soja em quatro grupos com 5, 5, 4 e 8 cultivares, respectivamente (Figura 3).

O primeiro grupo foi representado pelas cultivares com os menores índices de tolerância à seca e, portanto, foi considerado o grupo mais suscetível à restrição hídrica. O segundo e o quarto grupo representaram os cultivares com os valores intermediários dos índices de tolerância à seca e, portanto, os cultivares pertencentes a estes grupos foram classificados como moderadamente suscetíveis e moderadamente tolerantes à restrição hídrica, respectivamente. Por sua vez, o terceiro grupo representou os cultivares com os maiores índices de tolerância à seca e, assim, classificados como os mais tolerantes aos efeitos adversos da restrição hídrica.

Figura 3. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico dos 22 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando a produtividade de grãos em cultivo irrigado (Y_P) e sequeiro (Y_S) e os índices de tolerância à seca (TOL, MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, ATI e HM) durante a safra 2018/2019, no município de Cassilândia, MS.



Fonte: Autores.

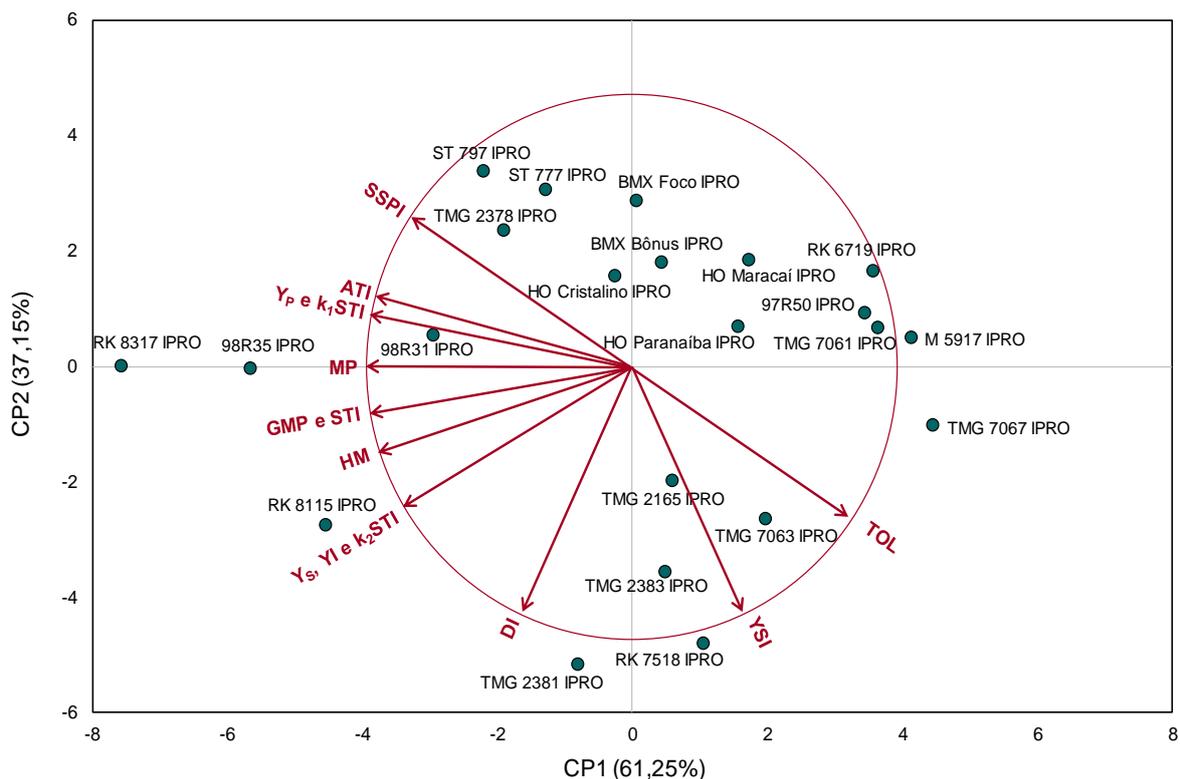
Diante do exposto, os cultivares de soja 98R35 IPRO, RK 8317 IPRO, 98R31 IPRO e RK 8115 IPRO foram identificados como as mais tolerantes à seca, ao passo que os cultivares TMG 7067 IPRO, RK 6719 IPRO, M 5917 IPRO, TMG 7061 IPRO e 97R50 IPRO foram classificados como os mais suscetíveis à restrição hídrica para as condições de cultivo na região de Cassilândia, MS (Figura 3).

Análise de Componente Principal

O primeiro componente principal explica 61,25% da variação total, enquanto o segundo componente principal explica 37,15% da variação (Figura 4). De acordo com o valor dos autovetores, os pesos dos índices MP (-0,318), GMP (-0,315), STI (-0,313), Y_P (-0,311), k_1 STI (-0,308), HM (-0,301), ATI (-0,300), SSPI (-0,265), Y_S (-0,261), YI (-0,261) e k_2 STI (-0,258) são negativamente altos para esse componente principal. Isso indica que quanto

maior o valor desses índices de tolerância à seca, menor é o escore do primeiro componente principal. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância à seca menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, o cultivar pode ser considerado tolerante à restrição hídrica.

Figura 4. Diagrama Biplot com base no primeiro e segundo componentes principais para a produtividade de grãos dos 22 cultivares de soja em cultivo irrigado (Y_P) e sequeiro (Y_S) e índices de tolerância à seca (TOL, MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, ATI e HM) durante a safra 2018/2019, no município de Cassilândia, MS.



Fonte: Autores.

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância dos cultivares de soja à seca. Como os pesos são negativos, quanto maior forem os índices de tolerância à seca, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância do cultivar de soja. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância do cultivar é melhor. Os cultivares de soja RK 8317 IPRO, 98R35IPRO e RK 8115 IPRO tiveram os melhores índices de desempenho global, respectivamente, e, portanto, estes cultivares foram classificados como tolerantes à restrição hídrica. Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram

observados nos cultivares de soja TMG 7067 IPRO e M 5917 IPRO, e assim estes cultivares foram classificados como suscetíveis à restrição hídrica.

Em síntese, os três métodos de análise multivariada utilizados neste estudo (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal) agruparam os cultivares de soja RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO e 98R35 IPRO como tolerantes à seca (Tabela 6, Figuras 3 e 4), ao passo que o cultivar 98R31 IPRO foi classificado como tolerante à seca apenas pelo método da análise de agrupamento hierárquico (Figura 3). Portanto, estes cultivares de soja são os mais indicados para serem recomendados para o cultivo em condições com alta probabilidade de ocorrência de restrição hídrica na região do Cerrado.

Os métodos do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais agruparam, respectivamente, 4, 5 e 2 cultivares de soja como suscetíveis à restrição hídrica (Tabela 6, Figuras 3 e 4).

Os cultivares de soja TMG 7067 IPRO e M5917 IPRO foram classificados como suscetíveis à restrição hídrica pelos três métodos de análise multivariada. Por sua vez, os cultivares TMG 7061 IPRO e RK 6719 IPRO foram classificados como suscetíveis à restrição hídrica pelos métodos do ranqueamento e análise de agrupamento hierárquico (Tabela 6 e Figura 4). Portanto, quando a semeadura da soja for realizada na região de Cassilândia em época com alta probabilidade de ocorrência de restrição hídrica durante o cultivo, estes cultivares não devem ser recomendados para a semeadura.

4. Considerações Finais

Os cultivares de soja 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO e RK 8115 IPRO possuem maior tolerância à seca, e são os cultivares mais indicados para serem cultivados em regiões do Cerrado com ocorrência de restrição hídrica. Em contrapartida, os cultivares TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, TMG 7061 IPRO e RK 6719 IPRO possuem maior susceptibilidade à restrição hídrica, e não devem ser recomendados para o cultivo na região de Cassilândia em condições de sequeiro em época com alta probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica.

Os índices de tolerância MP, STI, GMP e HM foram os mais indicados para identificar os cultivares de soja com maior tolerância à seca e com alto potencial de rendimento de grãos em sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro na região de Cassilândia, Estado de Mato Grosso do Sul.

Referências

- Akçura, M, Partigo, F & Kaya, Y. (2011). Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in Turkish bread wheat landraces. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 21(8), 700-709.
- Bahrami-Radb & S, Hajiboland, R. (2017). Effect of potassium application in drought-stressed tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants: Comparison of root with foliar application. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(2), p. 121-130.
- Basu, S, Ramegowda, V, Kumar, A & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000 Research*, 5(1): e1554.
- Blum, A. (1988). *Plant breeding for stress environments*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Bousslama, M.; Schapaugh, W.T. (1984). Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24(9), 933-937.
- Catuchi, TA, Guidorizzi, FVC, Guidorizi, KA, Barbosa, AM & Souza, G.M. (2012) Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(4), 519-527.
- Companhia Nacional de Abastecimento – Conab. (2020). *Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos: Safra 2019/2020*, Brasília: Conab.
- Companhia Nacional de Abastecimento – Conab. (2019). *Levantamento da safra 2018/2019: grãos*. Brasília: Conab.
- Dickie, A, Magno, I, Giampietro, J & Dolginow, A. (2016). *Challenges and opportunities for conservation, agricultural production, and social inclusion in the Cerrado biome*. California Environmental Associates (CEA): San Francisco, CA-USA. 51p.
- El-Rawy, MA & Hassan, MI. (2014). Effectiveness of drought tolerance indices to identify tolerant genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 17(4), 255-266.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. (2011). *Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil*. Londrina: Embrapa Soja.

Farshadfar, E, Poursiahbidi, MM & Abooghadareh, A.R.P. (2012). Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(13), 891-903.

Farshadfar, E, Mohammadi, R, Farshadfar, M & Dabiri, S. (2013). Relationships and repeatability of drought tolerance indices in wheat-rye disomic addition lines. *Australian Journal of Crop Science*, 7(2), 130-198.

Farshadfar, E & Sutka, J. (2002). Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. *Cereal Research Communications*, 31(1), 33-39.

Fernandez, GCJ. (1992). *Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance*. In: Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Taiwan, p.257-270.

Ferreira, D.F. (2014). Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(2),109-112 .

Fioreze, SL, Pivetta, LA, Fano, A, Machado, FR & Guimarães, VF. (2011). Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa de vegetação. *Revista Ceres*, 58(6), 342-349.

Gavuzzi, P, Rizza, F, Palumbo, M, Campaline, RG, Ricciardi, GL & Borghi, B. (1997). Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journal of Plant Science*, 77(4), 523-531.

Gholinezhad, E, Darvishzadeh, R & Bernousi, I. (2014). Evaluation of drought tolerance indices for selection of confectionery sunflower (*Helianthus annuus* L.) landraces under various environmental conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42(3), 187-201.

Jafari, A, Paknejad, F & Jami Al-Ahmadi, M. (2009). Evaluation of selection indices for drought tolerance of corn (*Zea mays* L.) hybrids. *International Journal of Plant Production*, 3(4):33-38, 2009.

Kron, AP, Souza, GM & Ribeiro, RV. (2008). Water deficiency at different developmental stages of *Glycine max* can improve drought tolerance. *Bragantia*, 67(1), 43-49.

Mantovani, D, Veste, M, Boldt-Burisch, K, Fritsch, S., Koning, LA & Freese, D. (2015). Carbon allocation, nodulation, and biological nitrogen fixation of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) under soil water limitation. *Annals Forestry Science*, 58(2), 259-274.

Menezes, CB, Ticona-Benavente, CA, Tardin, FD, Cardoso, MJ, Bastos, EA, Nogueira, DW, Portugal, AF, Santos, CV & Schaffert, RE. (2014). Selection indices to identify drought-tolerant grain sorghum cultivars. *Genetics and Molecular Research*, 13(4), 9817-9827.

Mertz-Henning, LM, Ferreira, LC, Henning, FA, Mandarino, JMG, Santos, ED, Oliveira, MCND, Nepomuceno, AEL, Farias, JRB & Neumaier, N. (2018). Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. *Agronomy*, 8(1), 1-11.

Mohammadi, R, Armion, M, Kahrizi, D & Amri, A. (2010). Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions. *International Journal of Plant Production*, 4(1), 11-24.

Moosavi, SS, Samadi, BY, Naghavi, MR, Zali, AA, Dashti, H & Pourshahbazi, A. (2008). Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. *Desert*, 12(4), 165-178.

Naghavi, MR, Pour-Aboughadareh, A & Khalili, M. (2013). Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. *Notulae Scientia Biologicae*, 5(3), 388-393.

Pereira, AS et al. (2018). *Methodology of scientific research*. [e-Book]. Santa Maria City. UAB / NTE / UFSM Editors. Accessed on: May, 9th, 2020. Available at: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Rosielle, AA & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21(8), 943-946.

Sánchez-Reinoso, AD, Ligarreto-Moreno, GA & Restrepo-Díaz, H. (2020). Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1), 99-107.

Silva, ER, Zoz, J, Oliveira, CES, Zuffo, AM, Steiner, F, Zoz, T & Vendruscolo, EP. (2019). Can co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* alleviate adverse effects of drought stress on soybean (*Glycine max* L. Merrill.)? *Archives of Microbiology*, 201(3), 325–335.

Vieira, EA, Silva, MG, Moro, CF & Laura, VA. (2017). Physiological and biochemical changes attenuate the effects of drought on the Cerrado species *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115(4), 472-483.

Zoz, T, Steiner, F, Guimarães, VF, Castagnara, DD, Meinerz, CC, Fey, R. (2013). Peroxidase activity as an indicator of water deficit tolerance in soybean cultivars. *Bioscience Journal*, 29(6), 1664-1671.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rogério do Carmo Cabral – 25%

Simone Cândido Ensinas Maekawa – 25%

Alan Mario Zuffo – 25%

Fábio Steiner – 25%