

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**IDENTIFICAÇÃO DE CULTIVARES DE SOJA PARA TOLERÂNCIA
AOS ESTRESSES ABIÓTICOS**

ROGÉRIO DO CARMO CABRAL

CASSILÂNDIA – MS
OUTUBRO/2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CASSILÂNDIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**IDENTIFICAÇÃO DE CULTIVARES DE SOJA PARA TOLERÂNCIA
AOS ESTRESSES ABIÓTICOS**

ROGÉRIO DO CARMO CABRAL

Orientadora: Profa. Dra. Simone Cândido Ensinas Maekawa

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Steiner

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, com área de concentração em Sustentabilidade na Agricultura.

CASSILÂNDIA – MS
OUTUBRO/2019

C121i Cabral, Rogério do Carmo

Identificação de cultivares de soja para tolerância aos estresses abióticos/ Rogério do Carmo Cabral. – Cassilândia, MS: UEMS, 2019.

76f.

Dissertação (Mestrado) – Agronomia – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2019.

Orientadora: Prof.^a Dra. Simone Cândido Ensinas.

1. Soja 2. Estresses abióticos I. Ensinas, Simone Cândido II.
Título

CDD 23.ed. - 633.34



Governo do Estado de Mato Grosso do Sul
Fundação Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
PROPP - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
UEMS - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - Sede Dourados
UUCass - Unidade Universitária de Cassilândia
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
PGAC - Área de Concentração em Sustentabilidade na Agricultura



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: IDENTIFICAÇÃO DE CULTIVARES DE SOJA PARA TOLERÂNCIA AOS ESTRESSES ABIÓTICOS.

AUTOR(A): ROGÉRIO DO CARMO CABRAL

ORIENTADOR(A): SIMONE CÂNDIDO ENSINAS MAEKAWA

CO-ORIENTADOR(A): FÁBIO STEINER

Aprovado como parte das exigências para obtenção de MESTRE EM AGRONOMIA, Área de concentração: “**Sustentabilidade na Agricultura**”, pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Steiner
Co-Orientador(a)

Prof. Dr. Gustavo Adolfo Pazzetti Ordonez

Prof. Dr. Tiago Zoz

Data da realização: 29 de outubro de 2019.

***“Combati um bom combate, acabei a carreira
e guardei a fé”. II Timóteo 4:7***

Apóstolo Paulo.

DEDICATÓRIA

À Deus, pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado, me guiando com saúde e perseverança.

À minha mãe e sogra pelo amor e compreensão.

À minha esposa pela amizade, companheirismo e ajuda nos momentos mais importantes.

A todos meus professores e colegas de turma.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela sua palavra ser lâmpada para os meus pés e luz para o meu caminho;

À minha esposa Simone Galbieri Cabral, eterna namorada, companheira de Deus para todos os momentos da vida. Te amo, minha querida;

À minha mãe Neusa Helena do Carmo Cabral e sogra Nilza Teresa D`Amorin Galbieri, pelo imenso amor e apoio em todos os momentos. A vocês os meus mais sinceros e profundos agradecimentos;

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - Unidade de Cassilândia, pela oportunidade concedida para realização do mestrado;

À minha orientadora Dra. Simone Cândido Ensinas Maekawa, pela paciência imprescindível para a conclusão do Mestrado;

Ao meu coorientador Dr. Fábio Steiner, pelos ensinamentos, amizade e confiança depositada para a condução dos experimentos do Curso de Mestrado;

Aos professores da UEMS – Unidade de Cassilândia. Vocês foram minha base para chegar até esse nível acadêmico;

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

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS	13
INTRODUÇÃO GERAL	14
CAPÍTULO 1. IDENTIFICACO DE CULTIVARES DE SOJA PARA TOLERÂNCIA AOS ESTRESSE HÍDRICO E SALINO DURANTE A FASE DE ESTABELECIMENTO DA PLÂNTULA	16
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	19
1.2.1 Material Vegetal e Tratamentos	19
1.2.2 Condições de Germinação e Mensurações	21
1.2.3 Cálculo dos índices de Tolerância ao Estresse (ITE).....	21
1.2.4 Análises Estatísticas	22
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
1.3.1 Efeito do estresse hídrico na germinação e no crescimento das plântulas	23
1.3.2 Efeito do estresse salino na germinação e no crescimento das plântulas	29
1.4. CONCLUSOES	36
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
CAPÍTULO 2. TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE SOJA  TOXICIDADE POR ALUMÍNIO.....	39
2.1 INTRODUÇÃO	40
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.2.1 Material Vegetal e Tratamentos	42
2.2.2 Condições de Germinação e Mensurações.....	43
2.2.3 Cálculo dos índices de Tolerância ao Estresse (ITE).....	43
2.2.4 Análises Estatísticas	44
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
2.4 CONCLUSOES	52
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CAPÍTULO 3. ÍNDICES DE SELEÇÃO PARA IDENTIFICAR CULTIVARES DE SOJA TOLERANTES  SECA	55
3.1 INTRODUÇÃO	56

3.2 MATERIAL E MÉTODOS	58
3.2.1 Localização e caracterização da área experimental.....	58
3.2.2 Delineamento experimental.....	59
3.2.3 Implantação e Condução do experimento	60
3.2.4 Avaliação da produtividade.....	60
3.2.5 Cálculo dos índices de tolerância à seca	60
3.2.6 Análises estatísticas.....	61
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.3.1 Rendimento de grãos e índices de tolerância à seca.....	63
3.3.2 Análise de correlação	67
3.3.3 Método do ranqueamento.....	69
3.3.4 Análise multivariada de agrupamento hierárquico.....	71
3.3.5 Análise de componente principal	72
3.4 CONCLUSÃO	74
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Características agronômicas, teor de água, massa de mil sementes e germinação das 25 cultivares de soja utilizadas no estudo **20**
- Tabela 2.** Índices de tolerância ao estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas ao estresse hídrico..... **24**
- Tabela 3.** Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse hídrico para as 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019. **26**
- Tabela 4.** Índices de tolerância ao estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas ao estresse salino **30**
- Tabela 5.** Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse salino para as 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019. **33**
- Tabela 6.** Características agronômicas, teor de água, massa de mil sementes e germinação das 25 cultivares de soja utilizadas no estudo **42**
- Tabela 7.** Índices de tolerância de estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas à toxicidade por alumínio. UEMS/Cassilândia, 2019..... **46**
- Tabela 8.** Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse para a toxicidade por alumínio das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019..... **49**
- Tabela 9.** Características agronômicas das 22 cultivares de soja utilizadas na pesquisa **59**

- Tabela 10.** Índices de tolerância à seca para avaliar a resposta da produtividade de grãos das 22 cultivares de soja cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas..... **61**
- Tabela 11.** Rendimento de grãos e índices de tolerância à seca para as 22 cultivares de soja cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas (sirrigrado e sequeiro). UEMS/Cassilândia, 2018/2019. **65**
- Tabela 12.** Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o rendimento de grãos de soja sob condições ambientais favoráveis e adversas (sistema irrigado e sequeiro) e os índices de tolerância à seca. UEMS/Cassilândia, 2018/2019..... **68**
- Tabela 13.** Ranqueamento, pontuação média dos ranqueamentos (\bar{R}) e desvio padrão da média dos ranqueamentos (DP) para o rendimento de grãos e índices de tolerância à seca dos 22 cultivares de soja cultivados sob condições ambientais favoráveis e adversas. UEMS/Cassilândia, 2018/2019. **70**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto à tolerância aos estresses abióticos, com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância ao estresse. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente. **22**
- Figura 2.** Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando os índices de tolerância ao estresse hídrico (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST). **27**
- Figura 3.** Diagrama biplot com base no primeiro e segundo componente principal dos índices de tolerância ao estresse hídrico (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST). **28**
- Figura 4.** Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando os índices de tolerância ao estresse salino (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST). **34**
- Figura 5.** Diagrama biplot com base no primeiro e segundo componente principal dos índices de tolerância ao estresse salino (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST). **35**
- Figura 6.** Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto a tolerância à toxicidade por Al^{3+} , com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância ao estresse. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente. **45**
- Figura 7.** Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, utilizando os índices de tolerância à toxicidade por Al^{3+} (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST). **50**

- Figura 8.** Diagrama biplot com base nos primeiro e segundo componentes principais dos índices de tolerância da toxicidade por alumínio (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST)..... **51**
- Figura 9.** Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto a tolerância à seca com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente. **62**
- Figura 10.** Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 22 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando o rendimento de grãos em cultivo irrigado (Y_P) e sequeiro (Y_S) e os índices de tolerância à seca (SSI, RDI, STI, GMP, MP, HM, TOL, YI, DI, YSI, SSPI, ATI, k_1 STI, k_2 STI e SDI). **71**
- Figura 11.** Diagrama biplot com base nos primeiro e segundo componentes principais para o rendimento de grãos em cultivo irrigado (Y_P) e sequeiro (Y_S) e índices de tolerância à seca (SSI, RDI, STI, GMP, MP, HM, TOL, YI, DI, YSI, SSPI, ATI, k_1 STI, k_2 STI e SDI). **73**

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ACP	Análise de componente principal
BMX	Brasmax
CP	Componente principal
CPA	Comprimento da parte aérea
CR	Comprimento das raízes
CT	Comprimento total das plantas
G	Germinao de sementes
GMR	Grupo de maturidade relativa
ITE	ndice de tolerância ao estresse
M	Monsoy
MS	Moderadamente suscetível
MSPA	Matéria seca da parte aérea
MSR	Matéria seca das raízes
MST	Matéria seca total
MT	Moderadamente tolerante
NaCl	Cloreto de sódio
NS	Nidera Sementes
PEG	Polietilenoglicol
Q	Quartil
S	Suscetível
ST	SoyTech
T	Tolerante
TMG	Tropical Melhoramento Genética

INTRODUÇÃO GERAL

O cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] é um dos mais importantes para o Centro-Oeste do Brasil, região de maior destaque no cenário nacional devido ao alto potencial de produção de grãos. A sojicultura brasileira ao longo das últimas décadas tem passado por um intenso processo de expansão em que a produtividade de grãos, a lucratividade e a sustentabilidade econômica e ambiental são aspectos importantes e relevantes. Dessa forma, vem se buscando novas tecnologias com o objetivo de atender tais aspectos onde se destacam; manejo fitossanitário, melhorias da qualidade física, química e biológica do solo, cultivares transgênicas, genótipos com alta adaptabilidade, época adequada de semeadura e densidade populacional.

A produção de soja na região Centro-Oeste certamente continuará a ser um importante impulsionador do crescimento econômico agrícola do Brasil nos próximos anos. No entanto, apesar desse cenário favorável para o cultivo de soja, a ocorrência de adversidades climáticas, como à estiagem, excesso de calor e a toxicidade por alumínio (Al^{3+}), comumente verificada nos solos ácidos do Cerrado ainda constituem fatores de risco e de insucesso para o cultivo da soja na região. Estes fatores são apontados como os mais limitantes para o desenvolvimento e a produtividade de grãos da cultura em condições tropicais, como ocorre na região Centro-Oeste do Brasil. Portanto, estudos que visam identificar cultivares de soja com maior tolerância aos estresses abióticos são importantes na geração de informações para a pesquisa agrícola.

Estas informações podem ser úteis para os programas de melhoramento genético da soja e, assim, contribuir para o sucesso da cultura no Brasil, por meio do desenvolvimento de cultivares com maior potencial produtivo, adaptação às diversas condições edafoclimáticas e resistentes aos fatores bióticos e abióticos. No entanto, a seleção e o desenvolvimento de cultivares tolerantes aos estresses abióticos não é uma tarefa fácil devido ao fato de ocorrer fortes interações entre genótipos e meio ambiente.

A performance ou desempenho relativo dos genótipos em ambientes não estressantes e em ambientes estressantes, parece ser o ponto de partida para a identificação e seleção de genótipos desejáveis para condições ambientais adversas. Portanto, durante o processo de seleção de cultivares mais adaptados aos estresses abióticos devem ser considerados o cultivo da cultura sob condições ideais não estressantes e sob condições estressantes, como restrição hídrica, salinidade, toxicidade por alumínio, excesso de calor, dentre outros fatores.

Vários pesquisadores têm proposto a utilização de diferentes métodos e índices de seleção para avaliar as diferenças genéticas para a tolerância aos estresses abióticos. O

adequado crescimento das plantas e a melhoria na estabilidade da produção dos genótipos em ambientes estressantes são importantes fatores na busca de genótipos de soja superiores. No entanto, estes estudos ainda são incipientes para a cultura da soja. Portanto, esta dissertação apresenta em seus três capítulos informações relevantes para a cultura da soja por meio de investigações que buscaram estudar a resposta de cultivares comerciais de soja às condições de restrição hídrica, salinidade e toxicidade por alumínio (Al^{3+}), bem como determinar os melhores índices de seleção que possam contribuir para identificar os genótipos de soja tolerantes à seca. Os três capítulos da dissertação utiliza, ainda, algumas das principais técnicas de análise multivariadas, como análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais, e propõe o aprimoramento do método de ranqueamento. Estas técnicas ou métodos têm sido amplamente utilizados devido à possibilidade de integrar, simultaneamente, múltiplas informações, e também permitir quantificar a variância dos caracteres de interesse agrônômico.

CAPÍTULO 1. IDENTIFICAÇÃO DE CULTIVARES DE SOJA PARA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO E SALINO DURANTE A FASE DE ESTABELECIMENTO DA PLÂNTULA

RESUMO: Os estresses hídrico e salino são os principais fatores abióticos que limitam a germinação e o estabelecimento das plantas de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. Estudos que visam identificar cultivares com maior tolerância aos estresses abióticos despertam com grande interesse para a pesquisa agrícola. O trabalho foi realizado com a finalidade de avaliar a tolerância de 25 cultivares de soja aos estresses hídrico e salino durante a fase de germinação e o crescimento inicial das plântulas. Os estresses hídrico e salino foram induzidos pela exposição das sementes durante 10 dias à 25 °C, à soluções com potencial osmótico de -0,30 MPa preparadas, à base de polietilenoglicol PEG-6000 (151,403 g L⁻¹) e NaCl (3,536 g L⁻¹). A partir dos dados de germinação, comprimento e matéria seca das plântulas em condições de estresse hídrico, estresse salino e condições controle, foram calculados os índices de tolerância ao estresse (ITE). As cultivares de soja RK 8317 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO e ST 777 IPRO possuem maior tolerância ao estresse hídrico, e são as mais indicadas para serem semeadas em condições de baixa disponibilidade de água no solo. As cultivares de soja NS 8399 IPRO, NS 7007 IPRO, NS 7505 IPRO, RK 8115 IPRO e TMG 2381 IPRO possuem maior susceptibilidade ao estresse hídrico, e não devem ser recomendadas para o cultivo em condições de baixa disponibilidade hídrica. As cultivares TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO, M5917 IPRO, ST 797 IPRO e TMG 7067, são as cultivares mais indicadas para serem cultivadas em solos salinos por apresentarem maior tolerância à salinidade. Por sua vez, as cultivares NS 8399 IPRO, HO Paranaíba IPRO, HO Cristalino IPRO e BMX Foco IPRO são classificadas como suscetíveis à salinidade.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max* (L.) Merrill., potencial osmótico, índice de tolerância.

SELECTION OF SOYBEAN CULTIVARS FOR TOLERANCE TO WATER AND SALINE STRESS DURING THE SEEDLING ESTABLISHMENT PHASE

ABSTRACT: Water and saline stresses are the main abiotic factors that limit the germination and establishment of soybean plants [*Glycine max* (L.) Merrill.]. Studies that aim to identify cultivars with greater tolerance to abiotic stress are of great interest for agricultural research. The research was conducted to evaluate the tolerance of 25 soybean cultivars to water and saline stress during the germination phase and initial seedling growth. Water and saline stress were

induced by seed exposure in solutions with osmotic potential of -0.30 MPa prepared, respectively, with polyethylene glycol PEG-6000 (151.403 g L^{-1}) and NaCl (3.536 g L^{-1}) for 10 days, at $25 \text{ }^\circ\text{C}$. From seedling germination, length and dry matter data under water stress, saline stress and control conditions, stress tolerance indices (ITE) were calculated. The RK 8317 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO and ST 777 IPRO soybean cultivars have higher tolerance to water stress, and are best suited for sowing under conditions of low soil water availability. The soybean cultivars NS 8399 IPRO, NS 7007 IPRO, NS 7505 IPRO, RK 8115 IPRO and TMG 2381 IPRO are more susceptible to water stress and should not be recommended for cultivation under conditions of low water availability. The cultivars TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO, M5917 IPRO, ST 797 IPRO and TMG 7067 are the most suitable cultivars for saline soils because they have higher salinity tolerance, and the cultivars NS 8399 IPRO, HO Paranaíba IPRO, HO Crystalline IPRO and BMX Focus IPRO are classified as susceptible to salinity and should not be recommended for cultivation in saline soils.

KEY WORDS: *Glycine max* (L.) Merrill., osmotic potential, tolerance index.

1.1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das mais importantes culturas oleaginosas do mundo. Com uma área plantada de 35,1 milhões de hectares e produção de 117,0 milhões de toneladas na safra 2017/2018 (CONAB, 2019), o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de soja do mundo. 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 agrícola nesta região certamente continuará a ser um importante impulsionador do crescimento econômico agrícola do Brasil nos próximos anos.

A produção agrícola na região do Cerrado está focada no cultivo de duas culturas por safra agrícola, na qual os agricultores cultivam principalmente soja/milho ou soja/algodão. Porém, a viabilidade técnica e econômica desses modelos de produção agrícola somente são alcançados quando a semeadura da soja, com cultivares precoces ou superprecoces, for realizada até o início do mês de novembro. No entanto, como a região do Cerrado brasileiro apresenta uma estação seca muito prolongada durante o período de inverno (maio a setembro), em muitas situações, os agricultores realizam a semeadura da soja sob condições inadequadas de umidade do solo para suportar a germinação das sementes e o estabelecimento inicial das plantas no campo.

A baixa disponibilidade de água no solo por ocasião da semeadura da soja pode reduzir e atrasar o processo de germinação devido à redução na taxa de absorção de água pelas sementes, resultando no inadequado estabelecimento do estande de plantas no campo (PATANÈ et al., 2013; STEINER et al., 2017). Portanto, a estação seca durante o período de inverno na região do Cerrado impõe muitos desafios à produção nacional de soja, especialmente para a semeadura antecipada. Estudos que visam avaliar e identificar cultivares de soja com maior tolerância à seca durante as fases de germinação e de estabelecimento das plântulas são importantes para a pesquisa agropecuária.

Além disso, a produção agrícola na região do Cerrado também pode ser limitada devido ao excesso de sais no solo ou na água de irrigação. Atualmente, o estresse salino tem se intensificado devido ao uso inadequado e excessivo de fertilizantes minerais, manejo inadequado da irrigação e da drenagem ou da irrigação com águas salinas (GHEYI et al., 2010). A salinidade pode afetar negativamente a germinação das sementes e o crescimento das plântulas devido ao estresse osmótico, efeitos fitotóxicos específicos de íons, como sódio (Na^+) e cloro (Cl^-), e estresse oxidativo (ACOSTA-MOTOS et al., 2017). Esses efeitos causam alterações adversas na fisiologia e na bioquímica do processo de germinação das sementes. Altos níveis de salinidade podem inibir a absorção de água pelas sementes, tornando a germinação impossível, enquanto o nível mais baixo de salinidade resulta no atraso do processo de germinação (IBRAHIM, 2016).

A germinação das sementes é a primeira e a fase mais sensível e crítica para o ciclo de vida das plantas, e os estresses hídrico e salino são os principais fatores ambientais que restringem o adequado estabelecimento das culturas (PETROVIC et al., 2016; STEINER et al., 2017). A restrição hídrica e a salinidade desempenham importante papel na determinação da taxa de germinação das sementes e no crescimento inicial das plantas (PATANÈ et al., 2013; STEINER et al., 2017). Esses dois fatores abióticos afetam as plantas de maneira semelhante, principalmente devido à redução do potencial hídrico do solo. Portanto, os ensaios de tolerância à seca e à salinidade durante os estádios iniciais de crescimento das plantas são de extrema importância para a pesquisa. Uma cultivar com germinação mais rápida sob condições de restrição hídrica ou de salinidade, pode alcançar um rápido estabelecimento de plantas no campo, resultando em maiores rendimentos de grãos.

Muitos fatores podem afetar as respostas das plantas aos estresses hídrico e salino, como genótipo e espécies de planta, estágio de crescimento, severidade e duração do estresse, dentre outros fatores ambientais (PATANÈ et al., 2013; NAGHAVI et al., 2013; PETROVIC et al., 2016). Diferenças genéticas na tolerância aos estresses abióticos em condições de cultivo

protegido têm sido reportadas em cultivares de soja brasileiras (ZOZ et al., 2013), o que pode ser útil na identificação de genótipos mais adaptados a semeaduras sob condições ambientais adversas. No entanto, embora alguns estudos tenham reportado os efeitos do estresse hídrico e salino no processo de germinação das sementes de soja (SOARES et al., 2015), nenhum estudo investigou os efeitos adversos desses estresses abióticos através dos métodos de análises multivariadas utilizando diferentes índices de tolerância aos estresses para um número representativo de cultivares de soja.

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a tolerância aos estresses hídrico e salino de 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] da região Centro-Oeste do Brasil, durante as fases de germinação e crescimento inicial das plântulas.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Material Vegetal e Tratamentos

Em condições de laboratório, foram implantados e conduzidos dois ensaios experimentais, para avaliar os efeitos do estresse hídrico e salino sobre a germinação e o crescimento inicial das plântulas em 25 cultivares de soja. Previamente foram determinados: o teor de água, a massa de mil sementes e a taxa de germinação das sementes, seguindo a metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes – RAS (BRASIL, 2009). As principais características agronômicas e intrínsecas das sementes das 25 cultivares de soja podem ser contempladas na Tabela 1.

As sementes foram previamente desinfecionadas, por imersão durante 10 minutos, em solução de hipoclorito de sódio 1% (v/v). Em seguida procedeu-se à lavagem em água corrente e posteriormente foram colocadas para germinar sob condições de estresse hídrico (Ensaio 1) e estresse salino (Ensaio 2), induzidos por soluções com potencial osmótico de $-0,30$ MPa preparadas com polietilenoglicol (PEG-6000) e cloreto de sódio (NaCl), respectivamente. A quantidade de PEG-6000 adicionada para obter a solução com potencial osmótico de $-0,30$ MPa foi determinada pela equação de Michel & Kaufmann (1973): $\Psi_s = [-(1,18 \times 10^{-2}) C - (1,18 \times 10^{-4}) C^2 + (2,67 \times 10^{-4}) CT + (8,39 \times 10^{-7}) C^2T]/10$, em que Ψ_s é o potencial osmótico (MPa); C é a concentração (g L^{-1} de PEG-6000) e T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$). A quantidade de NaCl adicionada para obter a solução com potencial osmótico de $-0,30$ Mpa, foi calculada pela equação de van't Hoff (Hillel, 1971): $\Psi_s = -RTCi$, onde R é a constante universal dos gases nobres ($0,008314 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T é a temperatura absoluta ($273,15 + ^{\circ}\text{C}$); C é a concentração molar do soluto (mol L^{-1}); e i é o fator de van't Hoff, ou seja, a razão entre a quantidade de partículas

na solução e a quantidade de íons dissolvidos [isto é, para NaCl este valor é 2,0 (Na^+ e Cl^-)]. Como controle foi utilizado água destilada com potencial osmótico $\Psi_s = 0,00$ MPa.

Tabela 1. Características agronômicas, teor de água, massa de mil sementes e germinação das 25 cultivares de soja utilizadas no estudo

Cultivar	Características Agronômicas			Teor de água (%)	Massa de 1000 sementes (g)	Germinação (%)
	Ciclo médio ¹	GMR	Tipo de crescimento			
TMG 2383 IPRO	120	8,3	Semideterminado	9,51	175	87
TMG 2381 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,77	160	100
TMG 2378 IPRO	125	7,8	Semideterminado	8,96	165	96
TMG 7067 IPRO	112	7,2	Semideterminado	9,87	170	100
TMG 7063 IPRO	110	7,0	Indeterminado	9,75	175	86
TMG 2165 IPRO	112	6,5	Indeterminado	9,14	180	98
TMG 7061 IPRO	110	6,1	Indeterminado	10,17	185	98
97R50 IPRO	115	7,5	Indeterminado	8,15	190	100
98R31 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,89	175	97
98R35 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,57	180	98
HO Cristalino IPRO	125	8,3	Indeterminado	8,93	160	100
HO Maracaí IPRO	120	7,7	Indeterminado	9,60	170	87
HO Paranaíba IPRO	115	7,4	Indeterminado	9,75	210	93
BMX Foco IPRO	110	7,2	Indeterminado	9,11	175	83
BMX Bônus IPRO	120	7,9	Indeterminado	9,42	185	100
ST 777 IPRO	108	7,7	Indeterminado	9,41	155	100
ST 797 IPRO	110	7,9	Indeterminado	9,45	150	100
RK 8115 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,02	200	96
RK 6719 IPRO	105	6,7	Indeterminado	9,57	190	100
RK 7518 IPRO	112	7,5	Indeterminado	10,08	180	100
RK 8317 IPRO	125	8,3	Indeterminado	10,46	185	88
M 5917 IPRO	95	5,9	Indeterminado	9,42	170	93
NS 8399 IPRO	120	8,3	Indeterminado	9,02	185	89
NS 7007 IPRO	98	7,1	Indeterminado	9,77	210	99
NS 7505 IPRO	118	7,5	Indeterminado	8,97	200	84

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

Para cada ensaio, utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado, sendo adotadas com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos pela exposição ou não das sementes, das 25 variedades de soja, ao estresse hídrico ou salino. Cada unidade experimental foi representada por 50 sementes.

1.2.2 Condições de Germinação e Mensurações

Cada unidade experimental foi acondicionada, para germinar, sobre três folhas de papel-toalha Germitest®, previamente umedecidas com as diferentes soluções em quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel. Em seguida, foram confeccionados rolos, os quais foram mantidos em câmara de germinação sob temperatura constante de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas, durante 10 dias.

Foram consideradas sementes germinadas aquelas que apresentaram protrusão da radícula, com no mínimo 5,0 mm de comprimento. Após a determinação da taxa de germinação, 10 plântulas foram escolhidas aleatoriamente para a mensuração do comprimento e a matéria seca da parte aérea e das raízes. O comprimento da parte aérea (CPA) e das raízes (CR) foi mensurado com auxílio de uma régua graduada em milímetros. A matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) foi determinada em balança analítica após secagem do material vegetal em estufa à 85 °C, por 48 h.

1.2.3 Cálculo dos Índices de Tolerância ao Estresse (ITE)

Os índices de tolerância ao estresse (ITE) das cultivares de soja foram calculados, a partir dos dados de germinação, comprimento de plântulas e matéria seca de plântulas expostas às condições de estresse hídrico, estresse salino e condições controle, utilizando-se as seguintes equações propostas por Partheeban et al. (2017):

$$ITE-G = (\text{Germinação de sementes sob estresse} / \text{Germinação de sementes do controle}) \times 100$$

$$ITE-CPA = (\text{Comprimento da parte aérea das plantas sob estresse} / \text{Comprimento da parte aérea das plantas do controle}) \times 100$$

$$ITE-CR = (\text{Comprimento da raiz das plantas sob estresse} / \text{Comprimento da raiz das plantas do controle}) \times 100$$

$$ITE-CT = (\text{Comprimento total das plantas sob estresse} / \text{Comprimento total das plantas do controle}) \times 100$$

$$ITE-MSPA = (\text{Matéria seca da parte aérea das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca da parte aérea das plantas do controle}) \times 100$$

$$ITE-MSR = (\text{Matéria seca das raízes das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca das raízes das plantas do controle}) \times 100$$

$$ITE-MST = (\text{Matéria seca total das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca total das plantas do controle}) \times 100$$

1.2.4 Análises Estatísticas

Os dados de cada uma das variáveis avaliadas foram submetidos à análise de variância, e na detecção de efeito significativo, as médias das cultivares de soja foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando-se o software Sisvar versão 5.6 para Windows (FERREIRA, 2011).

A identificação dos cultivares tolerantes e, ou suscetíveis aos estresses hídrico e salino foi realizada com base em todos os índices de tolerância ao estresse (ITE), por meio do método do ranqueamento, conforme apresentado por Farshadfar et al. (2012). Uma cultivar com o maior valor para cada um dos índices de tolerância ao estresse recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que a cultivar com o menor valor para cada um dos índices de tolerância ao estresse, recebeu uma pontuação de classificação igual a 25. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DP_R) para todos os índices de tolerância ao estresse das 25 cultivares de soja em condições de estresse hídrico ou salino.

A discriminação das cultivares de soja quanto à tolerância aos estresses hídrico e salino, apenas com base no valor médio do ranqueamento e no desvio padrão do ranqueamento, não se tem mostrado eficaz para classificar as cultivares em distintos níveis de tolerância aos estresses abióticos. Portanto, neste estudo foi proposto um aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012). A classificação e separação das cultivares de soja em níveis de tolerância, foi realizada com base na pontuação média do ranqueamento de cada cultivar, considerando-se o valor do quartil que divide as 25 posições possíveis de ranqueamento em quatro partes iguais, como apresentado na Figura 1.

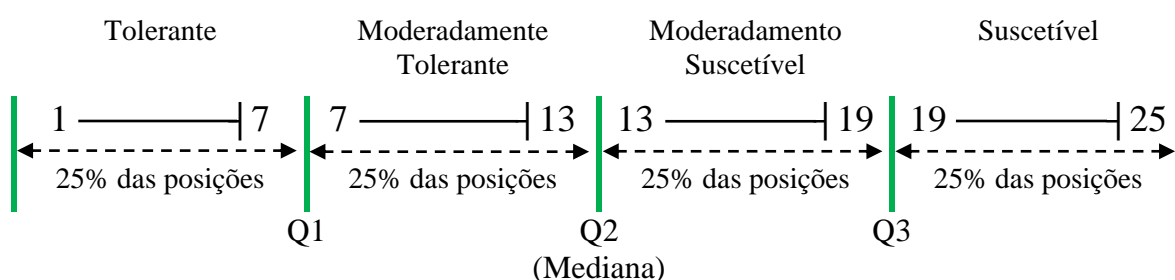


Figura 1. Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto à tolerância aos estresses abióticos, com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância ao estresse. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente.

O método proposto, preconiza que uma cultivar com pontuação média do ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (Q1) seja classificada como tolerante; uma cultivar com

pontuação média entre o valor do primeiro (Q1) e segundo quartil (Q2) seja classificada como moderadamente tolerante; uma cultivar com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo (Q2) e terceiro quartil (Q3) seja classificada como moderadamente suscetível ao estresse abiótico, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis aos estresses abióticos é representado pelas cultivares com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil (Q3).

As análises multivariadas pelo método de agrupamento hierárquico, foram realizadas com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward para classificar as 25 cultivares de soja em diferentes níveis de tolerância ao estresses hídrico e salino (cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e cultivares suscetíveis). A análise de componentes principais (ACP), com base na matriz de covariância dos índices de tolerância ao estresse e análise biplot, foram realizadas utilizando-se o software estatístico Action Stat Pro® versão 3.6 para Windows.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Efeito do estresse hídrico na germinação e no crescimento das plântulas

O índice de tolerância ao estresse para a germinação (ITE-G) das sementes, permitiu separar as cultivares de soja em dois grupos distintos; as cultivares TMG 7063 IPRO, TMG 2378 IPRO, 98R31 IPRO, TMG 2165 IPRO, HO Maracaí IPRO, HO Maracaí IPRO, TMG 7061 IPRO, TMG 2383 IPRO e NS 7505 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico (Tabela 2).

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento da parte aérea (ITE-CPA) das plantas permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos distintos; as cultivares TMG 7063 IPRO e 98R35 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico, e as cultivares HO Maracaí IPRO, HO Paranaíba IPRO, RK 7518 IPRO, RK 8115 IPRO, M 5917 IPRO, TMG 2165 IPRO, BMX Bônus IPRO, NS 7007 IPRO, TMG 2381 IPRO, TMG 7067 IPRO, RK 6719 IPRO e TMG 2378 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância ao estresse salino (Tabela 2).

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento das raízes (ITE-CR) das plantas expostas ao estresse hídrico, permitiu classificar as cultivares de soja em cinco grupos distintos, sendo que o grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado pela cultivar RK 8317 IPRO, e as cultivares HO Cristalino IPRO, ST 797 IPRO, NS 7505 IPRO, TMG 2381 IPRO, NS 7007 IPRO, NS 8399 IPRO e RK 8115 IPRO foram classificadas no grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico (Tabela 2).

Tabela 2. Índices de tolerância ao estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas ao estresse hídrico

Cultivar	ITE-G	ITE-CPA	ITE-CR	ITE-CT	ITE-MSPA	ITE-MSR	ITE-MST
	----- (%)-----						
TMG 2383 IPRO	91 a	12 b	165 b	80 b	18 a	139 a	43 b
TMG 2381 IPRO	89 b	7 c	86 e	48 e	12 c	105 b	35 d
TMG 2378 IPRO	95 a	6 c	122 d	62 d	8 c	119 b	34 d
TMG 7067 IPRO	88 b	7 c	130 d	61 d	11 c	118 b	43 b
TMG 7063 IPRO	96 a	29 a	160 b	90 a	18 a	115 b	51 a
TMG 2165 IPRO	94 a	8 d	118 d	61 d	14 b	112 b	43 b
TMG 7061 IPRO	91 a	11 c	142 c	79 b	14 b	122 b	50 a
97R50 IPRO	87 b	10 c	115 d	59 d	10 c	110 b	40 c
98R31 IPRO	95 a	11 c	121 d	66 d	10 c	105 b	37 c
98R35 IPRO	90 b	27 a	111 d	70 c	15 b	112 b	40 c
HO Cristalino IPRO	85 b	10 c	102 e	55 e	13 c	89 c	37 c
HO Maracaí IPRO	91 a	9 d	106 d	56 d	14 b	101 b	39 c
HO Paranaíba IPRO	93 a	9 d	124 d	59 d	11 c	110 b	39 c
BMX Foco IPRO	90 b	16 b	120 d	68 d	15 b	92 c	36 c
BMX Bônus IPRO	87 b	7 d	110 d	52 e	10 c	120 b	37 c
ST 777 IPRO	91 a	17 b	113 d	64 d	16 a	160 a	48 a
ST 797 IPRO	85 b	15 b	100 e	60 d	11 c	87 c	31 b
RK 8115 IPRO	89 b	8 d	80 e	45 e	12 c	106 b	40 c
RK 6719 IPRO	88 b	6 d	113 d	59 d	10 c	103 b	37 c
RK 7518 IPRO	86 b	8 d	129 d	65 d	11 c	115 b	42 b
RK 8317 IPRO	95 a	11 c	193 a	81 b	15 b	153 a	46 a
M 5917 IPRO	86 b	8 d	127 d	62 d	14 b	101 b	38 c
NS 8399 IPRO	89 b	10 c	80 e	52 e	12 c	58 d	28 d
NS 7007 IPRO	86 b	7 d	84 e	45 e	12 c	79 c	31 d
NS 7505 IPRO	91 a	11 c	87 e	60 d	12 c	92 c	34 d
Média	90	11	117	62	13	109	39
CV (%)	5,29	17,48	12,41	9,79	16,44	13,24	8,47

Para cada variável, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. ITE-G: Índice de tolerância ao estresse para germinação. ITE-CPA: Índice de tolerância ao estresse para comprimento da parte aérea. ITE-CR = Índice de tolerância ao estresse para comprimento da raiz. ITE-CT: Índice de tolerância ao estresse para comprimento total das plantas. ITE-MSPA: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca da parte aérea. ITE-MSR: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca das raízes. ITE-MST: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca total das plantas.

O comprimento da parte aérea das plantas de soja expostas ao estresse hídrico, representou, em média, apenas 11% do comprimento da parte aérea das plantas do tratamento controle, ao passo que o comprimento das raízes sob condições de estresse hídrico, representou, em média, 117% do comprimento das raízes do tratamento controle (Tabela 2). Estes resultados indicam que o crescimento da parte aérea das plantas de soja foi mais afetado pelas condições de estresse hídrico quando comparado ao crescimento das raízes.

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento total (ITE-CT) das plantas, permitiu classificar as cultivares de soja em cinco grupos; a cultivar TMG 7063 IPRO foi classificada no grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado pelas cultivares HO Cristalino IPRO, BMX Bônus IPRO, NS 8399 IPRO, TMG 2381 IPRO, NS 7007 IPRO e RK 8115 IPRO (Tabela 2).

O índice de tolerância ao estresse para a matéria seca da parte aérea (ITE-MSPA) das plantas expostas ao estresse hídrico, permitiu separar as cultivares de soja em três grupos; o grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado pelas cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 7063 IPRO e ST 777IPRO, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado por 15 cultivares de soja (Tabela 2).

O índice de tolerância ao estresse para a matéria seca das raízes (ITE-MSR) das plantas, permitiu classificar as cultivares de soja em quatro grupos; o grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado pelas cultivares ST 777 IPRO, RK 8317 IPRO e TMG 2383 IPRO, e a cultivar NS 8399 IPRO foi classificada no grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico (Tabela 2). O índice de tolerância ao estresse para a matéria seca total (ITE-MST) das plantas de soja expostas ao estresse hídrico, permitiu classificar as cultivares em quatro grupos; as cultivares TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, ST 777 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas no grupo com maior índice de tolerância ao estresse hídrico, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico foi representado pelas cultivares TMG 2381 IPRO, TMG 2378 IPRO, NS 7505 IPRO, ST 797 IPRO, NS 7007 IPRO e NS 8399 IPRO (Tabela 2).

A identificação de cultivares de soja tolerantes ou suscetíveis aos estresses hídrico com base em apenas um único critério, ou índice de tolerância ao estresse pode ser contraditória (Tabela 2). Por exemplo, de acordo com o ITE-CPA as cultivares de soja TMG 7063 IPRO e 98R35 IPRO foram consideradas tolerantes ao estresse hídrico, enquanto que pelo ITE-MSR, as cultivares TMG 2383 IPRO, ST 777 IPRO e RK 8317 IPRO foram consideradas as mais tolerantes ao estresse hídrico. Portanto, a diferenciação e a separação dos cultivares em diferentes níveis de tolerância aos estresses abióticos deve ser realizada levando-se em consideração todos os índices de tolerância de estresse (NAGHAVI et al., 2013). Com base no exposto, este estudo propôs o aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012), ao separar as 25 cultivares de soja nos seus respectivos quartis com base no valor médio do ranqueamento de cada cultivar.

Considerando todos os índices de tolerância ao estresse hídrico, as cultivares de soja TMG 2383 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, ST 777 IPRO e RK 8317 IPRO ocuparam a melhor classificação média pelo método do ranqueamento e, portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes ao estresse hídrico. As cultivares NS 8399 IPRO e NS 7007 IPRO receberam as maiores pontuações no método do ranqueamento e, assim, foram classificadas como suscetíveis ao estresse hídrico (Tabela 3).

Tabela 3. Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse hídrico para as 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019.

Cultivar	Índice de Tolerância de Estresse (ITE)							\bar{R}	DP_R	Nível de Tolerância [†]
	G	CPA	CR	CT	MSPA	MSR	MST			
TMG 2383 IPRO	9	7	2	3	1	3	7	4,6	2,7	T
TMG 2381 IPRO	14	22	22	23	13	15	20	18,4	3,8	MS
TMG 2378 IPRO	3	25	9	10	25	6	21	14,1	8,2	MS
TMG 7067 IPRO	17	23	5	13	20	7	5	12,9	6,2	MT
TMG 7063 IPRO	1	1	3	1	2	9	1	2,6	2,0	T
TMG 2165 IPRO	5	19	12	12	7	11	6	10,3	3,7	MT
TMG 7061 IPRO	7	8	4	4	9	4	2	5,4	2,2	T
97R50 IPRO	19	12	13	18	23	13	11	15,6	3,8	MS
98R31 IPRO	2	9	10	7	22	16	15	11,6	5,2	MT
98R35 IPRO	12	2	16	5	6	10	9	8,6	3,6	MT
HO Cristalino IPRO	24	13	19	20	11	22	18	18,1	3,6	MS
HO Maracaí IPRO	8	14	18	19	10	19	12	14,3	3,8	MS
HO Paranaíba IPRO	6	15	8	17	19	12	13	12,9	3,6	MT
BMX Foco IPRO	13	4	11	6	4	20	19	11,0	5,4	MT
BMX Bônus IPRO	20	20	17	21	21	5	16	17,1	3,8	MS
ST 777 IPRO	11	3	14	9	3	1	3	6,3	4,3	T
ST 797 IPRO	25	5	20	14	18	23	23	18,3	5,1	MS
RK 8115 IPRO	16	17	25	24	16	14	10	17,4	4,0	MS
RK 6719 IPRO	18	24	15	16	24	17	17	18,7	3,0	MS
RK 7518 IPRO	23	16	6	8	17	8	8	12,3	5,5	MT
RK 8317 IPRO	4	10	1	2	5	2	4	4,0	2,0	T
M 5917 IPRO	21	18	7	11	8	18	14	13,9	4,4	MS
NS 8399 IPRO	15	11	24	22	14	25	25	19,4	5,2	S
NS 7007 IPRO	22	21	23	25	15	24	24	22,0	2,3	S
NS 7505 IPRO	10	6	21	15	12	21	22	15,3	5,2	MS

[†] T = refere-se a uma cultivar de soja tolerante ao estresse hídrico, recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 7,0; MT = cultivar moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 7,1 a 13,0; MS = cultivar moderadamente suscetível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 13,1 a 19,0; S = cultivar de soja suscetível ao estresse hídrico com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 19,1 a 25.

A análise multivariada de agrupamento hierárquico das 25 cultivares, com base em todos os índices de tolerância ao estresse hídrico, resultou no enquadramento das cultivares de

soja em quatro grupos com 4, 3, 8 e 10 cultivares, respectivamente (Figura 2). O primeiro grupo foi representado pelas cultivares com os maiores índices de tolerância ao estresse e, portanto, foi considerado o grupo mais tolerante as condições de estresse hídrico. O segundo e o quarto grupo representaram as cultivares com valores intermediários de índices de tolerância e, por isso, foram classificadas como moderadamente tolerantes e moderadamente suscetíveis ao estresse hídrico, respectivamente. Por sua vez, o terceiro grupo representou as cultivares com os menores índices de tolerância e, portanto, as cultivares pertencentes a este grupo são as mais suscetíveis aos efeitos negativos do estresse hídrico (grupo suscetível).

Diante do exposto, pelo dendograma da análise de agrupamento hierárquico as cultivares de soja ST 777 IPRO, TMG 7061 IPRO, TMG 2383 IPRO e RK 8317 IPRO foram identificadas como as mais tolerantes ao estresse hídrico, ao passo que as cultivares TMG 2381 IPRO, RK 8115 IPRO, HO Maracaí IPRO, NS 7505 IPRO, HO Cristalino IPRO, ST 797 IPRO, NS 8399 IPRO e NS 7007 IPRO foram classificadas como as mais suscetíveis ao estresse hídrico (Figura 2).

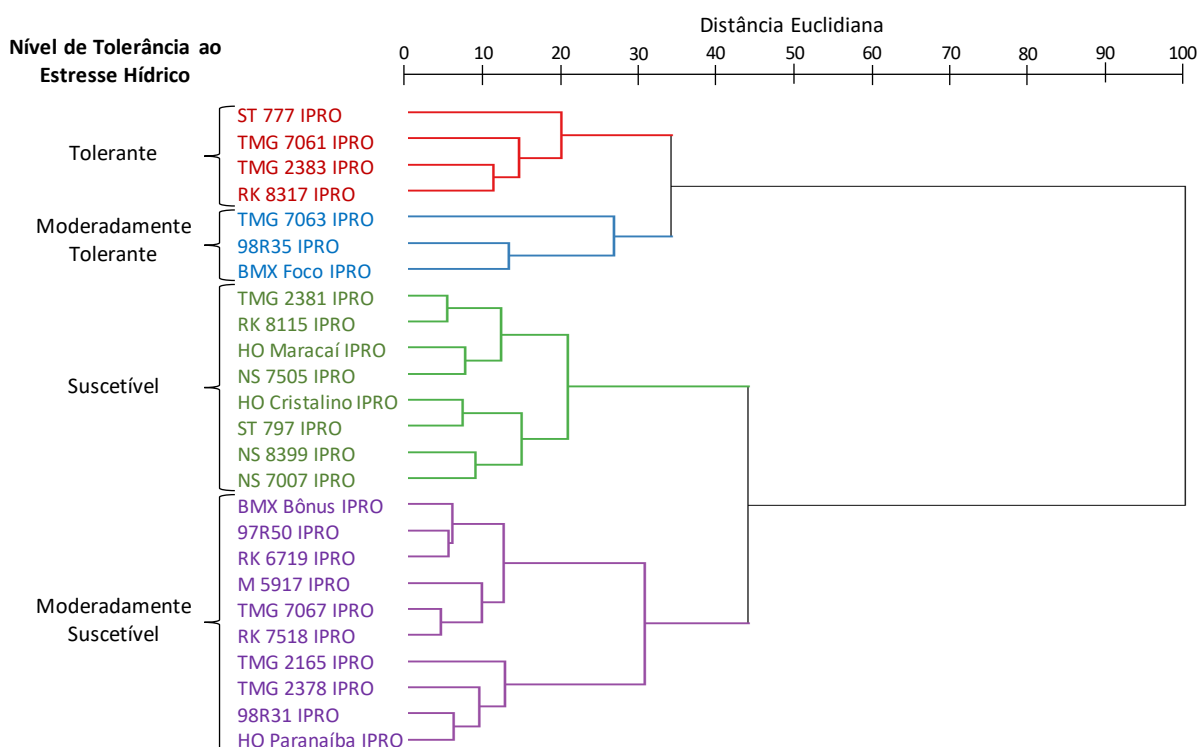


Figura 2. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando os índices de tolerância ao estresse hídrico (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST).

O primeiro componente principal explica 80,23% da variação total (Figura 3). Os índices de tolerância ao estresse hídrico para o comprimento da raiz (ITE-CR) e para a matéria seca das raízes (ITE-MSR), possuem pesos negativamente altos no primeiro componente principal, $-0,775$ e $-0,544$, respectivamente. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância, menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, a cultivar pode ser considerada tolerante ao estresse hídrico. Por sua vez, os índices de tolerância ao estresse para a germinação (ITE-G), comprimento da parte aérea (ITE-CPA) e matéria seca da parte aérea (ITE-MSPA) praticamente não afetam o primeiro componente principal, em virtude do seu peso ser muito baixo, $-0,049$, $-0,048$ e $-0,039$, respectivamente.

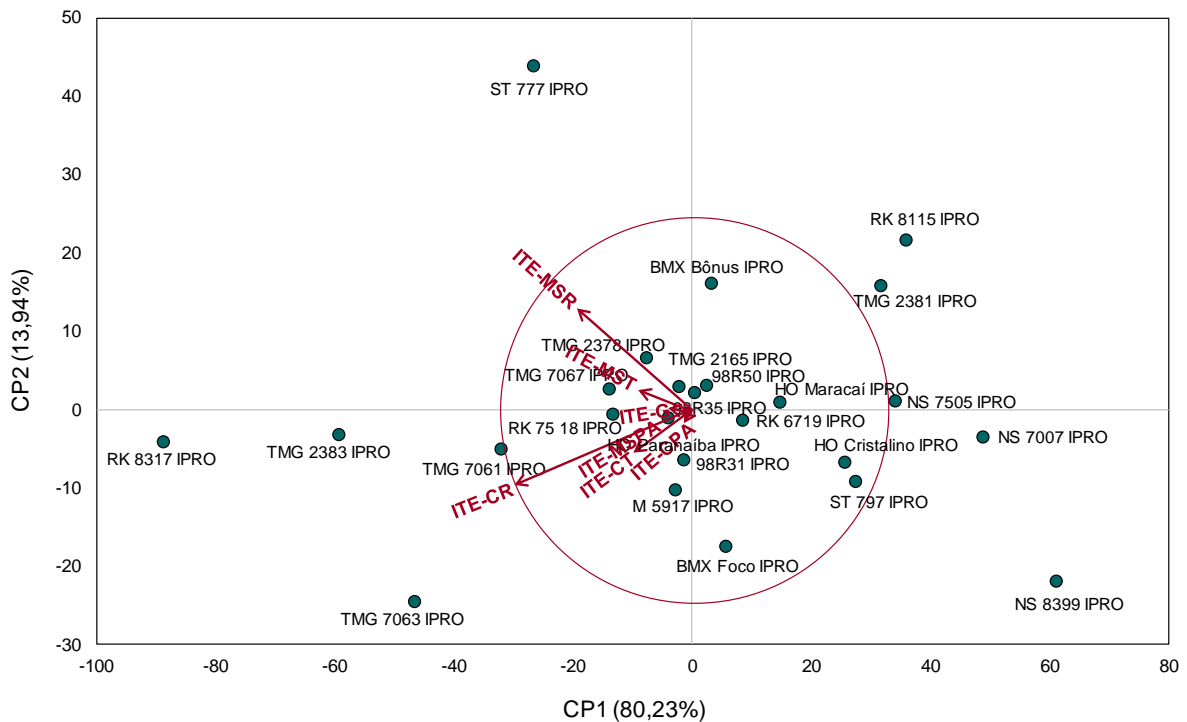


Figura 3. Diagrama biplot com base no primeiro e segundo componente principal dos índices de tolerância ao estresse hídrico (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST).

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância das cultivares de soja ao estresse hídrico. Em virtude dos pesos serem negativos, quanto maiores forem os índices de tolerância ao estresse hídrico, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância da cultivar de soja. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância da cultivar é melhor. Para as cultivares de soja RK 8317 IPRÔ, TMG 2383 IPRÔ, TMG 7063 IPRÔ, TMG 7061 IPRÔ e ST 777 IPRÔ registraram-se os melhores índices de desempenho global, e,

portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes ao estresse hídrico. Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram observados nas cultivares de soja NS 8399 IPRO, NS 7007IPRO, NS 7505 IPRO, RK 8115 IPRO e TMG 2381 IPRO, e assim, estas cultivares foram classificadas como suscetíveis ao estresse hídrico.

Os menores escores do primeiro componente principal, obtidos para o ITE-CR e ITE-MSR, indicam que os índices de tolerância ao estresse hídrico baseados nas características morfológicas das raízes, como comprimento e matéria seca das raízes, são mais sensíveis e adequados para identificar e diferenciar os cultivares de soja quanto a tolerância ao estresse hídrico.

Em síntese, os três métodos de agrupamento utilizados (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal), classificaram as cultivares de soja RK 8317 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7063 IPRO e ST 777 IPRO como tolerantes ao estresse hídrico (Tabela 3, Figuras 2 e 3), ao passo que a cultivar TMG 7063 IPRO foi classificada como tolerante ao estresse hídrico pelos métodos do ranqueamento e análise dos componentes principais (Tabela 3 e Figura 3). Portanto, são as cultivares mais indicadas para serem utilizadas em condições de baixa disponibilidade de água no solo no momento da semeadura.

Os métodos do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais agruparam, respectivamente, 2, 8 e 5 cultivares de soja como suscetíveis ao estresse hídrico (Tabela 3, Figuras 2 e 3). As cultivares de soja NS 8399 IPRO e NS 7007IPRO foram classificadas como suscetíveis ao estresse hídrico pelos três métodos utilizados. Por sua vez, as cultivares NS 7505 IPRO, RK 8115 IPRO e TMG 2381 IPRO foram agrupadas como suscetíveis ao estresse hídrico pela análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais (Figuras 2 e 3). Portanto, quando a semeadura da soja for realizada em condições de baixa disponibilidade de água no solo estas cultivares não devem ser recomendadas para a semeadura.

1.3.2 Efeito do estresse salino na germinação e no crescimento das plântulas

O índice de tolerância ao estresse para a germinação (ITE-G) permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos distintos, sendo que o grupo com maior índice de tolerância ao estresse salino foi representado pelas cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 2378 IPRO, M 5917 IPRO, ST 777IPRO, 98R31 IPRO e 98R35 IPRO. Por sua vez, as cultivares HO Cristalino IPRO, HO Maracaí IPRO e HO Paranaíba IPRO foram agrupadas no grupo de menor índice de tolerância ao estresse salino (Tabela 4).

O índice de tolerância ao estresse para a germinação das sementes em condições de estresse salino (Tabela 4), foi semelhante ao índice de tolerância ao estresse em condições de estresse hídrico (Tabela 2). Esses resultados sugerem que a salinidade e o estresse hídrico resultaram em efeitos similares no processo de germinação das sementes de soja.

Tabela 4. Índices de tolerância ao estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas ao estresse salino

Cultivar	ITE-G	ITE-CPA	ITE-CR	ITE-CT	ITE-MSPA	ITE-MSR	ITE-MST
----- (%) -----							
TMG 2383 IPRO	95 a	82 a	92 a	86 a	94 a	124 a	99 a
TMG 2381 IPRO	87 b	55 c	52 c	53 c	74 b	81 c	76 b
TMG 2378 IPRO	93 a	60 b	69 b	64 b	87 a	99 b	90 a
TMG 7067 IPRO	88 b	63 b	72 b	67 b	88 a	119 a	97 a
TMG 7063 IPRO	90 b	52 c	69 b	59 c	90 a	106 b	95 a
TMG 2165 IPRO	83 c	62 b	82 b	72 b	75 b	97 b	82 b
TMG 7061 IPRO	85 b	55 c	56 c	56 c	72 b	101 b	82 b
97R50 IPRO	91 b	63 b	83 b	72 b	82 a	116 a	92 a
98R31 IPRO	96 a	71 a	89 a	80 a	83 a	100 b	88 a
98R35 IPRO	94 a	66 b	77 b	72 b	84 a	121 a	94 a
HO Cristalino IPRO	74 d	42 d	51 c	46 d	61 c	74 c	65 c
HO Maracaí IPRO	76 d	38 d	66 b	52 c	86 a	106 b	91 a
HO Paranaíba IPRO	74 d	35 d	52 c	42 d	57 c	76 c	62 c
BMX Foco IPRO	89 b	46 d	47 c	46 d	63 c	77 c	67 c
BMX Bônus IPRO	87 b	48 c	72 b	58 c	76 b	96 b	81 b
ST 777 IPRO	95 a	63 b	74 b	68 b	86 a	121 a	93 a
ST 797 IPRO	89 b	66 b	95 a	82 a	78 b	95 b	83 b
RK 8115 IPRO	83 c	56 c	75 b	66 b	87 a	91 c	88 a
RK 6719 IPRO	90 b	52 c	73 b	62 b	78 b	100 b	85 b
RK 7518 IPRO	81 c	58 b	58 c	58 c	72 b	91 c	78 b
RK 8317 IPRO	86 b	66 b	84 b	73 b	86 a	69 c	82 b
M 5917 IPRO	94 a	68 b	107 a	85 a	96 a	94 b	95 a
NS 8399 IPRO	87 b	41 d	46 c	44 d	44 d	65 c	51 d
NS 7007 IPRO	90 b	54 c	75 b	64 b	90 a	87 c	89 a
NS 7505 IPRO	86 b	55 c	36 c	43 d	87 a	83 c	85 b
Média	87	57	70	63	79	96	83
CV (%)	5,59	12,51	16,75	10,99	10,98	15,25	8,81

Para cada variável, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. ITE-G: Índice de tolerância ao estresse para germinação. ITE-CPA: Índice de tolerância ao estresse para comprimento da parte aérea. ITE-CR = Índice de tolerância ao estresse para comprimento da raiz. ITE-CT: Índice de tolerância ao estresse para comprimento total das plantas. ITE-MSPA: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca da parte aérea. ITE-MSR: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca das raízes. ITE-MST: Índice de tolerância ao estresse para matéria seca total das plantas.

Resultados diferentes foram reportados por Soares et al. (2015), os quais mostraram que a germinação das sementes de soja é mais afetada pelo estresse salino induzido por NaCl do que pelo estresse hídrico induzido por manitol. Segundo os autores, isso ocorreu porque a salinidade, além de inibir a taxa de germinação das sementes pela redução do potencial hídrico, também pode causar efeitos fitotóxicos específicos devido à absorção dos íons Na^+ e Cl^- (ACOSTA-MOTOS et al., 2017). No entanto, este efeito não foi observado neste estudo com a utilização soluções de PEG-600 e NaCl na concentração de $-0,30$ MPa.

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento da parte aérea (ITE-CPA) permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos; as cultivares TMG 2383 IPRO e 98R31 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância ao estresse salino, ao passo que as cultivares HO Cristalino IPRO, HO Maracaí IPRO, HO Paranaíba IPRO, BMX Foco IPRO e NS 8399 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância ao estresse salino. O índice de tolerância ao estresse para o comprimento radicular (ITE-CR) permitiu enquadrar as cultivares em três grupos, sendo que as cultivares TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, ST 797 IPRO e M 5917 IPRO foram classificadas no grupo de maior índice de tolerância ao estresse salino, ao passo que o grupo de menor índice de tolerância ao estresse salino foi representado pelas cultivares TMG 2381 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Cristalino IPRO, HO Paranaíba IPRO, BMX Foco IPRO, RK 7518 IPRO, NS 8399 IPRO e NS 7505 IPRO (Tabela 4).

O ITE-CPA em condições de estresse hídrico variou 6 a 29% (Tabela 2), ao passo que em condições de estresse salino o ITE-CPA variou de 35 a 82% (Tabela 4). Por sua vez, o ITE-CR em condições de estresse hídrico variou de 80 a 193% (Tabela 3), e em condições de estresse salino variou de 36 a 107% (Tabela 4). Em condições de estresse hídrico e salino, o comprimento da parte aérea das plantas representou, em média, apenas 11% e 57% do comprimento da parte aérea das plantas do tratamento controle. Por sua vez, o comprimento das raízes sob condições de estresse hídrico e salino representou, em média, 117% e 70% do comprimento das raízes do tratamento controle. Estes resultados indicam que o crescimento da parte aérea das plantas de soja foi mais afetado pelas condições de estresse hídrico, ao passo que o crescimento das raízes de soja foi mais afetado pelas condições de estresse salino.

Diversos estudos reportaram que os efeitos adversos do estresse hídrico são mais pronunciados no crescimento da parte aérea do que no crescimento das raízes das plantas (MUT & AKAY, 2010, SHAHI et al., 2015, STEINER et al., 2017). O maior crescimento das raízes das plantas de soja observado em condições de estresse hídrico deve ter ocorrido como uma resposta das plantas às condições de menor disponibilidade hídrica. Durante a exposição aos estresses abióticos, as plantas exibem uma ampla gama de respostas em níveis molecular,

genético e celular, incluindo alterações fisiológicas, morfológicas e de desenvolvimento (inibição do crescimento da parte aérea e aumento do crescimento do sistema radicular), além de alterações nas vias metabólicas (síntese de osmólitos e de enzima antioxidante e degradação de proteínas) (ROYCHOUDHURY et al., 2013). Portanto, o aumento do crescimento das raízes em condições de estresse hídrico pode melhorar a aquisição de água e nutrientes das plantas, e constitui um dos mecanismos típicos de tolerância ou resistência das plantas à restrição hídrica (LI et al., 2011). Por sua vez, o menor crescimento das raízes em condições de salinidade pode estar relacionado a redução da expansão, e conseqüentemente do alongamento celular, tendo em vista que o estresse salino além de promover o estresse osmótico, simulando uma condição de restrição hídrica, também promove efeito fitotóxico causado pela presença dos íons Na^+ e Cl^- no protoplasma das células (ACOSTA-MOTOS et al., 2017).

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento total (ITE-CT) das plântulas de soja permitiu classificar as cultivares em quatro grupos de tolerância; as cultivares TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, ST 797 IPRO e M 5917 IPRO foram enquadradas no grupo com maior índice de tolerância ao estresse salino, e as cultivares HO Cristalino IPRO, HO Paranaíba IPRO, BMX Foco IPRO, NS 8399 IPRO e NS 7505 IPRO ficaram restritas ao grupo de menor índice de tolerância ao estresse salino (Tabela 4). O comprimento total das plântulas de todas as cultivares de soja foi inibido pelas condições de estresse hídrico e salino, o que foi evidenciado pelos valores de ITE-CT, menores que 100% (Tabelas 2 e 4). O menor crescimento das plantas de soja provocado pelos estresses abióticos é causada pela redução da expansão celular (TAIZ et al., 2017). Ao reduzir a pressão de turgor, o estresse osmótico suprime a expansão e o crescimento celular, afetando o metabolismo, crescimento e estabelecimento das plântulas (JALEEL et al. 2009).

O ITE-MSPA permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos, sendo que o grupo com maior índice de tolerância ao estresse salino foi representado por 14 cultivares de soja, e a cultivar NS 8399 IPRO ficou restrita ao grupo com menor índice de tolerância ao estresse hídrico (Tabela 4). O ITE-MSR permitiu agrupar as cultivares de soja em três grupos; as cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 7067 IPRO, 97R50 IPRO, 98R35 IPRO e ST 777 IPRO foram enquadradas no grupo de maior índice de tolerância ao estresse salino, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse salino foi representado por 10 cultivares de soja (Tabela 4). O ITE-MST permitiu classificar as cultivares de soja em quatro grupos de tolerância; o grupo com maior índice de tolerância ao estresse salino foi representado por 12 cultivares de soja, e a cultivar NS 8399 IPRO foi enquadrada no grupo com menor índice de tolerância ao estresse salino (Tabela 4).

Considerando todos os índices de tolerância, o método do ranqueamento agrupou, respectivamente, 5, 9, 7 e 4 cultivares de soja como tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e suscetíveis ao estresse salino (Tabela 5). Para as cultivares de soja TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO e M 5917 IPRO se registrou pontuação média inferior a 7,0, sendo por isso classificadas como tolerantes ao estresse salino. Por sua vez, as cultivares HO Cristalino IPRO, HO Paranaíba IPRO, BMX Foco IPRO e NS 8399 IPRO foram classificadas como suscetíveis ao estresse salino, em virtude do registro quanto à pontuação média do ranqueamento (\bar{R}), maior que 19,1 (Tabela 5).

Tabela 5. Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse salino para as 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019.

Cultivar	Índice de Tolerância de Estresse (ITE)							\bar{R}	DP_R	Nível de Tolerância [†]
	G	CPA	CR	CT	MSPA	MSR	MST			
TMG 2383 IPRO	2	1	3	1	2	1	1	1,6	0,7	T
TMG 2381 IPRO	14	16	20	19	19	20	21	18,4	2,0	MS
TMG 2378 IPRO	6	11	16	13	7	11	9	10,4	2,7	MT
TMG 7067 IPRO	13	9	13	10	5	4	2	8,0	3,7	MT
TMG 7063 IPRO	9	18	15	15	3	7	4	10,1	5,0	MT
TMG 2165 IPRO	21	10	7	6	18	12	16	12,9	4,7	MT
TMG 7061 IPRO	19	14	19	18	21	8	18	16,7	3,3	MS
97R50 IPRO	7	8	6	7	14	5	8	7,9	1,8	MT
98R31 IPRO	1	2	4	4	13	9	12	6,4	4,2	T
98R35 IPRO	5	6	8	8	12	2	5	6,6	2,4	T
HO Cristalino IPRO	25	22	21	22	22	23	23	22,6	0,9	S
HO Maracaí IPRO	23	24	17	20	11	6	7	15,4	6,4	MS
HO Paranaíba IPRO	24	25	20	25	24	22	24	23,4	1,4	S
BMX Foco IPRO	11	21	22	21	22	21	22	20,0	2,6	S
BMX Bônus IPRO	15	20	14	16	17	13	19	16,3	2,0	MS
ST 777 IPRO	3	7	11	9	9	3	6	6,9	2,4	T
ST 797 IPRO	12	4	2	3	16	14	15	9,4	5,5	MT
RK 8115 IPRO	20	13	9	11	8	17	11	12,7	3,4	MT
RK 6719 IPRO	10	19	12	14	15	10	14	13,4	2,4	MS
RK 7518 IPRO	22	12	18	17	20	16	20	17,9	2,4	MS
RK 8317 IPRO	17	5	5	5	10	24	17	11,9	6,4	MT
M 5917 IPRO	4	3	1	2	1	15	3	4,1	3,1	T
NS 8399 IPRO	16	23	23	23	25	25	25	22,9	2,0	S
NS 7007 IPRO	8	17	10	12	4	18	10	11,3	3,8	MT
NS 7505 IPRO	18	15	24	24	6	19	13	17,0	4,9	MS

[†] T = refere-se a uma cultivar de soja tolerante ao estresse salino, recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 7,0; MT = cultivar moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 7,1 a 13,0; MS = cultivar moderadamente suscetível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 13,1 a 19,0; S = cultivar de soja suscetível ao estresse salino com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 19,1 a 25.

A análise multivariada de agrupamento hierárquico das 25 cultivares, com base em todos os índices de tolerância de estresse salino, agrupou as cultivares de soja em quatro grupos contendo 4, 8, 8 e 5 cultivares (Figura 3). O primeiro grupo representou as cultivares com os menores índices de tolerância de estresse e, portanto, foi considerado o grupo das cultivares suscetíveis ao estresse salino. O segundo grupo representou as cultivares com os maiores índices de tolerância ao estresse e, assim, foram classificadas como as cultivares tolerantes ao estresse salino. Por sua vez, o terceiro e quarto grupo representou as cultivares com valores intermediários dos índices de tolerância ao estresse e, portanto, as cultivares pertencentes a esses grupos foram classificadas como moderadamente tolerante e moderadamente suscetível à salinidade.

Diante do exposto, as cultivares de soja TMG 7067 IPRO, 98R50 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO, TMG 2383 IPRO, M 5917 IPRO, 98R31 IPRO e ST 797 IPRO foram classificadas como as mais tolerantes ao estresse salino, ao passo que as cultivares HO Cristalino IPRO, HO Paranaíba IPRO, BMX Foco IPRO e NS 8399 IPRO foram classificadas como as mais suscetíveis ao estresse salino (Figura 1).

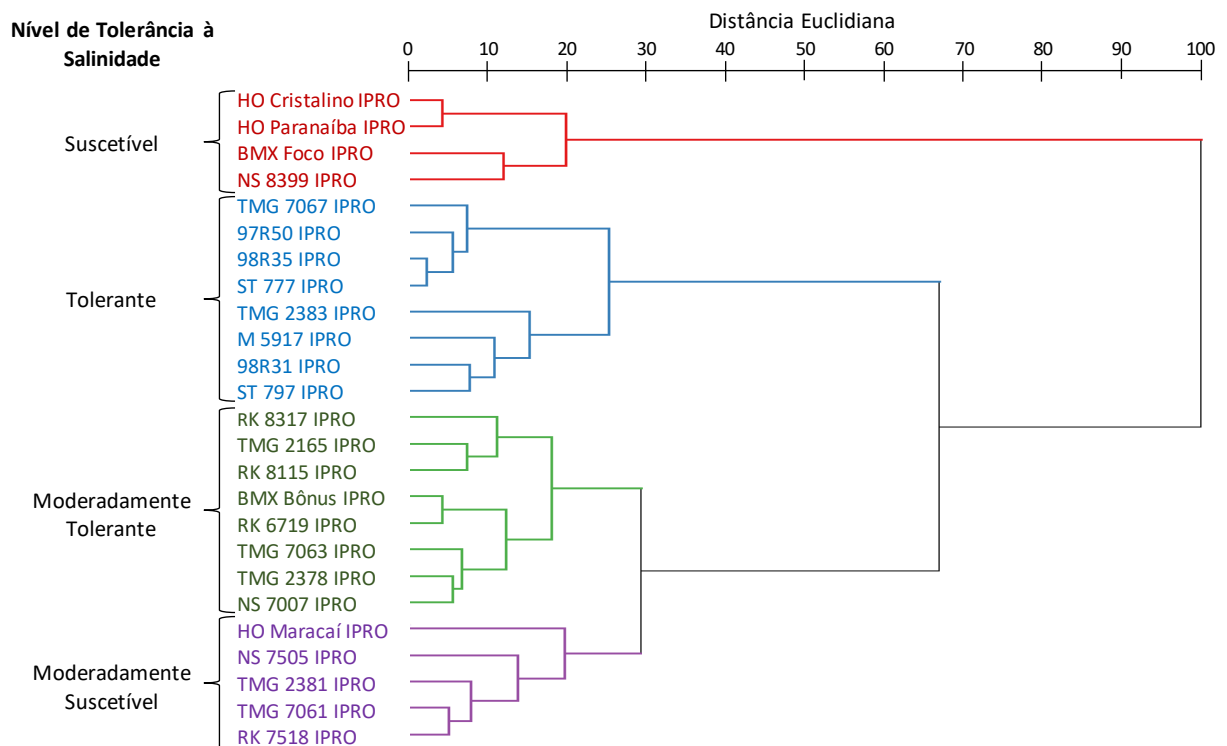


Figura 4. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando os índices de tolerância ao estresse salino (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST).

ao estresse salino (Tabela 5, Figuras 4 e 5). Além destas, as cultivares ST 797 IPRO e TMG 7067 IPRO também foram classificadas como tolerante ao estresse salino pelos métodos da análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais (Figuras 4 e 5). Portanto, são as cultivares mais indicadas para serem utilizadas em condições de baixa disponibilidade de água no solo no momento da semeadura. Por outro lado, as cultivares de soja NS 8399 IPRO, HO Paranaíba IPRO, HO Cristalino IPRO e BMX Foco IPRO foram classificadas como suscetíveis ao estresse salino pelos três métodos utilizados e, portanto, estas cultivares de não devem ser recomendadas para a semeadura em condições de solos salinos.

1.4. CONCLUSÕES

As cultivares de soja RK 8317 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO e ST 777 IPRO foram classificadas com maior tolerância ao estresse hídrico, e são as mais indicadas para serem semeadas em condições de baixa disponibilidade de água no solo.

As cultivares de soja NS 8399 IPRO, NS 7007 IPRO, NS 7505 IPRO, RK 8115 IPRO e TMG 2381 IPRO possuem maior susceptibilidade ao estresse hídrico, e não devem ser recomendadas em condições de reduzida disponibilidade de água no solo, com distribuição pluviométrica errática e limitada.

As cultivares TMG 2383 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, ST 777 IPRO, M5917 IPRO, ST 797 IPRO e TMG 7067 foram classificadas por apresentar maior maior tolerância à salinidade, e as cultivares NS 8399 IPRO, HO Paranaíba IPRO, HO Cristalino IPRO e BMX Foco IPRO são classificadas como suscetíveis à salinidade, e não devem ser recomendadas para o cultivo em solos salinos.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA-MOTOS, J.R.; ORTUÑO, M. F.; BERNAL-VICENTE, A.; DIAZ-VIVANCOS, P.; SANCHEZ-BLANCO, M. J.; HERNANDEZ, J. A. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, v. 7, p. 1-18; 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, v. 5, Safra 2017/18, n. 7, 2019.

DICKIE, A., MAGNO, I., GIAMPIETRO, J., DOLGINOW, A. **Challenges and opportunities for conservation, agricultural production, and social inclusion in the Cerrado biome.** California Environmental Associates (CEA): San Francisco, CA-USA. 2016, 51p.

FARSHADFAR, E.; POURSHAHBIDI, M. M.; ABOOGHADAREH, A. R. P. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 13, p.891-903, 2012.

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

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados.** Fortaleza, INCT Sal. 472p. 2010.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and process.** New York: Academic Press, 1971. 288p.

IBRAHIM, E.A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. **Journal of Plant Physiology**, v.192, p.38-46, 2016.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H.J.; SOMASUNDARAM, R. PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture Biology**, v. 11, n. 1, p. 100-105, 2009.

LI, F. L.; BAO, W. K.; WU, N. Morphological, anatomical and physiological responses of *Campyloctropis polyantha* (Franch.) Schindl. seedlings to progressive water stress. **Scientia Horticulturae**, v. 127, n. 4, p. 436-443, 2011.

MUT, Z.; AKAY, H. Effect of seed size and drought stress on germination and seedling growth of naked oat (*Avena sativa* L.). **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 16, n. 4, p. 459-467, 2010.

NAGHAVI, M. R.; POUR-ABOUGHADAREH, A.; KHALILI, M. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v.5, n.3, p.388-393, 2013.

PARTHEEBAN, C.; CHANDRASEKHAR, C.N.; JEYAKUMAR, P.; RAVIKESAVAN, R.; GNANAM, R. Effect of PEG Induced Drought Stress on Seed Germination and Seedling Characters of Maize (*Zea mays* L.) Genotypes. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 5, p. 1095-1104, 2017.

PATANÈ, C.; SAITA, A.; SORTINO, O. Comparative effects of salt and water stress on seed germination and early embryo growth in two cultivars of sweet sorghum. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.199, p. 30-37, 2013.

PETROVIĆ, G.; JOVIČIĆ, D.; NIKOLIĆ, Z.; TAMINDŽIĆ, G.; IGNJATOV, M.; MILOŠEVIĆ, D.; MILOŠEVIĆ, B. Comparative study of drought and salt stress effects on germination and seedling growth of pea. **Genetika**, v. 48, n.1, 373-381, 2016.

ROYCHOUDHURY, A.; PAUL, S.; BASU, S. Cross-talk between abscisic acid-dependent and abscisic acid-independent pathways during abiotic stress. **Plant Cell Reports**, v. 32, n. 7, p. 985-1006, 2013.

SHAHI, C.V.; BARGALI, K.; BARGALI, S. S. How seed size and water stress affect the seed germination and seedling growth in wheat varieties? **Current Agriculture Research Journal**, v. 3, n. 1, p. 60-68, 2015.

SOARES, M. M.; SANTOS JUNIOR, HAMILTON C.; SIMÕES, M. G.; PAZZIN, D.; SILVA, L. J. Estresse hídrico e salino em sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 4, p. 370-378, 2015

STEINER, F.; ZUFFO, A. M.; ZOZ, T.; ZOZ, A.; ZOZ, J. Drought tolerance of wheat and black oat crops at early stages of seedling growth. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 576-586, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

ZOZ, T.; STEINER, F.; GUIMARÃES, V.F.; CASTAGNARA, D.D.; MEINERZ, C.C.; FEY, R. Peroxidase activity as an indicator of water deficit tolerance in soybean cultivars. **Bioscience Journal**, v. 29, Supplement 1, p. 1664-1671, 2013.

CAPÍTULO 2. TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE SOJA À TOXICIDADE POR ALUMÍNIO

RESUMO: As cultivares de soja apresentam distintos níveis de tolerância aos efeitos tóxicos do alumínio (Al^{3+}) e a exploração dessa característica é importante para o uso de solos ácidos da região do Cerrado. Esta pesquisa foi realizada para investigar os efeitos do alumínio na germinação e no crescimento inicial de 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] pelo método do papel-solução, e identificar os cultivares mais tolerantes e suscetíveis à toxicidade de Al^{3+} . À toxicidade de alumínio foi imposta pela exposição das sementes à uma solução diluída contendo $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} , combinada com $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ de cálcio. O pH da solução contendo Al^{3+} foi ajustado para 4,3 com $\text{HCl } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Na distribuição das unidades experimentais, utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado, sendo adotadas quatro repetições; cada unidade experimental foi composta por 50 sementes. Os tratamentos foram avaliados com base nos índices de tolerância ao estresse (ITE) para a germinação das sementes, comprimento e matéria seca das plântulas. A toxicidade por Al^{3+} reduziu a taxa de germinação e o crescimento inicial de todas as 25 cultivares de soja; as cultivares TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO foram consideradas como as mais indicadas para serem cultivadas em solos ácidos por apresentarem maior tolerância à toxicidade de alumínio, e as cultivares RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 IPRO foram classificadas como suscetíveis à toxicidade do alumínio, e não devem ser recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

PALAVRA-CHAVE: *Glycine max* (L.) Merrill., acidez do solo, acidez trocável, índice de tolerância.

TOLERANCE OF SOYBEAN CULTIVARS TO ALUMINUM TOXICITY

ABSTRACT: Soybean cultivars have different levels of tolerance to aluminum phytotoxic effects (Al^{3+}) and the exploitation of this characteristic is important for the use of acidic soils in the Cerrado region. This research was conducted to investigate the effects of aluminum on germination and initial growth of 25 soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivars by the paper-solution method, and to identify the most tolerant and susceptible cultivars of Al^{3+} . Aluminum toxicity was imposed by exposure of the seeds to a dilute solution containing $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Al^{3+} combined with $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ of calcium. The pH of the Al^{3+} containing solution was adjusted to 4.3 with 0.5 mol L^{-1} HCl . The experimental design was completely randomized

with four replications of 50 seeds. The treatments were evaluated based on stress tolerance indices (STI) for seed germination, seedling length and dry matter. The Al^{3+} toxicity reduced the germination rate and initial growth of all 25 soybean cultivars. The cultivars TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO and NS 7505 IPRO are the most suitable cultivars to be grown in acidic soils because they have higher tolerance to aluminum toxicity, and the cultivars RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO. and ST 777 IPRO are classified as susceptible to aluminum toxicity and should not be recommended for cultivation in acidic soils.

KEY WORDS: *Glycine max* (L.) Merrill., soil acidity, exchangeable acidity, tolerance index.

2.1 INTRODUÇÃO

A toxicidade por alumínio (Al), comum em solos ácidos, é considerada um dos principais fatores que limitam o crescimento das plantas e a produção agrícola, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. Os solos ácidos representam cerca de 30% da área total do planeta e 50% das áreas agrícolas do mundo, prejudicando a expansão do cultivo de plantas destinadas a produção de alimentos, fibras e combustíveis (SADE et al., 2016).

A maioria dos solos do Cerrado são ácidos com pH inferior a 5,5, possuem baixa capacidade de troca de cátions, baixa fertilidade natural, e elevada saturação por alumínio tóxico (Al^{3+}), que podem prejudicar o desenvolvimento das plantas (MIGUEL et al., 2010). No entanto, os níveis fitotóxicos por Al nos solos podem variar em função do tipo de solo, da composição química dos minerais, do teor de matéria orgânica e do estágio de intemperização (TANDZI et al., 2018).

A acidificação do solo pode ocorrer devido a processos naturais e, ou antropogênicos (BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al., 2017). A maioria dos solos ácidos ocorrem nas regiões tropicais e subtropicais, onde a acidificação é um processo natural. Esse processo de acidificação natural ocorre devido a dissociação parcial do gás carbônico do ar na água da chuva, a remoção e lixiviação de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e de ânions cloreto, nitrato e sulfato do solo, fixação biológica de nitrogênio e a mineralização de compostos orgânicos no solo. No entanto, a acidificação do solo pode ser agravada pela reação de alguns fertilizantes minerais no solo que liberam H^+ , especialmente os fertilizante nitrogenados.

O Al na forma trocável e, portanto, em equilíbrio com o Al^{3+} na solução do solo é o maior problema para a produtividade de culturas em solos ácidos. A presença de Al trocável no solo é resultado de processos de intemperismo que atuam sobre os minerais de rochas, produzindo Al^{3+} e ácido salicíco. Este último é removido do meio por percolação, ao passo que o Al^{3+} permanece ligado às superfícies das partículas carregadas negativamente. O Al^{3+} na

solução do solo torna-se disponível para às plantas e, então, resulta em efeitos fitotóxicos nas plantas (KOPITTKE et al., 2015). A compreensão e a seleção de espécies e, ou genótipos menos suscetíveis aos efeitos deletérios do Al^{3+} , são uma alternativa para potencializar a produção agrícola das culturas cultivadas em condições de solos ácidos.

O principal efeito da toxicidade do Al na planta é a inibição do crescimento das raízes, como resultado da alteração de diferentes mecanismos e estruturas celulares. Existem diferentes graus de tolerância à toxicidade do Al entre as espécies e genótipos de plantas (MENOSSO et al., 2000; BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al., 2017), que em muitas espécies vegetais é devido ao controle genético (RAMPIM, LANA, 2013). O Al afeta a síntese de DNA e a regulação de proteínas que controlam o ciclo celular (ACHARY et al., 2013), portanto, a toxicidade do Al manifesta-se, inicialmente, pela drástica redução da taxa de alongação das raízes (KOPITTKE et al., 2015) e, posteriormente, induz a redução no crescimento da parte aérea devido a inibição da absorção de água e nutrientes, especialmente fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (STEINER et al., 2012). Os efeitos fitotóxicos do Al nas raízes incluem a redução no número e no comprimento de raízes laterais, redução na matéria seca e menor área de exploração das raízes, e frequentemente está associado ao aumento no diâmetro médio das raízes (espessamento) e no volume radicular (RAMPIM, LANA, 2013; KOPITTKE et al., 2015; SADE et al., 2016).

Os mecanismos envolvidos na tolerância diferencial entre as espécies e genótipos de plantas estão associados: aos mecanismos de exclusão ou amenização da absorção de Al^{3+} pelas raízes por meio da alteração do pH da rizosfera, excreção de moléculas quelantes, secreção de mucilagem, alívio da toxicidade de Al com auxina, malato, dentre outros elementos, e também pela presença de estruturas de cobertura no ápice raiz e por mecanismos de tolerância interna ao estresse por Al promovida pela quelatização de Al no citoplasma e modificação do metabolismo das plantas (TAHARA et al., 2014; BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al., 2017).

A germinação das sementes e o estabelecimento das plantas são potencialmente os estádios mais críticos do ciclo de vida das plantas, e a toxicidade por Al pode limitar o estabelecimento das plantas no campo e, conseqüentemente, a produtividade das culturas. Portanto, a identificação de genótipos de soja com maior tolerância à toxicidade por Al é importante para o estabelecimento das plantas cultivadas em solos ácidos do Cerrado. Esta pesquisa foi realizada para avaliar a tolerância de 25 cultivares comerciais de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] à toxicidade por Al durante as fases de germinação e crescimento inicial das plantas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Material Vegetal e Tratamentos

Sementes de um total de 25 cultivares comerciais de soja para a região Centro-Oeste do Brasil foram adquiridas diretamente das empresas detentoras do seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Previamente foram determinados: o teor de água, a massa de mil sementes e a taxa de germinação, seguindo a metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes – RAS (BRASIL, 2009). As principais características agronômicas e intrínsecas das sementes de soja estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Características agronômicas, teor de água, massa de mil sementes e germinação das 25 cultivares de soja utilizadas no estudo

Cultivar	Características Agronômicas			Teor de água (%)	Massa de 1000 sementes (g)	Germinação (%)
	Ciclo médio ¹	GMR	Tipo de crescimento			
TMG 2383 IPRO	120	8,3	Semideterminado	9,51	175	87
TMG 2381 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,77	160	100
TMG 2378 IPRO	125	7,8	Semideterminado	8,96	165	96
TMG 7067 IPRO	112	7,2	Semideterminado	9,87	170	100
TMG 7063 IPRO	110	7,0	Indeterminado	9,75	175	86
TMG 2165 IPRO	112	6,5	Indeterminado	9,14	180	98
TMG 7061 IPRO	110	6,1	Indeterminado	10,17	185	98
97R50 IPRO	115	7,5	Indeterminado	8,15	190	100
98R31 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,89	175	97
98R35 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,57	180	98
HO Cristalino IPRO	125	8,3	Indeterminado	8,93	160	100
HO Maracaí IPRO	120	7,7	Indeterminado	9,60	170	87
HO Paranaíba IPRO	115	7,4	Indeterminado	9,75	210	93
BMX Foco IPRO	110	7,2	Indeterminado	9,11	175	83
BMX Bônus IPRO	120	7,9	Indeterminado	9,42	185	100
ST 777 IPRO	108	7,7	Indeterminado	9,41	155	100
ST 797 IPRO	110	7,9	Indeterminado	9,45	150	100
RK 8115 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,02	200	96
RK 6719 IPRO	105	6,7	Indeterminado	9,57	190	100
RK 7518 IPRO	112	7,5	Indeterminado	10,08	180	100
RK 8317 IPRO	125	8,3	Indeterminado	10,46	185	88
M 5917 IPRO	95	5,9	Indeterminado	9,42	170	93
NS 8399 IPRO	120	8,3	Indeterminado	9,02	185	89
NS 7007 IPRO	98	7,1	Indeterminado	9,77	210	99
NS 7505 IPRO	118	7,5	Indeterminado	8,97	200	84

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

As sementes foram previamente desinfecionadas pela imersão duramente período de 10 minutos, em solução de hipoclorito de sódio 1% (v/v), sendo posteriormente lavadas em água corrente e, em seguida colocadas para germinar em papel toalha (Germitest[®]) umedecido

com solução diluída contendo $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ de cálcio (controle) mais $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} (estresse por alumínio). As soluções foram preparadas a partir das diluições de AlCl_3 e CaCl_2 em água destilada. O pH da solução contendo Al^{3+} foi inicialmente ajustado para 4,3 com HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, e não foi mais ajustado até o final do ensaio. A utilização de solução diluída contendo entre $7,5$ e $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} , combinada com $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Ca^{2+} foi eficiente na definição das diferenças de tolerância entre os genótipos de soja (MENOSSO et al., 2000).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, adotando-se quatro repetições; cada unidade experimental foi composta por 50 sementes. Os tratamentos foram constituídos pelas 25 cultivares de soja e pelas condições de crescimento das plântulas (controle ou estresse por Al^{3+}).

2.2.2 Condições de Germinação e Mensurações

Quatro subamostras de 50 sementes foram colocadas para germinar sobre três folhas de papel-toalha Germitest[®], previamente umedecidas com as diferentes soluções, em quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel. Em seguida, foram confeccionados rolos, os quais foram mantidos em câmara de germinação sob temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e fotoperíodo de 12 horas, durante 14 dias.

Foram consideradas sementes germinadas quando estas apresentaram protrusão da radícula, com no mínimo 10 mm de comprimento. Após a determinação da taxa de germinação, 10 plântulas foram escolhidas aleatoriamente para a mensuração do comprimento e a matéria seca da parte aérea e das raízes. O comprimento da parte aérea (CPA) e das raízes (CR) foi mensurado com auxílio de uma régua graduada em milímetros. A matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) foi determinada em balança analítica após secagem do material vegetal em estufa à $85 \text{ }^\circ\text{C}$, por 48 h.

2.2.3 Cálculo dos Índices de Tolerância ao Estresse (ITE)

Os índices de tolerância ao estresse (ITE) das cultivares de soja foram calculados a partir dos dados de germinação, comprimento e matéria seca de plântulas em condições controle, ou expostas à toxicidade de Al^{3+} , utilizando-se as seguintes equações propostas por Partheeban et al. (2017), a seguir apresentadas:

$$\text{ITE-G} = (\text{Germinação de sementes sob estresse} / \text{Germinação de sementes do controle}) \times 100$$

$$\text{ITE-CPA} = (\text{Comprimento da parte aérea das plantas sob estresse} / \text{Comprimento da parte aérea das plantas do controle}) \times 100$$

$ITE-CR = (\text{Comprimento das raízes sob estresse} / \text{Comprimento das raízes das plantas do controle}) \times 100$

$ITE-CT = (\text{Comprimento total das plantas sob estresse} / \text{Comprimento total das plantas do controle}) \times 100$

$ITE-MSPA = (\text{Matéria seca da parte aérea das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca da parte aérea das plantas do controle}) \times 100$

$ITE-MSR = (\text{Matéria seca das raízes das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca das raízes das plantas do controle}) \times 100$

$ITE-MST = (\text{Matéria seca total das plantas sob estresse} / \text{Matéria seca total das plantas do controle}) \times 100$

2.2.4 Análises Estatísticas

Os dados médios de cada uma das variáveis avaliada foram submetidos à análise de variância, e na detecção de efeito significativo, a comparação entre as medias e agrupamento das cultivares foi realizada utilizando-se o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando-se o software Sisvar versão 5.6 para Windows (FERREIRA, 2011).

A identificação dos cultivares tolerantes e, ou suscetíveis à toxicidade por alumínio foi realizada com base em todos os índices de tolerância por estresse (ITE), por meio do método do ranqueamento conforme apresentado por Farshadfar et al. (2012). Uma cultivar com o maior valor para cada um dos ITE recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que a cultivar com o menor valor para cada um dos ITE recebeu uma pontuação de classificação igual a 25. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DP_R) para todos os índices de tolerância de estresse das 25 cultivares de soja em condições de estresse por Al^{3+} .

A discriminação das cultivares de soja quanto a tolerância à toxicidade por Al^{3+} , com base apenas no valor médio do ranqueamento e no desvio padrão do ranqueamento não tem-se mostrado eficaz para classificar as cultivares em distintos níveis de tolerância aos estresses abióticos. Portanto, neste estudo foi proposto um aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012). A classificação e separação das cultivares de soja em níveis de tolerância foi realizada com base na pontuação média do ranqueamento de cada cultivar, considerando-se o valor do quartil que divide as 25 posições possíveis de ranqueamento em quatro partes iguais, como mostrado na Figura 6.

O método proposto preconiza que uma cultivar enquadrada com pontuação média no ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (Q1) seja classificada como tolerante; uma cultivar com pontuação média entre o valor do primeiro (Q1) e segundo quartil (Q2) seja classificada como moderadamente tolerante; uma cultivar com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo (Q2) e terceiro quartil (Q3) seja classificada como moderadamente suscetível ao estresse abiótico, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis aos estresses abióticos é enquadrado com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil (Q3).

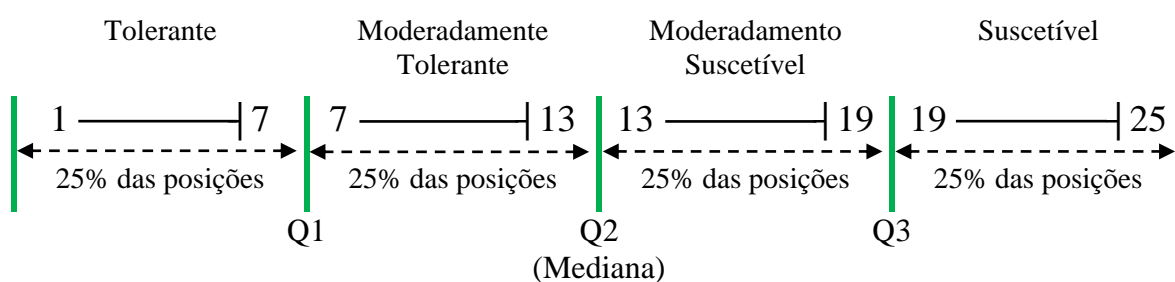


Figura 6. Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto a tolerância à toxicidade por Al^{3+} , com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância ao estresse. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente.

As análises multivariadas pelo método de agrupamentos hierárquico foram realizadas com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, para classificar as 25 cultivares de soja em diferentes níveis de tolerância à toxicidade de Al^{3+} (cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e cultivares suscetíveis). A análise dos componentes principais (ACP) com base na matriz de covariância dos índices de tolerância de estresse e análise biplot foram realizadas utilizando-se o software estatístico Action Stat Pro[®] versão 3.6 para Windows.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de tolerância ao estresse para a germinação das sementes (ITE-G) permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos; TMG 2381 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Maracaí IPRO e RK 6719 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância à toxicidade por Al^{3+} , e as cultivares RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} (Tabela 7).

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento da parte aérea (ITE-CPA) das plantas permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos distintos; as cultivares TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, ST 797 IPRO, RK 7518 IPRO e NS 7505 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância à toxicidade por Al³⁺, e as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância (Tabela 7).

Tabela 7. Índices de tolerância de estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas à toxicidade por alumínio. UEMS/Cassilândia, 2019.

Cultivar	ITE-G	ITE-CPA	ITE-CR	ITE-CT	ITE-MSPA	ITE-MSR	ITE-MST
	----- (%)-----						
TMG 2383 IPRO	74 c	76 b	49 e	64 d	61 b	59 b	61 c
TMG 2381 IPRO	97 a	71 c	63 c	66 d	58 c	53 b	57 d
TMG 2378 IPRO	91 b	69 c	41 f	56 e	56 c	46 c	53 e
TMG 7067 IPRO	88 b	78 b	66 c	72 c	65 b	54 b	62 c
TMG 7063 IPRO	86 b	82 a	74 b	78 b	78 a	58 b	71 a
TMG 2165 IPRO	86 b	79 b	51 e	65 d	63 b	47 c	58 d
TMG 7061 IPRO	94 a	88 a	87 a	88 a	66 b	69 a	67 b
97R50 IPRO	89 b	64 c	47 e	56 e	62 b	47 c	58 d
98R31 IPRO	89 b	63 c	57 d	60 e	60 c	50 b	57 d
98R35 IPRO	80 c	68 c	48 e	58 e	58 c	66 a	60 c
HO Cristalino IPRO	80 c	75 b	38 f	57 e	61 b	37 d	53 e
HO Maracaí IPRO	94 a	64 c	55 d	59 e	56 c	66 a	59 d
HO Paranaíba IPRO	88 b	85 a	78 b	82 b	63 b	59 b	62 c
BMX Foco IPRO	88 b	65 c	45 e	55 e	49 d	45 c	47 f
BMX Bônus IPRO	91 b	68 c	58 d	63 d	54 c	54 b	54 e
ST 777 IPRO	79 c	47 d	22 h	34 g	53 c	56 b	54 e
ST 797 IPRO	89 b	86 a	37 f	60 e	55 c	66 a	58 d
RK 8115 IPRO	60 d	49 d	27 h	37 g	47 d	38 d	44 g
RK 6719 IPRO	96 a	67 c	44 e	55 e	57 c	41 c	52 e
RK 7518 IPRO	91 b	81 a	42 f	63 d	67 b	42 c	60 c
RK 8317 IPRO	64 d	49 d	24 h	39 g	48 d	26 e	43 g
M 5917 IPRO	87 b	61 c	34 g	49 f	62 b	42 c	57 d
NS 8399 IPRO	82 c	67 c	41 f	51 f	55 c	34 d	48 f
NS 7007 IPRO	77 c	63 c	34 g	49 f	76 a	37 d	65 b
NS 7505 IPRO	85 b	85 a	57 d	74 c	72 a	54 b	67 b
Média	85	70	49	60	60	50	67
CV (%)	5,60	7,31	11,25	6,47	6,59	9,35	4,87

Média seguida por letras distintas, na coluna, mostra diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. ITE-G: Índice de tolerância de estresse para germinação. ITE-CPA: Índice de tolerância de estresse para comprimento da parte aérea. ITE-CR = Índice de tolerância de estresse para comprimento da raiz. ITE-CT: Índice de tolerância de estresse para comprimento total das plantas. ITE-MSPA: Índice de tolerância de estresse para matéria seca da parte aérea. ITE-MSR: Índice de tolerância de estresse para matéria seca das raízes. ITE-MST: Índice de tolerância de estresse para matéria seca total das plantas.

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento das raízes (ITE-CR) das plantas expostas à toxicidade por Al^{3+} permitiu classificar as cultivares de soja em oito grupos distintos, em que o grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pela cultivar TMG 7061 IPRO, e as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas no grupo com menor índice de tolerância à toxicidade por Al^{3+} (Tabela 7).

O comprimento da parte aérea das plantas de soja expostas ao estresse por Al^{3+} representou, em média, 70% do comprimento da parte aérea das plantas do tratamento controle, ao passo que o comprimento das raízes sob condições de estresse por Al^{3+} representou, em média, 49% do comprimento das raízes do tratamento controle (Tabela 7). Estes resultados indicam que o crescimento das raízes das plantas de soja foi mais afetado pela toxicidade por Al^{3+} quando comparado ao crescimento da parte aérea das plantas.

A presença de Al no meio de crescimento, além de ter efeito fitotóxico na maioria das plantas, por inibir o crescimento das raízes das plantas, bloqueando os mecanismos de aquisição e transporte de água e nutrientes essenciais, pode causar severas alterações citológicas (KOPITKE et al., 2015; SADE et al., 2016; BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al., 2017). Essas anomalias no metabolismo da planta acarretam menor crescimento das raízes, o que é explicado por problemas de alongamento e divisão celular (ACHARY et al., 2013). A tolerância das espécies e genótipos de plantas ao Al tem sido atribuída à capacidade das plantas manterem em suas raízes ou na parte aérea níveis adequados de nutrientes (BOJÓRQUEZ-QUINTAL et al., 2017).

Em geral, os efeitos deletérios decorrentes da presença de Al^{3+} na solução do solo tem sido mais evidentes nas raízes, o que pode ser atribuído à baixa mobilidade deste elemento na planta, conforme reportado por Giaveno et al. (2001). De acordo com Epstein e Bloom (2006), frequentemente, fatores nutricionais influenciam o crescimento e a morfologia de órgãos particulares das plantas, de maneira específica. Como as raízes são os órgãos em contato direto com a solução do solo estas são, especialmente, mais propensas a serem afetadas por alterações neste ambiente.

O índice de tolerância ao estresse para o comprimento total (ITE-CT) das plantas permitiu classificar as cultivares de soja em sete grupos, sendo que a cultivar TMG 7061 IPRO foi classificada no grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} , ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO (Tabela 7).

O índice de tolerância ao estresse para a matéria seca da parte aérea (ITE-MSPA) das plantas expostas à toxicidade de Al^{3+} permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos;

grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pelas cultivares 7063 IPRO, NS 7007 IPRO e NS 7505 IPRO, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares BMX Foco IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO (Tabela 7).

O índice de tolerância ao estresse para a matéria seca das raízes (ITE-MSR) das plantas permitiu classificar as cultivares de soja em cinco grupos; o grupo com maior índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares TMG 7061 IPRO, 98R35 IPRO, HO Maracaí IPRO e ST 797 IPRO, e a cultivar NS 8317 IPRO foi enquadrada no grupo com menor índice de tolerância ao Al^{3+} (Tabela 7).

Índice de tolerância ao estresse para a matéria seca total (ITE-MST) das plantas de soja expostas ao estresse hídrico permitiu classificar as cultivares em sete grupos; a cultivar TMG 7063 IPRO representou o grupo com maior índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} , ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pelas cultivares RK 8115 IPRO e NS 8317 IPRO (Tabela 7).

A identificação de cultivares de soja tolerantes ou suscetíveis à toxicidade de Al^{3+} , com base em apenas um único critério ou índice de tolerância ao estresse pode ser contraditória (Tabela 7). Por exemplo, de acordo com o ITE-CPA e ITE-MSPA as cultivares de soja TMG 7063 IPRO e NS 7505 IPRO foram consideradas tolerantes ao Al^{3+} , porém pelo ITE-CR e ITE-MSR a cultivar TMG 7061 IPRO foi considerada como tolerante à presença de Al^{3+} . Portanto, a diferenciação e a separação dos cultivares em diferentes níveis de tolerância ao Al^{3+} deve ser realizada levando-se em consideração todos os índices de tolerância de estresse (NAGHAVI et al., 2013). Com base no exposto, este estudo propôs o aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012), ao separar as 25 cultivares de soja nos seus respectivos quartis com base no valor médio do ranqueamento de cada cultivar.

Considerando todos os índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} , as cultivares de soja TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO tiveram a melhor classificação média pelo método do ranqueamento e, portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes à toxicidade por Al^{3+} . As cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO e NS 8399 IPRO receberam as maiores pontuações no método do ranqueamento e, então, foram classificadas como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} (Tabela 8).

A análise multivariada de agrupamento hierárquico das 25 cultivares, com base em todos os índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} , classificou as cultivares de soja em quatro grupos com 5, 3, 8 e 9 cultivares (Figura 7). O primeiro grupo foi representado pelas cultivares com os maiores índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} . O segundo grupo representou as

cultivares com os menores índices de tolerância ao estresse, sendo consideradas como as cultivares mais suscetíveis aos efeitos negativos do Al^{3+} . Por sua vez, o terceiro e o quarto grupo representaram as cultivares com os valores intermediários dos índices de tolerância ao estresse e, portanto, as cultivares pertencentes a estes grupos foram classificadas como moderadamente suscetíveis e tolerantes ao estresse por Al^{3+} , respectivamente.

Tabela 8. Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância ao estresse para a toxicidade por alumínio das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. UEMS/Cassilândia, 2019.

Cultivar	Índice de Tolerância de Estresse (ITE)							\bar{R}	DP_R	Nível de Tolerância [†]
	G	CPA	CR	CT	MSPA	MSR	MST			
TMG 2383 IPRO	23	9	11	8	11	6	7	10,7	3,7	MT
TMG 2381 IPRO	1	11	5	6	14	12	14	9,0	4,3	MT
TMG 2378 IPRO	7	12	17	17	18	16	19	15,1	3,2	MS
TMG 7067 IPRO	11	8	4	5	6	9	5	6,9	2,1	T
TMG 7063 IPRO	15	5	3	3	1	7	1	5,0	3,4	T
TMG 2165 IPRO	16	7	10	7	7	15	11	10,4	3,1	MT
TMG 7061 IPRO	3	1	1	1	5	1	3	2,1	1,3	T
97R50 IPRO	9	17	13	16	9	14	13	13,0	2,3	MT
98R31 IPRO	10	20	8	11	13	13	16	13,0	2,9	MT
98R35 IPRO	20	13	12	14	15	3	8	12,1	3,8	MT
HO Cristalino IPRO	19	10	19	15	12	22	18	16,4	3,5	MS
HO Maracaí IPRO	4	19	9	13	17	4	10	10,9	4,7	MT
HO Paranaíba IPRO	11	4	2	2	8	5	6	5,4	2,5	T
BMX Foco IPRO	13	18	14	18	23	17	23	18,0	2,9	MS
BMX Bônus IPRO	6	14	6	9	21	10	17	11,9	4,7	MT
ST 777 IPRO	21	24	25	25	22	8	20	20,7	3,8	S
ST 797 IPRO	8	2	20	12	20	2	12	10,9	5,9	MT
RK 8115 IPRO	25	23	23	24	25	21	24	23,6	1,1	S
RK 6719 IPRO	2	16	15	19	16	19	21	15,4	4,0	MS
RK 7518 IPRO	5	6	16	10	4	20	9	10,0	4,6	MT
RK 8317 IPRO	24	24	24	23	24	25	25	24,1	0,5	S
M 5917 IPRO	14	22	22	22	10	18	15	17,6	3,9	MS
NS 8399 IPRO	18	15	18	20	19	24	22	19,4	2,2	S
NS 7007 IPRO	22	21	21	21	2	23	4	16,3	7,6	MS
NS 7505 IPRO	17	3	7	4	3	11	2	6,7	4,2	T

[†] T = refere-se a uma cultivar de soja tolerante à toxicidade de Al^{3+} , recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 7,0; MT = cultivar moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 7,1 a 13,0; MS = cultivar moderadamente suscetível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 13,1 a 19,0; S = cultivar de soja suscetível à toxicidade de Al^{3+} com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 19,1 a 25.

Diante do exposto, as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067 IPRO e NS 7505 IPRO foram identificadas como as mais tolerantes ao

estresse por Al^{3+} , ao passo que as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas como as mais suscetíveis à toxicidade por Al^{3+} (Figura 7).

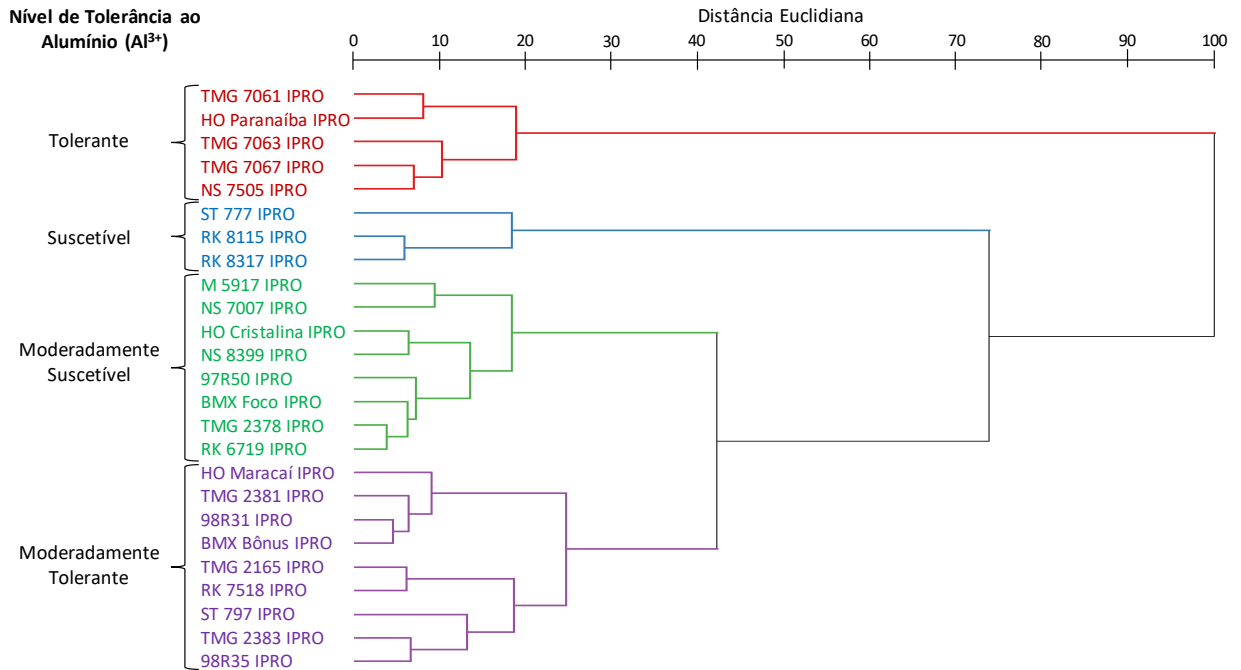


Figura 7. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, utilizando os índices de tolerância à toxicidade por Al^{3+} (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST).

O primeiro componente principal explica 73,36% da variação total (Figura 8). De acordo com o valor dos autovetores, os pesos das variáveis ITE-CR (-0,611), ITE-CT (-0,498), ITE-CPA (-0,391), ITE-MSR (-0,309), ITE-G (-0,224), ITE-MST (-0,216) e ITE-MSPA (-0,184) são negativamente altos para esse componente principal. Isso indica que quanto maior o valor desses índices de tolerância, menor é o escore do primeiro componente principal. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância ao estresse, menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, a cultivar pode ser considerada tolerante ao estresse por Al^{3+} .

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância das cultivares de soja à toxicidade por Al^{3+} . Como os pesos são negativos, quando maior for os índices de tolerância ao estresse, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância da cultivar de soja. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância da cultivar é melhor. Para as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, TMG 7063 IPRO e NS 7505 IPRO

se registraram os melhores índices de desempenho global e, portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes ao estresse por Al^{3+} . Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram registrados para as cultivares de soja RK 8317 IPRO, RK 8115 IPRO, ST 777 IPRO e NS 7007 IPRO, e estas cultivares foram classificadas como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} .

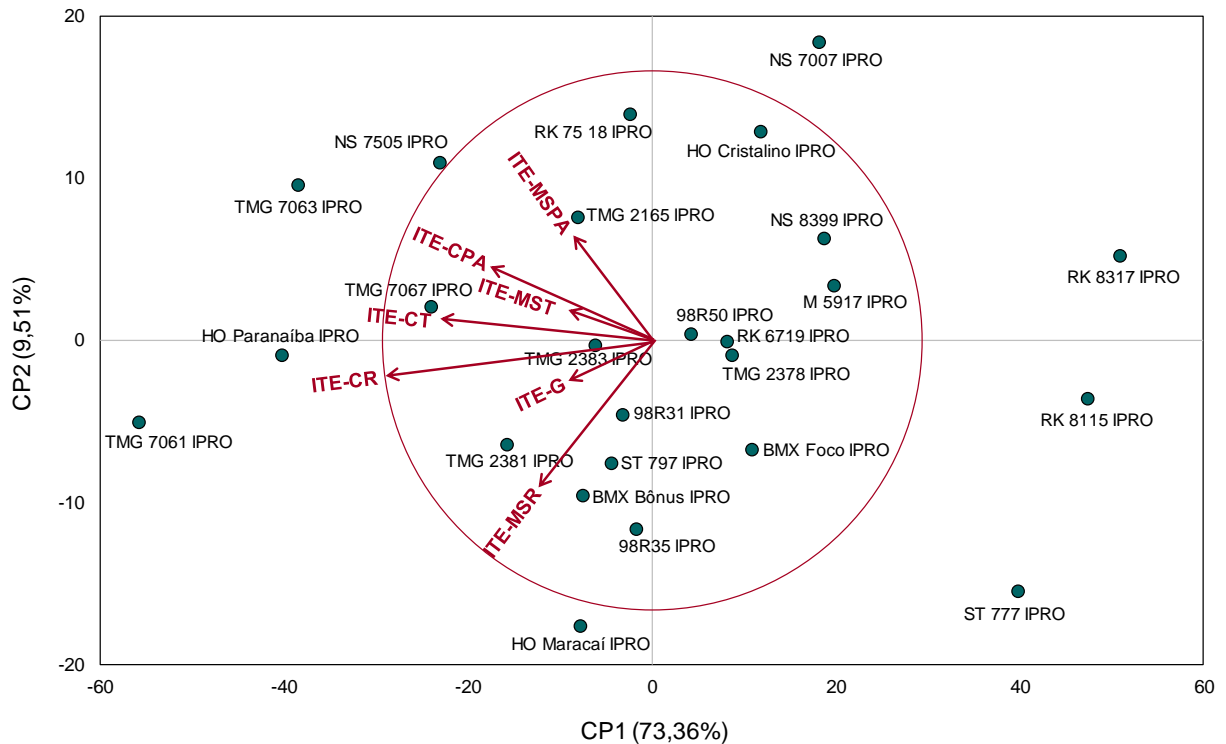


Figura 8. Diagrama biplot com base nos primeiro e segundo componentes principais dos índices de tolerância da toxicidade por alumínio (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR, e ITE-MST).

O menor escore do primeiro componente principal obtido para o ITE-CR indica que os índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} , baseado no comprimento das raízes, são mais sensíveis e adequados para identificar e separar os cultivares de soja quanto a tolerância ao estresse por Al^{3+} .

Em síntese, os três métodos de agrupamento utilizados (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal) agruparam as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO como tolerantes ao Al^{3+} (Tabela 8, Figuras 7 e 8), ao passo que a cultivar TMG 7067 IPRO foi classificada como tolerante ao estresse por Al^{3+} pelos métodos do ranqueamento e análise de

agrupamento hierárquico (Tabela 8 e Figura 7). Portanto, são as cultivares mais indicadas para serem recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

Os métodos do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais agruparam, respectivamente, 4, 3 e 3 cultivares de soja como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} (Tabela 8, Figuras 7 e 8). As cultivares de soja RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 foram classificadas como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} pelos três métodos utilizados. Por sua vez, o método do ranqueamento também classificou a cultivar NS 8399 IPRO como suscetível ao estresse por Al^{3+} (Tabela 8). Portanto, quando a semeadura da soja for realizada em solos ácidos com alta concentração de Al^{3+} na solução do solo estas cultivares de não devem ser recomendadas para a semeadura.

2.4 CONCLUSÕES

As cultivares TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO são as cultivares mais indicadas para serem cultivadas em solos ácidos por terem maior tolerância à toxicidade por alumínio, e as cultivares RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 IPRO são classificadas como suscetíveis à toxicidade do alumínio, e não devem ser recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARY, V.; PARINANDI, N.; PANDA, B. Calcium channel blockers protect against aluminium-induced DNA damage and block adaptive response to genotoxic stress in plant cells. **Mutation Research**, v. 751, n. 2, p.130-138, 2013.

BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E.; ESCALANTE-MAGAÑA, C.; ECHEVARRÍA-MACHADO, I.; MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, M. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. **Frontiers in plant science**, 8, e1767. 2017. doi:10.3389/fpls.2017.01767

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta, 86p. 2006.

FARSHADFAR, E.; POURSIAHBIDI, M. M.; ABOOGHADAREH, A. R. P. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 13, p.891-903, 2012.

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

GIAVENO, G.D.; MIRANDA-FILHO, J.B.; FURLANI, P.R. Inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Genetics & Breeding**, v. 55, n. 1, p.5 1-55, 2001.

KOPITTKKE, P. M.; MOORE, K. L.; LOMBI, E.; GIANONCELLI, A.; FERGUSON, B. J.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W.; NICHOLSON, T. M.; MCKENNA, B. A.; WANG, P.; GRESSHOFF, P. M.; KOUROUSIAS, G.; WEBB, R. I.; GREEN, K.; TOLLENAERE, A. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots. **Plant Physiology**, v. 167, n. 4, p.1402-1411, 2015.

MENOSSO, O.G.; COSTA, J.A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Tolerância de genótipos de soja ao alumínio em solução. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 11, p. 2157-2166, 2000.

MIGUEL, P. S. B.; GOMES, F. T.; ROCHA, W. S. D.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, C. A.; OLIVEIRA, A. V. Efeito tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismo de tolerância no crescimento das plantas, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, v. 24, n. 1, p. 13-29, 2010.

NAGHAVI, M. R.; POUR-ABOUGHADAREH, A.; KHALILI, M. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v.5, n.3, p.388-393, 2013.

PARTHEEBAN, C.; CHANDRASEKHAR, C.N.; JEYAKUMAR, P.; RAVIKESAVAN, R.; GNANAM, R. Effect of PEG induced drought stress on seed germination and seedling characters of maize (*Zea mays* L.) genotypes. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 5, p. 1095-1104, 2017.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Mecanismo de tolerância interna das plantas ao alumínio. **Colloquium Agrariae**, v. 9, n. 2, p.72-89, 2013.

SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S. L.; SURAVAJHALA, P.; KAVI-KISHOR, P.B. Toxicity and tolerance of aluminium in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biometals**, v.29, p.187-210, 2016. 10.1007/s10534-016-9910-z

STEINER, F.; ZOZ, T.; PINTO-JÚNIOR, A.S.; CASTAGNARA, D.D.; DRANSKI, J.A.L. Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1779-1788, 2012.

TAHARA, K.; HASHIDA, K.; OTSUKA, Y.; OHARA, S.; KOJIMA, K.; SHINOHARA, K. Identification of a Hydrolyzable Tannin, Oenothien B, as an aluminum-detoxifying ligand in a highly aluminum-resistant tree, *Eucalyptus camaldulensis*. **Plant Physiology**, v. 164, n. 2, p. 683–693, 2014.

TANDZI, L. N.; MUTENGWA, C. S.; NGONKEU, L. M.; GRACEN, V. Breeding maize for tolerance to acid soils: A review. **Agronomy**, v. 8, n. 6, p. 1-21, 2018.

CAPÍTULO 3. ÍNDICES DE SELEÇÃO PARA IDENTIFICAR CULTIVARES DE SOJA TOLERANTES À SECA

RESUMO: A ocorrência de deficiência hídrica é um dos fatores ambientais que mais limitam a produtividade de grãos da cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. Portanto, estudos que buscam avaliar e identificar cultivares de soja com maior tolerância à seca são de extrema importância para a pesquisa agropecuária. O trabalho foi realizado com a finalidade de avaliar a resposta de 22 cultivares de soja cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas (sistema irrigado e sequeiro), visando determinar os melhores índices de seleção para identificar a tolerância à seca em cultivares de soja. Foram conduzidos dois experimentos em condições de campo durante a safra de 2018/2019, sendo o primeiro experimento conduzido em condições de sequeiro na área experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), e o segundo experimento conduzido em sistema irrigado, com pivô central, em uma propriedade particular próxima a UEMS, no município de Cassilândia (MS). Utilizou-se delineamento experimental com blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 22, sendo adotadas três repetições. O primeiro fator foi representado pelas duas condições de cultivo (irrigado e sequeiro), e o segundo fator pelas 22 cultivares de soja. A partir dos dados da produtividade de grãos nos sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, foram estimados 15 índices de tolerância à seca. Para identificar as cultivares de soja mais tolerantes ou suscetíveis à restrição hídrica, utilizaram-se o método do ranqueamento, a análise de agrupamentos hierárquico e análise de componentes principais (análise multivariada). Pelos métodos utilizados, as cultivares de soja 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO e RK 8115 IPRO foram classificadas com maior tolerância à seca, e por isso, mais indicadas para serem cultivadas em regiões com ocorrência de restrição hídrica. Por outro lado, as cultivares TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO foram classificadas com maior susceptibilidade à restrição hídrica, e não devem ser recomendadas para o cultivo em condições de sequeiro em regiões com ocorrência de deficiência hídrica. Os índices de tolerância ao estresse, produtividade médias, média harmônica, índice de rendimento, e tolerância abiótica foram os mais indicados para selecionar as cultivares de soja com maior tolerância à seca e com alto potencial de rendimento de grãos em sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro.

PALAVRAS-CHAVES: Deficiência hídrica, Estresse abiótico, Índices de tolerância à seca.

SELECTION INDICES TO IDENTIFY DROUGHT-TOLERANT SOYBEAN CULTIVARS

ABSTRACT: The occurrence of water deficiency is one of the environmental factors that most limit soybean grain yield [*Glycine max* (L.) Merrill.]. Therefore, studies that seek to evaluate and identify soybean cultivars with greater drought tolerance are extremely important for agricultural research. This research was conducted to evaluate the response of 22 soybean cultivars when grown under adverse environmental conditions (irrigated and rainfed system), and to determine the best selection indices to identify drought tolerance in soybean cultivars. Two experiments were conducted under field conditions during the 2018/2019 crop, the first experiment conducted under rainfed conditions in the experimental area of the State University of Mato Grosso do Sul (UEMS), and the second experiment conducted in a pivot irrigated system. in a private property near UEMS, in the municipality of Cassilândia (MS). The experimental design was a randomized complete block design in a 2 x 22 factorial scheme with three replications. The first factor consisted of two cultivation systems (irrigated and rainfed system) and the second factor by 22 soybean cultivars. From the grain yield data in irrigated and dryland systems, 15 drought tolerance indices were estimated. To identify the soybean cultivars more tolerant or susceptible to water restriction, we used the ranking method and hierarchical cluster analysis and principal component analysis (multivariate analysis). The soybean cultivars 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO and RK 8115 IPRO have higher drought tolerance and are the most suitable cultivars to be cultivated in regions with water restriction. The cultivars TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO are more susceptible to water restriction and should not be recommended for dryland cultivation in regions with water deficiency. STI, MP, HM, YI and ATI tolerance indices were the most suitable for selecting soybean cultivars with higher drought tolerance and high grain yield potential in irrigated and dryland systems.

KEY WORDS: Water deficit, Abiotic stress, Drought tolerance indices.

3.1 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 2018/2019 a cultura ocupou uma área de 35,8 milhões de hectares, com uma produção de 113,8 milhões de toneladas, o que representou uma produtividade média de soja de 3.182 kg

ha⁻¹ (CONAB, 2019). 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 extrema importância para a pesquisa agropecuária.

A deficiência hídrica afeta diversos processos bioquímicos, fisiológicos e morfológicos nas plantas, e as respostas das plantas à restrição hídrica dependem do genótipo, da espécie vegetal, do estágio de desenvolvimento da planta, da severidade e da duração do estresse, dentre outros fatores ambientais (PATANÈ et al., 2013; NAGHAVI et al., 2013). Em plantas sob condições de restrição hídrica, há redução da condutância estomática, da taxa de transpiração, da área foliar, da taxa fotossintética e redução da taxa de crescimento relativo (KRON et al., 2008; FIOREZE et al., 2011), além, de modificações na atividade das enzimas do metabolismo do nitrogênio e carbono e mudanças nos níveis de antioxidantes (FLEXAS et al., 2006; GUNES et al., 2008). Esses efeitos resultam em perda de vigor da planta, diminuição na altura da planta, aumento na taxa de abscisão de flores e redução na produtividade. Algumas destas respostas fazem parte de estratégias que visam reduzir os efeitos negativos da restrição hídrica, constituindo, portanto, mecanismos de tolerância à seca.

As 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). 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 seleção de cultivares tolerantes à seca não é uma tarefa fácil devido ao fato de ocorrer fortes interações entre genótipos e meio ambiente, além do conhecimento restrito a respeito da função e do papel dos mecanismos de tolerância (NAGHAVI et al., 2013).

O desempenho relativo da produtividade de grãos em ambientes com adequada disponibilidade de água ou ambientes com restrição hídrica parece ser o ponto de partida para a identificação de genótipos desejáveis para condições de escassez de chuva (MOHAMMADI

et al., 2010). Portanto, as principais condições que devem ser consideradas durante o processo de seleção de cultivares tolerantes à seca são o cultivo sob condições adequadas não estressantes (sistema irrigado, por exemplo) e o cultivo sob condições de restrição hídrica (NAGHAVI et al., 2013; MENEZES et al., 2014).

De acordo com Hall (1993), a tolerância à seca de um determinado cultivar está relacionada com a maior produtividade relativa de grãos de um genótipo comparado com outros genótipos submetidos à mesma condição de restrição hídrica. Por sua vez, a suscetibilidade à seca de um genótipo é frequentemente medida como uma função da redução na produtividade relativa de grãos em condições de restrição hídrica (BLUM, 1988).

Vários pesquisadores utilizaram diferentes métodos e índices para avaliar as diferenças genéticas para a tolerância à seca. No entanto, estes estudos para a cultura da soja ainda são incipientes e inconclusivos. Porém, sabe-se que a melhoria na estabilidade da produção dos genótipos em ambientes propensos à restrição hídrica é de grande importância para a cultura da soja e pode ser feita por meio do melhoramento genético, através da identificação dos índices de seleção que possam contribuir para identificar os genótipos tolerantes e a tolerância à seca (FARSHADFAR et al., 2012; NAGHAVI et al., 2013; MENEZES et al., 2014).

Esta pesquisa foi realizada com a finalidade de avaliar a resposta de 22 cultivares de soja da região Centro-Oeste do Brasil quando cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas (sistema irrigado e sequeiro), para determinar os melhores índices de seleção visando identificar a tolerância à seca em cultivares de soja.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área experimental

Dois experimentos foram implantados e conduzidos em condições de campo, durante a safra agrícola de 2018/2019. O primeiro experimento foi conduzido em condições de sequeiro na área experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia – MS, sob as coordenadas geográficas longitude 51°48'46" W, latitude 19°05'46" S e altitude média de 490 m. O segundo experimento foi conduzido em sistema irrigado com pivô central em uma propriedade particular, localizada nas proximidades da UEMS/Cassilândia, sob as coordenadas geográficas longitude 51°48'04" W, latitude 19°05'16" S 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 (precipitação no inverno menor que 60 mm), com

precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.520 mm e 24,1 °C, respectivamente. O solo em ambos os locais é classificado como Neossolo Quartzarênico Órtico latossólico (NQo).

3.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 × 22, adotando-se três repetições. O primeiro fator foi composto pelas duas condições de cultivo (sequeiro e irrigado); o segundo fator foi composto pelas 22 cultivares de soja. As sementes das 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 apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Características agrônômicas das 22 cultivares de soja utilizadas na pesquisa

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.

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 foram

consideradas as três linhas centrais desprezando-se 1,5 m das extremidades de cada fileira de plantas, totalizando , assim, área útil de 2,70 m² (2,0 × 1,35 m).

3.2.3 Implantação e Condução do experimento

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

Todas as sementes de soja foram previamente expostas ao tratamento fitossanitário. Utilizando-se para isso a mistura de piraclostrobina + tiofanato de metila + fipronil (Standak Top[®]) na dose de 2 mL p.c. kg⁻¹ de semente; posteriormente se procedu à a inoculação com estirpes eficientes de *Bradyrhizobium japonicum*, utilizando-se inoculante líquido contendo as estirpes Semia 5079 e Semia 5080, na dose de 3 mL p.c. kg⁻¹ de semente.

Durante o desenvolvimento da cultura, 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.

3.2.4 Avaliação da produtividade

Para quantificação da produtividade, no estágio de desenvolvimento R8 (95% das vagens maduras), foram colhidas, manualmente, as plantas localizadas em dois metros da porção central de cada uma das três fileiras centrais de cada unidade experimental. Em seguida as plantas foram colocadas à sombra para secagem, e posteriormente foram trilhadas mecanicamente. Após obtenção dos grãos, determinou-se umidade e pesagem dos para proceder à estimativa da produtividade em kg ha⁻¹, corrigindo-se para 13% de umidade (base úmidade).

3.2.5 Cálculo dos índices de tolerância à seca

Neste estudo, 15 índices de tolerância à seca propostos por diversos pesquisadores foram utilizados para avaliar a resposta de produtividade de grãos das 22 cultivares de soja, cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas (sequeiro e irrigado). Os dados da produtividade de grãos, registrados para cada cultivar, em cada ambiente, foram utilizados para calcular os índices de tolerância à seca. Os 15 índices de seleção que foram utilizados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Índices de tolerância à seca para avaliar a resposta da produtividade de grãos das 22 cultivares de soja cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas

Índice de tolerância à seca	Abreviação e Equação [†]	Referência
1. Índice de suscetibilidade de estresse	$SSI = [1 - (Y_S/Y_P)] / [1 - (\bar{Y}_S/\bar{Y}_P)]$	Fischer & Maurer (1978)
2. Índice relativo de seca	$RDI = (Y_S/Y_P) / (\bar{Y}_S/\bar{Y}_P)$	Fischer et al. (1998)
3. Índice de tolerância de estresse	$STI = (Y_S \times Y_P) / (\bar{Y}_P)^2$	Fernández (1992)
4. Produtividade média geométrica	$GMP = \sqrt{Y_S \times Y_P}$	Fernández (1992)
5. Produtividade média	$MP = (Y_S + Y_P) / 2$	Rosielle & Hamblin (1981)
6. Média harmônica	$HM = [2 \times (Y_S \times Y_P)] / (Y_S + Y_P)$	Jafari et al. (2009)
7. Índice de tolerância	$TOL = Y_P - Y_S$	Rosielle & Hamblin (1981)
8. Índice de rendimento	$YI = Y_S / \bar{Y}_S$	Gavuzzi et al. (1997)
9. Índice de resistência à seca	$DI = [Y_S \times (Y_S/Y_P)] / \bar{Y}_S$	Blum (1988)
10. Índice de estabilidade de rendimento	$YSI = Y_S / Y_P$	Bouslama & Schapaugh (1984)
11. Percentual de suscetibilidade ao estresse	$SSPI = [Y_P - Y_S / 2 \times \bar{Y}_P] \times 100$	Moosavi et al. (2008)
12. Índice de tolerância abiótica	$ATI = [(Y_P - Y_S) / (\bar{Y}_P / \bar{Y}_S)] \times \sqrt{\bar{Y}_P \times Y_S}$	Moosavi et al. (2008)
13. Tolerância de estresse modificado (k ₁)	$k_1STI = Y_P^2 / \bar{Y}_P^2$	Farshadfar & Sutka (2002)
14. Tolerância de estresse modificado (k ₂)	$k_2STI = Y_S^2 / \bar{Y}_S^2$	Farshadfar & Sutka (2002)
15. Índice de sensibilidade à seca	$SDI = (Y_P - Y_S) / Y_P$	Farshadfar & Javadinia (2011)

[†] Nas equações acima, Y_S, Y_P, representam o rendimento 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 o rendimento médio de grãos sob condições de restrição hídrica (cultivo em sequeiro) e sob condições de adequada disponibilidade de água (cultivo sob sistema irrigado) de todas as cultivares de soja, respectivamente.

3.2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, na detecção de efeito significativo à 5% de probabilidade pelo teste F de Fisher-Snedecor, as médias foram comparadas e agrupadas de médias Scott-Knott ($p \leq 0,05$), com o objetivo de discriminar os cultivares 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, 2011).

Análise de correlação linear de Pearson foram realizadas entre os diferentes índices de tolerância à seca e a produtividade de grãos de soja nos diferentes ambientes de produção.

A identificação dos cultivares de soja mais adaptados às condições ambientais adversas foi realizada com base em todos os índices de tolerância à seca, por meio do método do ranqueamento como apresentado por Farshadfar et al. (2012). Uma cultivar com o maior valor para cada um dos índices de tolerância Y_P, Y_S, RDI, STI, GMP, MP, HM, YI, DI, YSI, SSPI, ATI, k₁STI e k₂STI recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que para as cultivares com o menor valor para os índices de tolerância SSI, TOL e SDI foi atribuído uma

pontuação de classificação igual a 1. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DP_R) para todos os índices de tolerância à seca das 22 cultivares de soja em condições irrigada ou de sequeiro.

A discriminação das cultivares de soja quanto a tolerância à seca com base apenas no valor médio do ranqueamento e no desvio padrão do ranqueamento não tem-se mostrado eficaz para classificar as cultivares em distintos níveis de tolerância à seca. Portanto, neste estudo foi proposto um aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012). A classificação e separação das cultivares de soja em níveis 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, como mostrado na Figura 9.

O método proposto preconiza que uma cultivar para a qual se registra pontuação média do ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (Q1) seja classificada como tolerante à seca; uma cultivar com pontuação média entre o valor do primeiro (Q1) e segundo quartil (Q2) seja classificada como moderadamente tolerante; uma cultivar com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo (Q2) e terceiro quartil (Q3) seja classificada como moderadamente suscetível; e, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis à seca é representado pelas cultivares com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil (Q3).

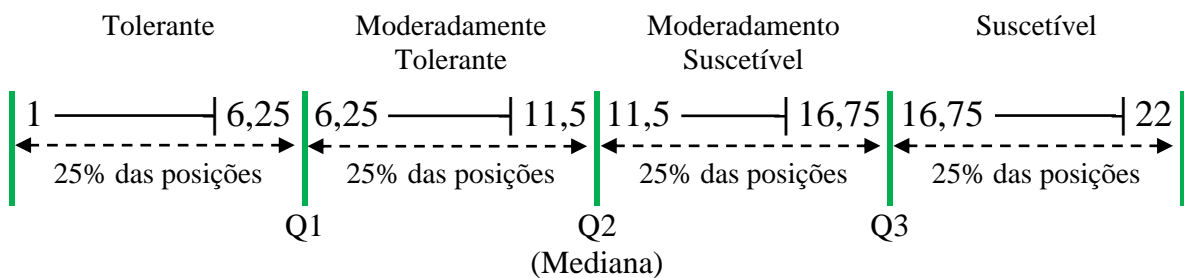


Figura 9. Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto a tolerância à seca com base no ranqueamento de todos os índices de tolerância. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente.

As análises multivariadas pelo método de agrupamentos hierárquico foram realizadas com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, para classificar as 22 cultivares de soja em diferentes de níveis de tolerância à seca (cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e cultivares suscetíveis). As análises dos 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.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 *Rendimento de grãos e índices de tolerância à seca*

O rendimento de grãos no sistema irrigado (Y_P) permitiu separar as cultivares de soja em sete grupos distintos; as cultivares RK 8317 IPRO e 98R35 IPRO representaram os dois grupos com maior rendimento de grãos, e as cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO representaram o grupo com menor rendimento de grãos (Tabela 11). Em condições de restrição hídrica, o rendimento de grãos permitiu classificar as cultivares de soja em seis grupos, na qual as cultivares RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO, 98R35 IPRO e TMG 2381 IPRO foram enquadradas nos dois grupos de maior rendimento de grãos, ao passo que o grupo de menor rendimento de grãos foi representado pelas cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO.

O rendimento médio 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 11). O rendimento médio de grãos obtido no sistema irrigado foi menor ao rendimento médio de grãos de soja 2.960 kg ha⁻¹, registrado para o estado de Mato Grosso do Sul na safra 2018/2019 (CONAB, 2019). Das 22 cultivares de soja testadas, apenas sete cultivares tiveram rendimento de grãos superior ao rendimento médio do estado do Mato Grosso do Sul para a safra de 2018/2019. Portanto, com base no exposto, verifica-se que as 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 da município de Cassilândia (MS). Cabe ressaltar que devido à estiagem e excesso de calor durante as fases vegetativa e durante a floração e enchimento de grãos, o rendimento de grãos de todas as 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.

A obtenção de genótipos superiores em condições estressantes e não-estressantes deve ser realizada por meio da avaliação de uma série de características favoráveis que confirmam maior rendimento de grãos e que satisfaçam as exigências do mercado nacional. Com isso, a seleção de genótipos baseada em uma ou poucas características têm se mostrado inadequada, conduzindo a um produto final superior, apenas em relação às poucas características selecionadas (FARIA et al., 2007).

As cultivares com índice de suscetibilidade ao estresse (SSI), $< 1,00$, foram classificadas como mais tolerantes à restrição hídrica, uma vez que a expressão $1 - (\bar{Y}_S/\bar{Y}_P)$ é um indicativo da intensidade do estresse (FISCHER; MAURER, 1987). O índice SSI permitiu classificar as cultivares de soja em sete grupos distintos, em que as cultivares TMG 2381 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067 IPRO e RK 7518 IPRO representaram os dois grupos com os melhores índices SSI, ao passo que as cultivares TMG 2378 IPRO, BMX Foco IPRO, ST 797 IPRO e ST 777 IPRO foram enquadradas no grupo com os piores índices SSI (Tabela 11).

O índice tolerância relativo à seca (RDI), permitiu separar as cultivares de soja em sete grupos distintos; os dois grupos com os maiores índices RDI foram representados pelas cultivares TMG 2381 IPRO, TMG 2383 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067 IPRO e RK 7518 IPRO, e as cultivares TMG 2378 IPRO, BMX Foco IPRO, ST 797 IPRO e ST 777 IPRO foram enquadradas no grupo com os menores índices RDI (Tabela 11).

O índice STI e o da produtividade média geométrica (GMP), permitiram classificar as cultivares em sete grupos distintos, sendo que os dois grupos com os maiores índices STI foram representados pelas cultivares 98R35 IPRO, RK8115 IPRO e RK 8317 IPRO, ao passo que o grupo com menor índice STI foi representado pelas cultivares de soja TMG 7067 IPRO, TMG7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M5917 IPRO (Tabela 11).

O índice de tolerância à seca da produtividade média (MP), permitiu classificar as cultivares de soja em oito grupos distintos; 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 11).

O índice de tolerância à seca da média harmônica (HM) permitiu separar as cultivares de soja em seis grupos, sendo que as cultivares TMG 2381 IPRO, 98R31 IPRO, 98R35 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram agrupadas nos dois grupos com os maiores índices HM, e as cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO foram agrupadas no grupo com menor índice HM (Tabela 11).

O índice de tolerância (TOL) permitiu separar as cultivares em nove grupos distintos, sendo que o grupo com o melhor índice TOL foi representado pelas cultivares TMG 7067 IPRO, RK 7518 IPRO e M 5917 IPRO, e a cultivar RK 8317 IPRO foi classificada no grupo de pior índice TOL (Tabela 11).

Tabela 11. Rendimento de grãos e índices de tolerância à seca para as 22 cultivares de soja cultivadas em condições ambientais favoráveis e adversas (irrigado e sequeiro). UEMS/Cassilândia, 2018/2019.

Cultivar	Y _P (kg ha ⁻¹)	Y _S (kg ha ⁻¹)	SSI	RDI	STI	GMP	MP	HM	TOL	YI	DI	YSI	SSPI	ATI	k ₁ STI	k ₂ STI	SDI
TMG 2383 IPRO	2.240 f	1.423 c	0,65 b	1,45 b	0,47 e	1.785 e	1.832 f	1.740 c	817 b	1,24 c	0,79 b	0,64 b	15,59 h	642.910 f	0,73 e	1,54 c	0,36 b
TMG 2381 IPRO	2.500 e	1.683 b	0,58 a	1,53 a	0,62 d	2.051 d	2.092 e	2.011 b	817 b	1,46 b	0,99 a	0,67 a	15,59 h	733.731 f	0,91 e	2,16 b	0,33 a
TMG 2378 IPRO	3.487 c	1.123 d	1,21 g	0,73 g	0,57 d	1.979 d	2.305 d	1.699 c	2.363 g	0,98 d	0,32 f	0,32 g	45,11 c	2.055.328 d	1,77 c	0,96 e	0,68 g
TMG 7067 IPRO	1.220 g	737 f	0,71 b	1,37 b	0,13 g	948 g	978 h	918 f	483 a	0,64 f	0,39 e	0,60 b	9,22 i	200.816 g	0,22 f	0,41 f	0,40 b
TMG 7063 IPRO	1.883 f	1.177 d	0,67 b	1,43 b	0,32 f	1.488 f	1.530 g	1.447 d	707 b	1,02 d	0,64 c	0,63 b	13,49 h	463.025 g	0,52 f	1,05 d	0,37 b
TMG 2165 IPRO	2.277 f	1.300 c	0,76 c	1,30 c	0,43 e	1.720 e	1.788 f	1.655 c	977 c	1,13 c	0,65 c	0,57 c	18,64 g	741.840 f	0,76 e	1,29 d	0,43 c
TMG 7061 IPRO	1.487 g	733 f	0,90 d	1,12 d	0,16 g	1.044 g	1.110 h	982 f	753 b	0,64 f	0,32 f	0,49 d	14,38 h	345.104 g	0,32 f	0,41 f	0,51 d
97R50 IPRO	1.560 g	740 f	0,94 e	1,08 e	0,17 g	1.074 g	1.150 h	1.004 f	820 b	0,64 f	0,31 f	0,47 e	15,65 h	388.141 g	0,36 f	0,42 f	0,53 e
98R31 IPRO	3.537 c	1.417 c	1,07 f	0,91 f	0,73 c	2.238 c	2.477 d	2.023 b	2.120 f	1,23 c	0,49 d	0,40 f	40,46 d	2.083.048 d	1,82 c	1,52 c	0,60 f
98R35 IPRO	4.237 b	1.693 b	1,07 f	0,91 f	1,05 b	2.678 b	2.965 b	2.419 a	2.543 g	1,47 b	0,59 c	0,40 f	48,54 c	2.996.440 b	2,62 b	2,18 b	0,60 f
HO Cristalino IPRO	2.833 d	1.070 d	1,11 f	0,86 f	0,44 e	1.741 e	1.952 f	1.553 c	1.763 e	0,93 d	0,35 e	0,38 f	33,66 e	1.354.237 e	1,18 d	0,87 e	0,62 f
HO Maracaí IPRO	2.197 f	853 f	1,09 f	0,88 f	0,27 f	1.369 f	1.525 g	1.229 e	1.343 d	0,74 f	0,29 f	0,39 f	25,64 f	807.998 f	0,70 e	0,55 f	0,61 f
HO Paranaíba IPRO	2.153 f	973 e	0,98 e	1,03 e	0,31 f	1.448 f	1.563 g	1.340 d	1.180 d	0,85 e	0,38 e	0,45 e	22,52 f	751.089 f	0,68 e	0,72 e	0,55 e
BMX Foco IPRO	2.907 d	900 e	1,23 g	0,70 g	0,38 e	1.617 e	1.903 f	1.374 d	2.007 f	0,78 e	0,24 f	0,31 g	38,30 d	1.430.068 e	1,24 d	0,62 f	0,69 g
BMX Bônus IPRO	2.637 e	983 e	1,12 f	0,85 f	0,38 e	1.610 e	1.810 f	1.432 d	1.653 e	0,86 e	0,32 f	0,37 f	31,56 e	1.171.278 e	1,02 d	0,73 e	0,63 f
ST 777 IPRO	3.403 c	990 e	1,26 g	0,66 g	0,49 e	1.835 e	2.197 e	1.534 c	2.413 g	0,86 e	0,25 f	0,29 g	46,06 c	1.951.363 d	1,69 c	0,74 e	0,71 g
ST 797 IPRO	3.773 c	1.020 e	1,30 g	0,61 g	0,56 d	1.962 d	2.397 d	1.606 c	2.753 h	0,89 e	0,24 f	0,27 g	52,55 b	2.377.613 c	2,08 c	0,79 e	0,73 g
RK 8115 IPRO	3.590 c	1.880 a	0,85 d	1,19 d	0,98 b	2.598 b	2.735 c	2.467 a	1.710 e	1,63 a	0,86 b	0,52 d	32,64 e	1.949.428 d	1,88 c	2,68 a	0,48 d
RK 6719 IPRO	1.547 g	667 f	1,01 e	0,98 e	0,15 g	1.015 g	1.107 h	932 f	880 b	0,58 f	0,25 f	0,43 e	16,80 h	393.709 g	0,35 f	0,34 f	0,57 e
RK 7518 IPRO	2.077 f	1.430 c	0,55 a	1,58 a	0,43 e	1.723 e	1.753 f	1.692 c	647 a	1,24 c	0,86 b	0,69 a	12,34 i	494.134 g	0,63 e	1,55 c	0,31 a
RK 8317 IPRO	4.770 a	1.827 a	1,10 f	0,87 f	1,27 a	2.952 a	3.298 a	2.641 a	2.943 i	1,59 a	0,61 c	0,38 f	56,18 a	3.818.061 a	3,32 a	2,53 a	0,62 f
M 5917 IPRO	1.320 g	680 f	0,87 d	1,17 d	0,13 g	947 g	1.000 h	896 f	640 a	0,59 f	0,31 f	0,51 d	12,22 i	266.035 g	0,26 f	0,36 f	0,49 d
Média	2.620	1.150	0,96	1,06	0,48	1.719	1.885	1.572	1.470	1,00	0,47	0,46	28,05	1246154	1,14	1,11	4,64
CV (%)	6,82	8,87	4,66	5,39	16,76	7,57	7,18	8,02	7,28	8,87	12,90	5,37	7,28	14,88	14,78	19,98	0,54

Para abreviação dos índices de tolerância à seca, ver Tabela 10. CV: Coeficiente de variação.

O índice de tolerância do rendimento (YI) permitiu classificar as cultivares de soja em seis grupos; os dois grupos com os maiores índices YI foi representado pelas cultivares TMG 2381 IPRO, 98R35 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO, ao passo que o grupo de menor índice de tolerância à seca foi representado pelas cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO.

O índice de resistência à seca (DI) permitiu enquadrar as cultivares de soja em seis grupos, na qual as cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 2381 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 7518 IPRO foram classificadas nos dois grupos com os maiores índices DI, enquanto que o grupo com menor índice DI foi representado pelas 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 11).

O índice de tolerância à seca, da estabilidade do rendimento (YSI), permitiu separar as cultivares de soja em sete grupos; as cultivares TMG 2383 IPRO, TMG 2381 IPRO, TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO e RK 7518 IPRO foram classificadas nos dois grupos com os maiores índices YSI, e as 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 tolerância à seca, do porcentual de suscetibilidade ao estresse (SSPI), permitiu enquadrar as cultivares de soja em nove grupos distintos, sendo que os dois grupos com os maiores índices SSPI foram representados pelas cultivares ST 797 IPRO e RK 8317 IPRO, e as cultivares TMG 7067 IPRO, RK 7518 IPRO e M 5917 IPRO foram classificadas no grupo de menor índice SSPI (Tabela 11).

O índice de tolerância abiótica (ATI) permitiu enquadrar as cultivares de soja em sete grupos, na qual as cultivares 98R50 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas nos dois grupos com os maiores índices ATI, enquanto que o grupo com menor índice ATI foi representado pelas 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 à seca do estresse modificado k_1 (k_1 STI), permitiu classificar as cultivares de soja em seis grupos distintos; os dois grupos com os maiores índices k_1 STI foram representados pelas cultivares 98R50 IPRO e RK 8317 IPRO, e as cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, RK 6719 IPRO e M 5917 IPRO foram classificadas no grupo com menor índice k_1 STI (Tabela 11).

O índice de tolerância à seca do 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 pelas 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 pelas cultivares TMG 7067 IPRO, TMG 7061 IPRO, 97R50 IPRO, HO Maracaí IPRO, BMX Foco IPRO, RK 6719

I PRO e M 5917 I PRO. O índice de sensibilidade à seca (SDI), permitiu classificar as cultivares de soja em sete grupos distintos, sendo que as cultivares TMG 2383 I PRO, TMG 2381 I PRO, TMG 7067 I PRO, TMG 7063 I PRO e RK 7518 I PRO representaram os dois grupos com os melhores índices SDI, ao passo que as cultivares TMG 2378 I PRO, BMX Foco I PRO, ST 797 I PRO e ST 777 I PRO foram agrupadas no grupo com os piores índices SDI (Tabela 11).

O índice HM, YI, DI, k_1 STI e k_2 STI permitiram separar as cultivares de soja em seis grupos, ao passo que os índices SSI, RDI, STI, GMP, YSI, ATI e SDI permitiram classificar as cultivares em sete grupos distintos. Estes resultados indicam que estes índices de tolerância à seca foram menos sensíveis para diferenciar as cultivares de soja quanto a tolerância a seca. Por sua vez, o índice MP permitiu classificar as cultivares de soja em oito grupos, e os índices TOL e SSPI permitiram classificar as cultivares em nove grupos (Tabela 11). Estes resultados indicam que estes índices de tolerância são os mais sensíveis para identificar e diferenciar as cultivares de soja quanto a tolerância à seca. Menezes et al. (2014) avaliando diferentes índices para identificar a tolerância à seca em genótipos de sorgo granífero, constataram que os índices SSI, TOL, e YSI não são adequados para diferenciar a tolerância à seca em genótipos de sorgo granífero. 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 selecionar os cultivares de milho tolerantes à seca.

3.3.2 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 com e sem restrição hídrica. A análise de correlação reportou associação positiva entre os índices de tolerância à seca e o rendimento de grãos em condições irrigadas (Y_P) e de sequeiro (Y_S) (Tabela 12). Os maiores valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson foram obtidos para os índices STI ($r = 0,909$ para Y_P e $r = 0,886$ para Y_S), GMP ($r = 0,926$ para Y_P e $r = 0,901$ para Y_P), MP ($r = 0,975$ para Y_P e $r = 0,820$ para Y_S), HM ($r = 0,849$ para Y_P e $r = 0,961$ para Y_S), YI ($r = 0,673$ para Y_P e $r = 1,000$ para Y_S), k_1 STI ($r = 0,985$ para Y_P e $r = 0,657$ para Y_S) e k_2 STI ($r = 0,655$ para Y_P e $r = 0,991$ para Y_S). Todos estes coeficientes de correlação foram significativos à 0,1%. Menezes et al. (2014) verificaram valores semelhantes para os mesmos índices avaliando tolerância à seca em diferentes genótipos de sorgo granífero. Portanto, estes índices são os mais adequados para selecionar os cultivares de soja com maior potencial de rendimento de grãos, tanto em condições de restrição hídrica (sequeiro), como em condições sem restrição hídrica (sistema irrigado).

Tabela 12. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o rendimento de grãos de soja sob condições ambientais favoráveis e adversas (sistema irrigado e sequeiro) e os índices de tolerância à seca. UEMS/Cassilândia, 2018/2019.

	Y _P	Y _S	SSI	RDI	STI	GMP	MP	HM	TOL	YI	DI	YSI	SSPI	ATI	k ₁ STI	k ₂ STI	SDI
Y_P	1																
Y_S	0,673***	1															
SSI	0,541**	-0,236 ^{NS}	1														
RDI	-0,541**	0,236 ^{NS}	-1,00***	1													
STI	0,909***	0,886***	0,191 ^{NS}	-0,191 ^{NS}	1												
GMP	0,926***	0,901***	0,200 ^{NS}	-0,200 ^{NS}	0,985***	1											
MP	0,975***	0,820***	0,349 ^{NS}	-0,349 ^{NS}	0,968***	0,986***	1										
HM	0,849***	0,961***	0,038 ^{NS}	-0,038 ^{NS}	0,973***	0,985***	0,944***	1									
TOL	0,934***	0,364 ^{NS}	0,796***	-0,796***	0,715***	0,730***	0,832***	0,604**	1								
YI	0,673***	1,000***	-0,236 ^{NS}	0,236 ^{NS}	0,886***	0,901***	0,820***	0,961***	0,364 ^{NS}	1							
DI	0,139 ^{NS}	0,817***	-0,738***	0,738***	0,470*	0,491*	0,351 ^{NS}	0,625**	-0,221 ^{NS}	0,817***	1						
YSI	-0,541**	0,236 ^{NS}	-1,000***	1,000***	-0,191 ^{NS}	-0,200 ^{NS}	-0,349 ^{NS}	-0,038 ^{NS}	-0,796***	0,236 ^{NS}	0,738***	1					
SSPI	0,934***	0,364 ^{NS}	0,796***	-0,796***	0,715***	0,730***	0,832***	0,604**	1,000***	0,364 ^{NS}	-0,221 ^{NS}	-0,796***	1				
ATI	0,976***	0,588**	0,592**	-0,592**	0,887***	0,872***	0,932***	0,784***	0,945***	0,588**	0,029 ^{NS}	-0,592***	0,945***	1			
k₁STI	0,985***	0,657***	0,524*	-0,524*	0,922***	0,911***	0,959***	0,835***	0,922***	0,657***	0,120 ^{NS}	-0,524*	0,922***	0,995***	1		
k₂STI	0,655**	0,991***	-0,243 ^{NS}	0,243 ^{NS}	0,893***	0,888***	0,803***	0,950***	0,345 ^{NS}	0,991***	0,810***	0,243 ^{NS}	0,345 ^{NS}	0,587**	0,655***	1	
SDI	0,541**	-0,236 ^{NS}	1,000***	-1,000***	0,191 ^{NS}	0,200 ^{NS}	0,349 ^{NS}	0,038 ^{NS}	0,796***	-0,236 ^{NS}	-0,738***	-1,000***	0,796***	0,592**	0,524*	-0,243 ^{NS}	1

Para abreviação dos índices de tolerância à seca, ver Tabela 2. *, ** Significativo a 0,05 e 0,01; NS: não significativo na probabilidade de 0,05.

Os índices TOL ($r = 0,934$ para Y_P e $r = 0,364$ para Y_S), SSPI ($r = 0,934$ para Y_P e $r = 0,364$ para Y_S) e ATI ($r = 0,976$ para Y_P e $r = 0,588$ para Y_S), também apresentaram altos valores de coeficientes de correlação para as condições sem restrição hídrica (Y_P), e valores de coeficientes de correlação baixos para as condições de sequeiro com restrição hídrica (Y_S). Por sua vez, o índice DI ($r = 0,139$ para Y_P e $r = 0,817$ para Y_S) mostrou altos valores de coeficiente de correlação para as condições de sequeiro com restrição hídrica (Tabela 12). Os índices SSI, RDI, TOL, YSI, SSPI e SDI não são adequados para identificar as cultivares de soja com rendimento de grãos superiores em condições de restrição hídrica (Tabela 12).

Os valores relativamente baixos dos coeficientes de correlação ($r = 0,673$; $p = 0,001$) entre (Y_P) e (Y_S), apontam que as cultivares que tiveram melhor desempenho produtivo nas condições irrigadas sem estresse hídrico, não necessariamente foram as mais produtivas no sistema de sequeiro com restrição hídrica (Tabela 12). 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 ideais, de modo que, os genótipos em sua maioria, apresentam comportamentos distintos em 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 o método do ranqueamento e análises multivariadas, para identificar genótipos superiores para os ambientes adversos.

3.3.3 Método do ranqueamento

A identificação 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 12). Por exemplo, de acordo com os índices SSI, RDI e YSI as cultivares de soja TMG 2381 IPRO e RK 7518 IPRO foram consideradas tolerantes à seca, enquanto que de acordo com os índices STI, GMP, MP, SSPI, k_1 STI e k_2 STI a cultivar RK 8317 IPRO foi considerada a 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). Com base no exposto, este estudo propôs o aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente, utilizado por Farshadfar et al. (2012), ao separar as 22 cultivares de soja nos seus respectivos quartis com base no valor médio do ranqueamento de cada cultivar.

Tabela 13. Ranqueamento, pontuação média dos ranqueamentos (\bar{R}) e desvio padrão da média dos ranqueamentos (DP) para o rendimento de grãos e índices de tolerância à seca dos 22 cultivares de soja cultivados sob condições ambientais favoráveis e adversas. UEMS/Cassilândia, 2018/2019.

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

[†] T = refere-se a uma cultivar de soja tolerante à restrição hídrica, 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 restrição hídrica com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 16,76 a 22.

Considerando todos os índices de tolerância à seca, as cultivares de soja TMG 2381 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram enquadradas na melhor classificação média no método do ranqueamento, recebendo pontuações entre 4,9 e 6,2 (Tabela 13) e, portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica. A cultivar RK 6719 IPRO recebeu a maior pontuação no método do ranqueamento e, então, foi classificada como suscetível à restrição hídrica (Tabela 13).

3.3.4 Análise multivariada de agrupamento hierárquico

A análise multivariada de agrupamento hierárquico, das 22 cultivares de soja, com base no rendimento de grãos em condições irrigadas e de sequeiros e nos 15 índices de tolerância à seca enquadraram as cultivares de soja em quatro grupos com 5, 5, 4 e 8 cultivares, respectivamente (Figura 10).

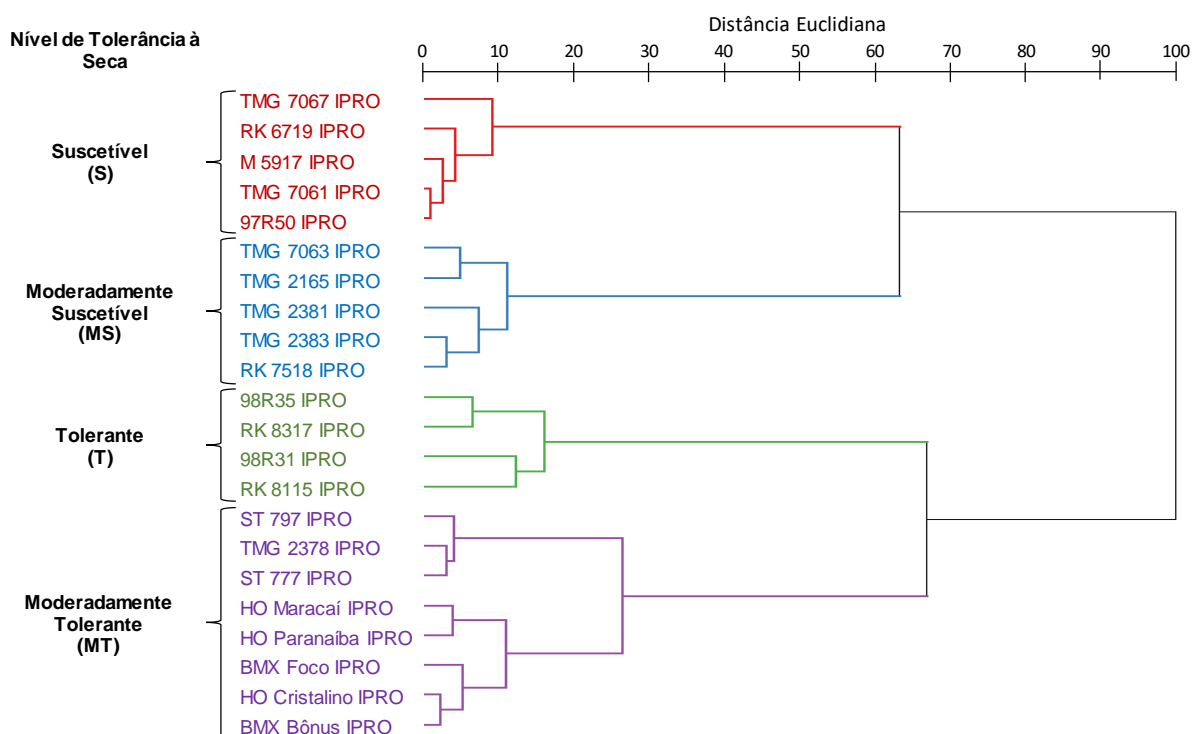


Figura 10. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 22 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward utilizando o rendimento de grãos em cultivo irrigado (Y_P) e sequeiro (Y_S) e os índices de tolerância à seca (SSI, RDI, STI, GMP, MP, HM, TOL, YI, DI, YSI, SSPI, ATI, k_1 STI, k_2 STI e SDI).

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 as cultivares com os valores intermediários dos índices de tolerância

à seca e, portanto, as cultivares pertencentes a estes grupos foram classificadas como moderadamente suscetíveis e moderadamente tolerantes à restrição hídrica, respectivamente. Por sua vez, o terceiro grupo representou as cultivares com os maiores índices de tolerância à seca e, assim, classificadas como as mais tolerantes aos efeitos negativos da restrição hídrica.

Diante do exposto, as cultivares de soja 98R35 IPRO, RK 8317 IPRO, 98R31 IPRO e RK 8115 IPRO foram identificadas como as mais tolerantes à restrição hídrica, ao passo que as cultivares TMG 7067 IPRO, RK 6719 IPRO, M 5917 IPRO, TMG 7061 IPRO e 97R50 IPRO foram classificadas como as mais suscetíveis à restrição hídrica (Figura 10).

3.3.5 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 11). 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_1STI (-0,308), HM (-0,301), ATI (-0,300), SSPI (-0,265), Y_S (-0,261), YI (-0,261) e k_2STI (-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, a cultivar pode ser considerada tolerante à restrição hídrica.

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância das cultivares de soja à restrição hídrica. Como os pesos são negativos, quando maior for os índices de tolerância à seca, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância da cultivar de soja. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância do cultivar é melhor. Para as cultivares de soja RK 8317 IPRO, 98R35IPRO e RK 8115 IPRO tiveram os melhores índices de desempenho global, respectivamente, e, portanto, estas cultivares foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica. Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram observados nas cultivares de soja TMG 7067 IPRO e M 5917 IPRO, e assim as mesmas foram classificadas como suscetíveis à restrição hídrica.

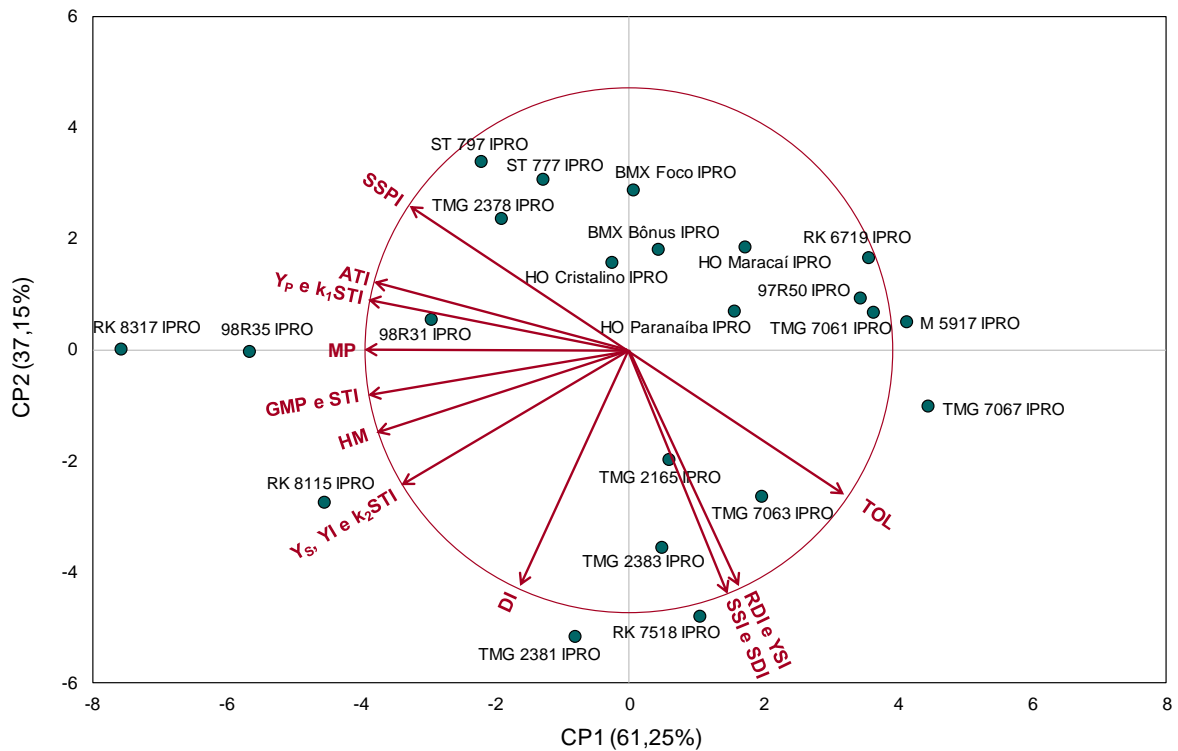


Figura 11. Diagrama biplot com base nos primeiros e segundos componentes principais para o rendimento de grãos em cultivo irrigado (Y_p) e sequeiro (Y_s) e índices de tolerância à seca (SSI, RDI, STI, GMP, MP, HM, TOL, YI, DI, YSI, SSPI, ATI, k_1 STI, k_2 STI e SDI).

Em síntese, os três métodos de agrupamento utilizados (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal) agruparam as cultivares de soja RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO como tolerantes à seca (Tabela 13, Figuras 10 e 11), ao passo que a cultivar 98R35 IPRO foi classificada como tolerante à seca pelas análises de agrupamento hierárquico e análise de componente principal (Figuras 10 e 11). Portanto, são as cultivares mais indicadas para serem recomendadas para o cultivo em regiões com ocorrência de restrição hídrica.

Os métodos do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais agruparam, respectivamente, 1, 5 e 2 cultivares de soja como suscetíveis à restrição hídrica (Tabela 13, Figuras 10 e 11). A cultivar de soja RK 6719 IPRO foi classificada como suscetível à restrição hídrica pelo método do ranqueamento e análise de agrupamento hierárquico. Por sua vez, as cultivares TMG 7067 IPRO e M 5917 IPRO foram classificadas como suscetíveis à restrição hídrica pelas análises de agrupamento hierárquico e componentes principais (Figuras 10 e 11). Portanto, quando a semeadura da soja for realizada em regiões com alta probabilidade de ocorrência de restrição hídrica durante o cultivo, estas cultivares não devem ser recomendadas para a semeadura.

3.4 CONCLUSÃO

As cultivares de soja 98R35 IRPO, RK 8317 IPRO e RK 8115 IPRO possuem maior tolerância à seca, e são as cultivares mais indicadas para serem cultivadas em regiões com ocorrência de restrição hídrica.

As cultivares TMG 7067 IPRO, M 5917 IPR, RK 6719 IPRO possuem maior susceptibilidade à restrição hídrica, e não devem ser recomendadas para o cultivo em condições de sequeiro em regiões com ocorrência de deficiência hídrica.

Os índices de tolerância STI, MP, HM, YI e ATI foram os mais indicados para selecionar as cultivares de soja com maior tolerância à seca e com alto potencial de rendimento de grãos em sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLUM, A. **Plant breeding for stress environments**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1988.

BOUSLAMA, M.; SCHAPAUGH, W.T. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. **Crop Sci J**, 24:933-937, 1984.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**, v. 6, Safra 2018/2019, n. 7, 2019.

DICKIE, A., MAGNO, I., GIAMPIETRO, J., DOLGINOW, A. **Challenges and opportunities for conservation, agricultural production, and social inclusion in the Cerrado biome**. California Environmental Associates (CEA): San Francisco, CA-USA. 2016, 51p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

FARIA, A.P.; FONSECA JÚNIOR, N. S.; DESTRO, D.; FARIA, R. T. Ganho Genético na Cultura da Soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 71-78, 2007.

FARSHADFAR, E.; JAVADINIA, J. Evaluation of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes for drought tolerance. **Seed and Plant Improv J**. 27(4): 517-537, 2011.

FARSHADFAR, E.; POURSIHABIDI, M. M.; ABOOGHADAREH, A. R. P. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 13, p.891-903, 2012.

FARSHADFAR, E.; SUTKA, J. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. **Cereal Res Commun**, 31:33-39, 2002.

FERNANDEZ, G.C.J. **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 13-16 August 1992, 257-270 p.

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

FIOREZE, S.L.; PIVETTA, L.A.; FANO, A.; MACHADO, F.R.; GUIMARÃES, V.F. Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa de vegetação. **Revista Ceres**, 58: 342-349, 2011.

FISCHER, R.A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. **Aust J Agr Res**, 29:897-912, 1978.

FISCHER, R.A.; REES, D.; SAYRE, K.D.; LU, Z.M.; CONDON, A.G.; SAAVEDRA, A.L. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. **Crop Sci** 38:1467-1475, 1998.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J.; GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S. & MEDRANO, H. Decreased rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytol.**, 172:73-82, 2006.

GAVUZZI, P.; RIZZA, F.; PALUMBO, M.; CAMPALINE, R.G.; RICCIARDI, G.L.; BORGHI, B. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. **Plant Sci** 77:523-531, 1997.

GUNES, A.; PILBEAM, D.J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress. In: Growth, antioxidant mechanisms, and peroxidation and lipid peroxidation. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 39:1885-1903, 2008.

HALL, A.E. **Is dehydration tolerance relevant to genotypic differences in leaf senescence and crop adaptation to dry environments**. In: Close TJ, Bray EA (Eds.) Plant Responses to cellular Dehydration during environmental stress, 1993.

JAFARI, A.; PAKNEJAD, F.; JAMI AL-AHMADI, M. Evaluation of selection indices for drought tolerance of corn (*Zea mays* L.) hybrids. **Inter J Plant Prod**, 3(4):33-38, 2009.

KRON, A.P.; SOUZA, G.M.; RIBEIRO, R.V. Water deficiency at different developmental stages of *Glycine max* can improve drought tolerance. **Bragantia**, 67:43-49, 2008.

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

MERTZ-HENNING, L.M. et al. Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. **Agronomy**, 8:1-11, 2018.

MOHAMMADI, R.; ARMION, M.; KAHRIZI, D.; AMRI, A. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions. **Int. J. Plant Prod**. 4: 11-24, 2010.

MOOSAVI, S.S.; SAMADI, B.Y.; NAGHAVI, M.R.; ZALI, A.A.; DASHTI, H. POURSHAHBAZI, A. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. **Desert**, 12:165-178, 2008.

NAGHAVI, M. R.; POUR-ABOUGHADAREH, A.; KHALILI, M. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v.5, n.3, p.388-393, 2013.

PATANÈ, C.; SAITA, A.; SORTINO, O. Comparative effects of salt and water stress on seed germination and early embryo growth in two cultivars of sweet sorghum. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.199, p. 30-37, 2013.

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

ZOZ, T.; STEINER, F.; GUIMARÃES, V.F.; CASTAGNARA, D.D.; MEINERZ, C.C.; FEY, R. Peroxidase activity as an indicator of water deficit tolerance in soybean cultivars. **Bioscience Journal**, v. 29, Supplement 1, p. 1664-1671, 2013.