



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DOUTORADO EM FITOTECNIA

JOSÉ RICARDO TAVARES DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DE CULTIVARES DE SOJA IRRIGADA NAS CONDIÇÕES DO
SEMIÁRIDO**

MOSSORÓ

2020

JOSÉ RICARDO TAVARES DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DE CULTIVARES DE SOJA IRRIGADA NAS CONDIÇÕES DO
SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia: Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Práticas Culturais; Melhoramento Genético.

Orientador: Aurélio Paes Barros Júnior, Prof. D. Sc.

Coorientador: Glauber Henrique de Sousa Nunes, Prof. D. Sc.

Coorientadora: Lindomar Maria da Silveira, Prof^a. D. Sc.

MOSSORÓ

2020

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

A345e Albuquerque, José Ricardo Tavares de .
Estudo de cultivares de soja irrigada nas
condições do semiárido / José Ricardo Tavares de
Albuquerque. - 2020.
82 f. : il.

Orientadora: Aurélio Paes Barros Júnior.
Coorientadora: Glauber Henrique de Sousa Nunes.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Fitotecnia, 2020.

1. Glycine max L. . 2. Análise multivariada.
3. Modelos mistos. 4. Produtividade. 5.
Oleaginosa. I. Barros Júnior, Aurélio Paes ,
orient. II. Nunes, Glauber Henrique de Sousa, co-
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ RICARDO TAVARES DE ALBUQUERQUE

**ESTUDO DE CULTIVARES DE SOJA IRRIGADA NAS CONDIÇÕES DO
SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia: Fitotecnia.

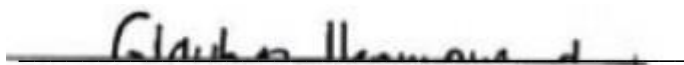
Linha de Pesquisa: Práticas Culturais; Melhoramento Genético.

Defendida em: 18 / 12 / 2020.

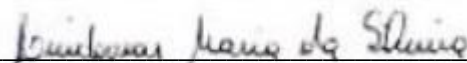
BANCA EXAMINADORA



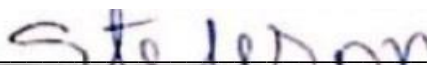
Aurélio Paes Barros Júnior, Prof. D. Sc. (UFERSA)
Presidente (Orientador)



Glauber Henrique de Sousa Nunes, Prof. D. Sc. (UFERSA)
Coorientador



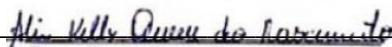
Lindomar Maria da Silveira, Profª. D. Sc. (UFERSA)
Coorientadora



Stefeson Bezerra de Melo, Prof. D. Sc. (UFERSA)
Membro Examinador



Paulo Fernando de Melo Jorge Vieira, Pesquisador, D. Sc. (EMBRAPA)
Membro Examinador



Aline Kelly Queiroz do Nascimento, Pesquisadora, D. Sc. (SYNGENTA)
Membro Examinador

Aos meus pais, Paulo Tavares Sobrinho e Maria Nunes de Albuquerque Tavares, aos meus irmãos, Germano Diego Tavares de Albuquerque, Paulo Tavares Sobrinho Júnior, Antônio Vilécio Tavares de Albuquerque, Flávio Henrique Tavares de Albuquerque, Paula Raquel Tavares de Albuquerque, José Leonardo Tavares de Albuquerque, Maria Cristina Tavares de Albuquerque e José Marcelo Tavares de Albuquerque, as minhas cunhadas, Sanaelly e Querubina, ao meu cunhado, Gabriel, as minhas sobrinhas, Ágatta e Camila, a minha enteada, Maria Eduarda, aos demais familiares, e a todos que acreditaram no meu potencial, me apoiando neste desafio.

E com muito amor e carinho especial, a minha esposa, Yasnaia Kaliana Soares da Costa Albuquerque, companheira de toda vida, pelos conselhos, compreensão, paciência, carinho, atenção e afeto.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR JESUS CRISTO, que é o caminho, a verdade e a vida, por ser o meu rochedo, o meu lugar forte, o meu libertador, o meu Deus, a minha fortaleza, a quem confio o meu escudo, a força da minha salvação, o meu alto refúgio e que onde eu colocar meus pés ele estará comigo.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia pela possibilidade de realização do doutorado, no suporte físico e recursos humanos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na realização dessa pesquisa.

Ao Professor orientador Aurélio Paes Barros Júnior e sua esposa coorientadora professora Lindomar Maria da Silveira, pelos ensinamentos, amizade e dedicação à educação pública de qualidade.

Ao professor coorientador Glauber Henrique de Sousa Nunes, pela orientação, atenção e paciência, contribuindo para meu crescimento profissional.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFRSA.

Aos servidores técnicos e auxiliares da UFRSA, em especial: Paulo César Ferreira, Francisco das Chagas, Camila Diógenes, Priscila, Erika, Bruno, Odonil, Flabênio, Antônio, Alderi, Nanã e a todos, que de forma direta e indireta contribuíram em cada fase na realização desse trabalho.

Aos amigos do Grupo de Estudos e Pesquisa em Produção Agrícola e Recursos Genéticos Vegetais (GEPPARG), Rayanne Maria, Ênio Flor, Hamurábi Anizio, Almir Rogério, Manoel Galdino, Fernando Sarmiento, Enielson Bezerra, Alex Monteiro, Michele Barboza, Flávio Pereira. Agradeço a todos pela ajuda na execução desse trabalho;

Ao Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, (INTA), INTA Marcos Juárez, INTA Pergamino, aos pesquisadores Diego Soldini, Javier Gilli, Maria Otegui, Alan Severini, aos amigos Alejandro Javier, Cristian Cazorla, Cristian Vissani, Andres Heredia, Lallo, Carlos Baleani, Juani Amas, El chaco e Octavio,

Aos amigos do Doutorado pela troca de conhecimentos, brincadeiras e amizade.

Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende de nossa vontade e perseverança.
(Albert Einstein)

RESUMO

ALBUQUERQUE, José Ricardo Tavares de. **Estudo de cultivares de soja irrigada nas condições do semiárido**. 2020. 82f. Tese (Doutorado em Agronomia: Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2020.

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a leguminosa de maior importância econômica. O interesse mundial pelo cultivo desta leguminosa deve-se à excelente combinação apresentada em termos de produtividade e baixo custo de produção além dos teores elevados de proteína (40%) e óleo (20%) das sementes. O Brasil é o maior exportador e o maior produtor da oleaginosa. No entanto no semiárido, a soja ainda não é semeada, embora algumas cultivares sejam rústicas e podem ser adaptadas nessa região. A identificação de genótipos com elevada produtividade e estabilidade de grãos nas condições de cultivo do semiárido brasileiro, caracterizadas por temperaturas elevadas e precipitação concentrada em poucos meses do ano, são de extrema importância. Quando genótipos são avaliados em diferentes condições ambientais podem ter sua performance relativa alterada levando ao fenômeno denominado interação genótipos por ambientes. Nesse sentido foram avaliados 21 cultivares de soja em blocos casualizados com quatro repetições durante as estações secas de 2016-2017 e chuvosas de 2017-2018 em Mossoró-RN, para o teor de óleo, a produtividade e seus componentes. Foram utilizadas as metodologias de regressão fatorial e análise de componentes principais com as predições da soma dos efeitos genotípicos e da interação para quantificar o papel de cinco covariáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambiente. Foram utilizadas também as metodologias GGE Biplot e da Média Harmônica da Performance Relativa dos valores Genotípicos para identificar genótipos adaptados e estáveis. A precipitação pluviométrica, a umidade relativa e a temperatura contribuem positivamente para aumentar o teor de óleo enquanto a temperatura mínima e a radiação solar, para reduzir. A interação genótipos por anos em soja tem forte influência sobre o ambiente, é predominantemente quantitativa e dificulta a recomendação de genótipos no semiárido. Os genótipos mais estáveis e adaptados para a produtividade de grãos e teor de óleo são BMX OPUS IPRO, Pampeana 007 RR, Pampeana 20 RR, BRS Sambaíba RR, P 98Y70 RR, BRS 333 RR, BRS 9280 RR, M 8644 IPRO, M 8372 IPRO e ST 920 RR.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Análise multivariada. Modelos mistos. Produtividade. Oleaginosa.

ABSTRACT

ALBUQUERQUE, José Ricardo Tavares de. **Study of soybean cultivars irrigated in semiarid conditions**. 2020. 82p. Thesis (D.Sc. in Phytotechny) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2020.

Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] is the legume of greatest economic importance. The worldwide interest in the cultivation of this legume is due to the excellent combination presented in terms of yield and low production cost due to the high levels of protein (40%) and oil (20%) of the seeds, respectively. Brazil is the largest exporter and the second largest producer of oilseeds. However, in the semiarid region, soybeans are not yet sown, although some cultivars are rustic and can be adapted in this region. The identification of genotypes with high yield and grain stability in the cultivation conditions of the Brazilian semiarid, characterized by high temperatures and concentrated precipitation in a few months of the year, are extremely important. When genotypes are evaluated under different environmental conditions, their relative performance may be altered, leading to the phenomenon called genotype-environment interaction. In this sense, 21 soybean cultivars were evaluated in randomized blocks with four replications during the dry seasons of 2016-2017 and rainy seasons of 2017-2018 in Mossoró-RN, for oil content, yield and its components. Factor regression and principal component analysis methodologies were used with the predictions of the sum of the genotypic effects and the interaction to quantify the role of five environmental covariates on the genotype by environment interaction. The GGE Biplot and Harmonic Average of Relative Performance methodologies of Genotypic values were also used to identify adapted and stable genotypes. Precipitation, relative humidity and temperature contribute positively to increase the oil content while the minimum temperature and solar radiation, to reduce. The interaction between genotypes for years in soy has a strong influence on the environment, is predominantly quantitative and makes it difficult to recommend genotypes in the semiarid region. The most stable genotypes adapted to grain yield and oil content are BMX OPUS IPRO, Pampeana 007 RR, Pampeana 20 RR, BRS Sambaíba RR, P 98Y70 RR, BRS 333 RR, BRS 9280 RR, M 8644 IPRO, M 8372 IPRO and ST 920 RR.

Keywords: *Glycine max* L. Multivariate analysis. Mixed models. Yield. Oilseed.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1** – Valores médios de temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm) para quatro safras de soja nos anos de 2016/2017, 2017.1, 2017.2 e 2018.1, Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....24
- Figura 2** – Distribuição dos anos de avaliação e covariáveis em função dos dois primeiros componentes principais. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....32
- Figura 3** – Contribuição de cinco covariáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais para interação G x A no teor de óleo e produtividade de grãos em genótipos de soja avaliados sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....35
- Figura 4** – Covariáveis-Biplots de acordo com os dois primeiros eixos gerados pela Análise de Componentes Principais entre cinco variáveis ambientais e os efeitos da interação GGE. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....37

CAPÍTULO II

- Figura 1** – Valores médios de temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm) para quatro safras de soja nos de 2016, 2017 e 2018, Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....47
- Figura 2** – Gráficos da Média vs estabilidade, “Quem vence onde” e do ordenamento de genótipos gerados pela metodologia GGE Biplot da produtividade de grãos em cultivares de soja avaliadas em quatro ambientes, Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....58

CAPÍTULO III

- Figura 1** – Dendrogramas UPGMA obtidos a partir da matriz de distâncias de Mahalanobis entre genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....74
- Figura 2** – Correlações entre matrizes de distâncias de Mahalanobis de genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....76

Figura 3 – Distâncias de Mahalanobis de genótipos de soja avaliados obtidas na análise conjunta de quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....77

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1** – Análises químicas do solo, em cada ano de cultivo, referente à profundidade de 0,20 m. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....25
- Tabela 2** – Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....26
- Tabela 3** – Análise de Deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para os caracteres de teor de óleo e produtividade em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....28
- Tabela 4** – Médias de cinco covariáveis ambientais e ecovalência de quatro ambientes de avaliação de genótipos de soja sob condições de semiárido. Mossoró-RN, 2020.....31
- Tabela 5** – Contribuição de covariáveis para a interação genótipos por ambiente em teor de óleo e produtividade avaliadas em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....33

CAPÍTULO II

- Tabela 1** – Análises químicas do solo, em cada ano de cultivo, referente à profundidade de 0,20 m. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....48
- Tabela 2** – Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....49
- Tabela 3** – Análise de deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para quatro caracteres em genótipos de soja avaliados em quatro ambientes em Mossoró-RN. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....53
- Tabela 4** – Estimativa da média harmônica dos valores genotípicos, performance relativa dos valores genotípicos e média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos do número de vagens por planta, número de grãos por vagens, peso de cem grãos e produtividade em genótipos de soja avaliados em quatro ambientes em Mossoró. Mossoró-RN, UFERSA,

2020.....55

CAPÍTULO III

- Tabela 1** – Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....69
- Tabela 2** – Análise de Deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para nove caracteres medidos em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.....72
- Tabela 3** – Contribuição do caráter para o autovalor λ_i na análise de componentes principais envolvendo genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020..... 75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	16
CAPÍTULO I – INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS SOBRE A INTERAÇÃO GENÓTIPOS x AMBIENTES EM SOJA NO SEMIÁRIDO		20
1	INTRODUÇÃO.....	22
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.1	Ambientes.....	23
2.2	Genótipos e delineamento experimental.....	25
2.3	Detalhes experimentais	26
2.4	Caracteres avaliados	27
2.5	Análise estatística	27
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
3.1	Estudo de covariáveis e ecovalências	30
3.2	Agrupamento dos ambientes.....	31
3.3	Contribuição de covariáveis ambientais para a interação G x A.....	32
3.4	Decomposição por valores singulares (DVS).....	34
3.5	Covariáveis-biplots gerados pela análise de componentes principais.....	36
4	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO II – ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE GENÓTIPOS DE SOJA EM CONDIÇÕES DE SEMIÁRIDO		43
1	INTRODUÇÃO.....	45
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	46
2.1	Ambientes.....	46
2.2	Genótipos e delineamento experimental.....	48
2.3	Detalhes experimentais.....	49
2.4	Caracteres avaliados.....	50
2.5	Análise estatística.....	50
2.5.1	Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG).....	50
2.5.2	Método GGE biplot.....	52
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52

3.1	Análise de deviance e componentes de variância.....	52
3.2	Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG).....	54
3.3	GGE biplot.....	57
3.3.1	Produtividade de grãos.....	57
4	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61
CAPÍTULO III – INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO GENÓTIPOS POR AMBIENTES NA DIVERGÊNCIA GENÉTICA DE SOJA		65
1	INTRODUÇÃO.....	67
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	68
2.1	Caracterização ambiental.....	68
2.2	Germoplasma.....	68
2.3	Detalhes experimentais.....	69
2.4	Descritores avaliados.....	70
2.5	Análise estatística.....	71
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é originária do continente asiático, mais especificamente da China, considerada uma das mais importantes leguminosas, originada de clima temperado, possui ampla adaptação aos climas subtropicais e tropicais e, em função dos teores elevados de proteína (40%) e óleo (20%) e de sua produtividade de grãos, apresenta grande importância econômica (BONATO et al., 2000; SEDIYAMA et al., 2005).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial com aproximadamente 122,1 milhões de toneladas produzidas na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020). O agronegócio brasileiro tem sido impulsionado principalmente pelo “complexo soja”, destacando-se pela sua considerável participação nas exportações sob a forma de farelo, óleo e grãos, assim como o suprimento do mercado interno de óleos comestíveis e derivados proteicos.

No Brasil a cultura da soja é considerada umas das principais culturas anuais, em função do crescimento da produção e do aumento da capacidade produtiva. Buscando-se obter maiores retornos econômicos e incrementos na produtividade da cultura, faz-se necessário a disponibilização de tecnologias no setor produtivo (CASTRO, 2006; KLAHOLD et al., 2006, ALBRECHT et al., 2011).

Assim, é necessário explorar racionalmente a cultura, através do conhecimento da adaptabilidade das cultivares às diversas condições de produção e do manejo que elas passam a requerer. Para isso, dentre as características exploradas, estão: a precocidade, o tipo de crescimento, o comprimento do período juvenil e a resposta à densidade de plantas. Essas características podem garantir porte e produtividade adequados, nas diversas épocas de semeadura, principalmente em clima quente. Entretanto, para se conseguir esse resultado, há necessidade de melhor conhecimento das cultivares em diferentes épocas de cultivo (OLIVEIRA, 2010).

Em razão disso, o avanço da área de cultivo de soja vem ocorrendo em todas as regiões do País. Nos últimos anos, têm-se ampliado a fronteira agrícola da soja, especialmente no Nordeste (ALCANTARA NETO et al., 2011; ROCHA et al., 2012). A referida região apresenta grande demanda para compor a alimentação humana e animal, não necessitando da importação de estados do Centro-Sul. Além disso, a região é beneficiada pela posição estratégica do território, com proximidade de portos, resultando no menor custo de frete para escoamento da produção para exportação. A grande vantagem é a possibilidade de produção durante todo o ano, desde que haja irrigação. Como o Nordeste é próximo ao Trópico do Equador, a variação climática é menor, especialmente quanto ao fotoperíodo.

Com o potencial de cultivo na região Nordeste também surge os novos desafios para a pesquisa torná-la uma região com elevada produção de grãos de soja. Um deles é a identificação de genótipos com elevada produtividade e estabilidade de grãos nas condições de cultivo do semiárido brasileiro caracterizadas por temperaturas elevadas e precipitação concentrada em poucos meses do ano (EMBRAPA, 2019). As referidas condições climáticas fazem com que o ciclo de cultivo da soja produzida no semiárido seja inferior àquele das regiões Sul e Centro-oeste do país, a qual apresenta elevado potencial para produção de sementes de alta qualidade (EMBRAPA, 2019).

As informações para a recomendação de cultivares são advindas de experimentos realizados em diferentes ambientes. Um dos grandes desafios da pesquisa é entender a interação genótipos por ambientes. Para isso, é indispensável informações sobre os fatores ambientais que determinam o comportamento diferenciado dos genótipos. A possibilidade de explorar a interação $G \times A$ depende do entendimento das características relacionadas à expressão da interação, dos genótipos e das variáveis ambientais. Quando informações genotípicas e/ou ambientais estão disponíveis, é possível avaliar seus efeitos sobre a interação (GAUCH, 2006). As variáveis ambientais têm sido utilizadas para explicar a interação $G \times A$ em várias culturas, como sorgo (SAEED; FRANCIS, 1984), milho (RAMASAMY et al., 1996), trigo (BRANCOURT-HULMEL; LECOMTE, 2003; VOLTAS et al., 2005), soja (OLIVEIRA et al., 2006) e melão (NUNES et al., 2011).

A fim de fornecer subsídios ao cultivo da soja no semiárido, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência de variáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes e identificar genótipos adaptados e estáveis para o teor de óleo, a produção de grãos e seus componentes.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, L. P. et al. Manejo de biorregulador nos componentes de produção e desempenho das plantas de soja. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 6, p. 865-876, 2011.
- ALCANTARA NETO, F. et al. Análise de trilha do rendimento de grãos de soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Comunicata Scientiae**, v. 2, n. 2, p. 107-112, 2011.
- BONATO, E. R. et al. Teor de óleo e de proteína em genótipos de soja desenvolvidas após 1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2391-2398, 2000.
- BRANCOURT-HULMEL, M.; LECOMTE, C. Effect of environmental varieties of genotype x environment interaction of winter wheat: A comparison of biadditive factorial regression to AMMI. **Crop Science**, v. 43, n. 2, p. 608-617, 2003.
- CASTRO, P. R. C. **Agroquímicos de controle hormonal na agricultura tropical**. Piracicaba: Esalq, 2006. 46p.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 7 - Safra 2019/20 - Sétimo levantamento**, Brasília, p. 1-66, abril 2020. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 20 de abril de 2020.
- EMBRAPA. Sealba: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro/ PROCÓPIO, S. O. et al. **Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2019. 62 p.
- GAUCH, H. G. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. **Crop Science**, v. 46, n. 03, p. 1488-1500, 2006.
- KLAHOLD, C. A. et al. Resposta da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) à ação de bioestimulante. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 2, p. 179-185, 2006.
- NUNES, G. H. N. et al. Influência de variáveis ambientais sobre a interação genótipos x ambientes em meloeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 4, p. 1194-1199, 2011.
- OLIVEIRA, A. B. et al. Environmental and genotypic factors associated with genotype by environment interactions in soybean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 79-86, 2006.
- OLIVEIRA, A. B. Fenologia, desenvolvimento e produtividade de cultivares de soja em função de épocas de semeadura e densidades de plantas. **Dissertação - Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal**, 2010.
- RAMASAMY, P. et al. Contribution of weather variables to G x E interaction in finger millet genotypes. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 37, n. 1, p. 79-81, 1996.
- ROCHA, R. S. et al. Desempenho agrônômico de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude em Teresina-PI. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 1, p. 154-162, 2012.
- SAEED, M.; FRANCIS, C. A. Association of weather variables with genotype x environment interactions in grain sorghum. **Crop Science**, v. 24, n. 1, p. 13-16, 1984.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 2005. 969 p.

VOLTAS, J.; LÓPES-CÓRCOLES, H.; BORRÁS, G. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 3, p. 309-324, 2005.

CAPÍTULO I

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS SOBRE A INTERAÇÃO GENÓTIPOS x AMBIENTES EM SOJA NO SEMIÁRIDO

RESUMO

Pouco se conhece sobre a influência de covariáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes, bem como sobre a estabilidade e adaptabilidade de genótipos de soja cultivados nas condições de semiárido. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de variáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes e identificar genótipos adaptados e estáveis para a produtividade de grãos e teor de óleo. Foram avaliados 21 cultivares em blocos casualizados com quatro repetições nos anos de 2016, 2017 e 2018 em Mossoró-RN, para a produtividade e teor de óleo. Foram utilizadas as metodologias de regressão fatorial e análise de componentes principais com as predições da soma dos efeitos genotípicos e da interação para quantificar o papel de cinco covariáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambiente e o método da Média Harmônica da Performance Relativa dos Valores Genotípicos para identificar genótipos adaptados e estáveis. As covariáveis ambientais estudadas foram temperatura máxima e mínima, precipitação pluviométrica, umidade relativa e radiação solar. O modelo covariável-biplot é útil para relacionar fatores ambientais importantes e indicar a sua participação relativa na produtividade e teor de óleo. A precipitação pluviométrica, a umidade relativa e a temperatura contribuem positivamente para aumentar o teor de óleo enquanto a temperatura mínima e a radiação solar, para reduzir. Dentro dos limites do trabalho, a temperatura máxima influencia positivamente a produção de grãos enquanto a mínima reduz. Os genótipos mais estáveis e adaptados para a produtividade de grão e teor de óleo são BMX OPUS IPRO, P 98Y70 RR, BRS 333 RR, BRS 9280 RR, M 8644 IPRO, M 8372 IPRO e ST 920 RR.

Palavras-chave: *Glycine max* L., modelos mistos, REML/BLUP, análise multivariada, produtividade, oleaginosa.

INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL VARIABLES ON GENOTYPE X ENVIRONMENT INTERACTION IN SOYBEAN IN THE SEMIARID REGION

ABSTRACT

Little is known about the influence of environmental covariates on the interaction between genotypes and environments, or on the stability and adaptability of soybean genotypes grown in semiarid conditions. The objective of the present work was to evaluate the influence of environmental variables on the interaction between genotypes and environments and to identify adapted and stable genotypes for grain yield and oil content. Twenty-one cultivars were evaluated in randomized blocks with four replications in the years 2016, 2017 and 2018 in the northeastern semiarid region of Brazil, for yield and oil content. Factor regression methodologies and principal component analysis were used with predictions of the sum of the genotypic effects and the interaction to quantify the role of five environmental covariates in the genotype x environment interaction; the Harmonic Mean Method of Relative Performance of Genotypic Values was used for identifying adapted and stable genotypes. The environmental covariates studied were maximum and minimum temperature, rainfall, relative humidity and solar radiation. The covariance biplot model is useful for relating important environmental factors and indicating their relative effect on yield and oil content. Rainfall, relative humidity and maximum temperature contribute positively to increasing oil content while minimum temperature and solar radiation reduce it. Within the limits of the work, the maximum temperature positively influences grain production while the minimum reduces it. The most stable genotypes and those adapted for grain yield and oil content are BMX OPUS IPRO, P 98Y70 RR, BRS 333 RR, BRS 9280 RR, M 8644 IPRO, M 8372 IPRO and ST 920 RR.

Keywords: *Glycine max* L.; mixed models; REML/BLUP; multivariate analysis; yield; oilseed.

1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da soja é impulsionada pela expansão das fronteiras agrícolas, devido principalmente ao lançamento de cultivares adaptados as mais diversas condições climáticas do país, evidenciando o elevado potencial agrícola brasileiro para a referida oleaginosa. No semiárido, a soja ainda não é semeada, embora algumas cultivares sejam rústicas e podem ser adaptadas nessa região.

Quando genótipos são avaliados em diferentes condições ambientais podem ter sua performance relativa alterada levando ao fenômeno denominado interação genótipos por ambientes. O referido fenômeno tem grande relevância para os melhoristas uma vez que exerce efeito sobre a manifestação fenotípica em caracteres de interesse econômico, especialmente a produtividade. A presença da interação reduz a correlação genotípica ao longo dos ambientes e, por conseguinte, dificulta a recomendação de cultivares para uma determinada região (MONTVERDE et al., 2019).

O termo ambiente refere-se a toda a variação de origem não genética (MACKAY, 2010). Os fatores ambientais que contribuem para a interação genótipos por ambientes são classificados em previsíveis e imprevisíveis. O primeiro inclui as variações de ambiente que ocorrem de local para local, dentro da área de distribuição da cultura, tais como solo e técnicas agronômicas. O segundo está relacionado às variações como frequência e distribuição de chuvas, temperatura do ar e do solo, ocorrência de geadas, entre outras (ALLARD; BRASHAW, 1964). Assim sendo, a interação genótipos por ambientes pode ocorrer entre distintos locais (espacial) ou ao longo dos anos de avaliação (temporal) (MALOSETTI et al. 2016). Além disso, o ambiente pode ser a combinação de ano e local (BERNARDO, 2010).

Um dos grandes desafios da pesquisa é entender a interação genótipos por ambientes. Para isso, é indispensável informações sobre os fatores ambientais que determinam o comportamento diferenciado dos genótipos. A possibilidade de explorar a interação G x A depende do entendimento das características relacionadas à expressão da interação, dos genótipos e das variáveis ambientais. Quando informações genotípicas e/ou ambientais estão disponíveis, é possível avaliar seus efeitos sobre a interação (GAUCH, 2006). As variáveis ambientais têm sido utilizadas para explicar a interação G x A em várias culturas, como sorgo (SAEED; FRANCIS, 1984), milho (RAMASAMY et al., 1996), trigo (BRANCOURT-HULMEL; LECOMTE, 2003; VOLTAS et al., 2005), soja (OLIVEIRA et al., 2006) e melão (NUNES et al., 2011).

Nos referidos trabalhos, as variáveis ambientais são consideradas como covariáveis. É aplicada a regressão fatorial por quadrados mínimos ordinários e estima-se a contribuição de cada característica para a interação (VAN EEUWIJK et al., 1996). Outra maneira de estudar a contribuição das variáveis ambientais é considerar o efeito de genótipos aleatório e utilizar técnicas multivariadas como componentes principais ou análises de fatores. Um dos trabalhos pioneiros com essa abordagem foi realizado com êxito em feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) a partir de covariáveis ambientes sazonais e geográficas (CARVALHO, 2015).

Na cultura da soja, existem muitas investigações sobre a interação genótipos por ambientes, porém são escassos estudos envolvendo covariáveis ambientais. Oliveira et al. (2006) relatam que a altitude, temperatura máxima, fertilidade do solo e precipitação pluviométrica foram as covariáveis ambientais que mais explicaram a interação genótipos por ambientes em Goiás. No caso da região Nordeste, com predominância de altas temperaturas e precipitações pluviométricas concentradas em poucos meses do ano, existem poucas informações sobre a interação genótipos por ambientes associadas com variáveis ambientais. Além disso, pouco se conhece sobre a estabilidade e adaptabilidade dos genótipos quanto à produtividade e teor de óleo, sendo, portanto, necessário pesquisas para gerar informações que ajudem na consolidação da cultura no semiárido brasileiro.

O valor agregado à soja deve-se ao fato de esta ser uma das maiores e melhores fontes de proteína e óleo vegetais consumidos em todo mundo, atendendo de forma adequada as necessidades alimentares, tanto humanas quanto animais, dentro de uma gama de oleaginosas cultivadas no mundo a soja é a mais importante (RODRIGUES et al., 2017). A partir da soja, pode se obter vários produtos de forma direta ou indireta, devido à sua ampla variedade de propriedades que dispõe, como altos teores de proteínas, aminoácidos, óleo vegetal, antioxidantes e minerais (FREITAS et al., 2010).

Diante dessas considerações, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de variáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes e identificar genótipos adaptados e estáveis para a produção de grãos e teor de óleo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Ambientes

O estudo foi realizado durante as estações secas de 2016-2017 e chuvosas de 2017-2018 na fazenda experimental Rafael Fernandes, localizada no distrito de Alagoinha, zona rural de Mossoró, Rio Grande do Norte, localizado geograficamente a 5° 03'37"S 37°

23°50'W Gr e 72 m de altitude, distando 20 km da cidade de Mossoró-RN. Segundo Thornthwaite, o clima local é DdAa', ou seja, semiárido (CARMO FILHO et al., 1991).

Os dados meteorológicos médios do período de realização dos experimentos foram obtidos a partir de estação meteorológica instalada a 1,80 km da área experimental (Figura 1). Os ensaios foram instalados nas seguintes datas de plantio, 25 de setembro de 2016, 29 de março de 2017, 30 de setembro de 2017 e 16 de março de 2018.

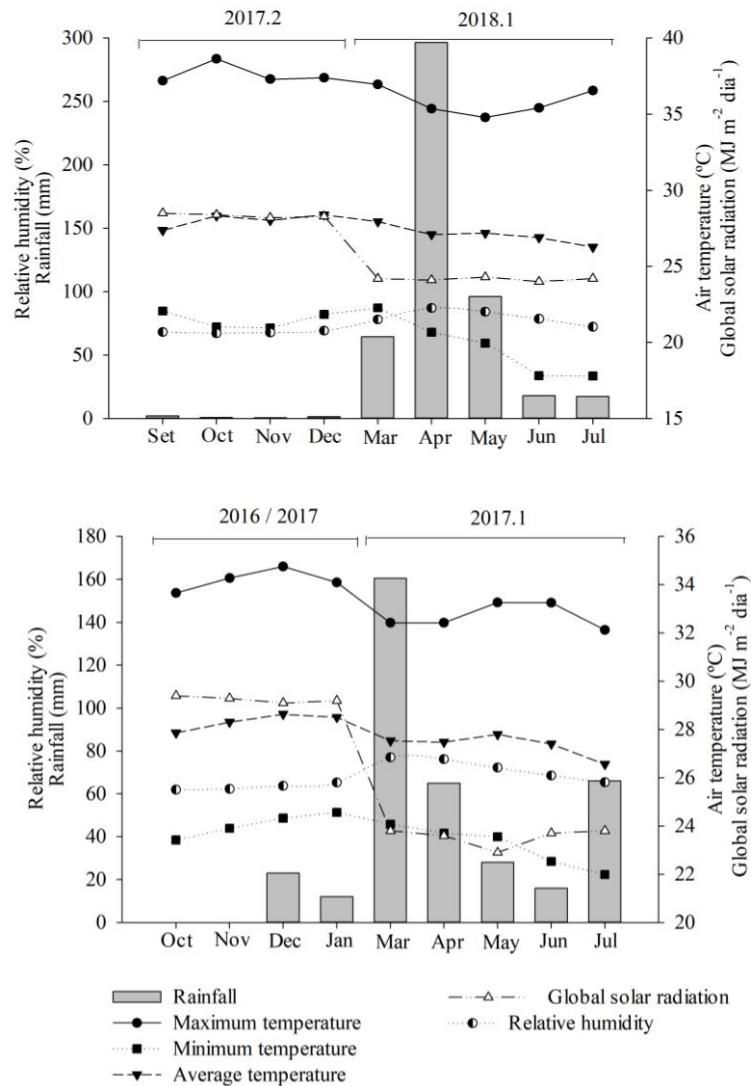


Figura 1 - Valores médios de temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e precipitação (mm) para quatro safras de soja nos anos de 2016/2017, 2017.1, 2017.2 e 2018.1. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Argissólico franco arenoso (EMBRAPA, 2006), cujas análises químicas, na profundidade de 0,20 m, antes da instalação de cada experimento, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análises químicas do solo, em cada ano de cultivo, referente à profundidade de 0,20 m. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Safras	N (g kg ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	K -----mg/dm ³ -----	P	Na	Ca	Mg	pH	CE
				-----mg/dm ³ -----		cmol _c /dm ³			dS m ⁻¹
2016/17	0,15	8,03	54,03	4,23	8,30	2,30	1,20	6,64	0,56
2017.1	0,42	12,95	41,71	2,17	8,61	1,05	0,93	6,32	0,67
2017.2	0,35	11,78	53,73	3,50	4,20	1,00	1,12	5,87	0,73
2018.1	0,41	10,53	27,12	2,34	8,54	1,56	1,24	6,2	0,47

*CE = condutividade elétrica; MO = matéria orgânica. P, K⁺ e Na⁺: Mehlich (HCl+H₂SO₄); Ca²⁺, Mg²⁺: KCl 1M.

2.2 Genótipos e delineamento experimental

Foram avaliados 21 genótipos de soja (Tabela 2) em blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas foram formadas por quatro fileiras de plantas com 5 m de comprimento, espaçamento de 0,50 m entre fileiras e 0,07 m entre plantas. A área útil da parcela continha 4 m², sendo colhidas às duas fileiras centrais, desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades. Os genótipos estudados foram cedidos pela Embrapa Meio-Norte.

Tabela 2 - Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Categoria	Identificação	Nome	Grupo (Maturação)	Ciclo (dias)
1	G02	‘BRS Carnaúba’	9.6	101
	G03	‘BRS Pérola’	8.8	103
	G04	‘BRS Tracajá’	9.2	101
	G05	‘BRS Sambaíba’	9.3	100
	G07	‘BRS 8590’	8.5	104
2	G01	‘BMX OPUS IPRO’	8.6	101
	G08	‘BRS 9383 IPRO’	9.3	103
	G09	‘BRS 9180 IPRO’	9.1	111
	G12	‘M 8644 IPRO’	8.6	102
	G13	‘M 8372 IPRO’	8.3	106
3	G06	‘BRS Sambaíba RR’	9.3	107
	G10	‘BRS 333 RR’	9.4	102
	G11	‘BRS 9280 RR’	9.2	105
	G14	‘P 98Y70 RR’	8.7	102
	G15	‘ST 920 RR’	9.2	106
	G16	‘Pampeana 10 RR’	9.8	111
	G17	‘Pampeana 20 RR’	10.0	118
	G18	‘Pampeana 40 RR’	9.5	111
	G19	‘Pampeana 50 RR’	9.6	111
	G20	‘PAS 13565-74 RR’	9.5	117
G21	‘Pampeana 007 RR’	9.7	111	

Categoria 1: genótipos de soja convencionais. Categoria 2: genótipos de soja de alto rendimento, resistentes ao glifosato e que apresentam proteção e supressão contra algumas pragas soja. Categoria 3: genótipos de soja resistentes ao glifosato.

2.3 Detalhes experimentais

As sementes foram inoculadas antes da semeadura com inoculante turfoso (TotalNitro Ultra) aplicado na dose de 4 g de inoculante/1 kg de sementes e líquido (TotalNitro Full) aplicado no sulco de plantio, sobre as sementes, na dose de 500 ml/ha, assegurando que as sementes foram completamente cobertas pelo inoculante. Os inoculantes foram obtidos junto à Total Biotecnologia, Curitiba, Paraná, Brasil. A semeadura foi realizada manualmente, com o auxílio de régua de madeira previamente perfuradas, de acordo com o espaçamento desejado.

O controle de plantas daninhas foi realizado manualmente com enxadas após a semeadura, conforme recomendado por Dugje et al. (2009). Devido à instabilidade pluviométrica no período de instalação dos experimentos, houve complementação hídrica quando necessário. As irrigações foram efetuadas por meio da aspersão, com turno de rega

diária parcelada em duas aplicações (manhã e tarde), conforme requerimento hídrico da cultura, com base na evapotranspiração de referência (ET_o). Sendo que, no período chuvoso a irrigação foi realizada apenas quando necessário.

A adubação foi realizada conforme recomendação para a cultura e com base na análise de solo, sendo aplicados, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, por ocasião do plantio, e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, em cobertura (GOMES; COUTINHO, 2008). As fontes de fósforo e potássio foram, super fosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

2.4 Caracteres avaliados

Dois caracteres foram avaliados: a) teor de óleo: determinado a partir da seleção de 30 g (moídas) de sementes de cada parcela. Os teores porcentuais de óleo nas amostras foram determinados em grãos de soja íntegros pela técnica da Refletância do Infravermelho Próximo (NIR) e expressos em porcentagem (%), segundo Heil (2010); e b) produtividade: na maturidade fisiológica (95% das vagens maduras), as plantas de soja foram colhidas nas duas fileiras centrais de cada parcela, 4 m², desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades. Após a colheita, as plantas foram trilhadas e as sementes então pesadas, depois de secas (12% de umidade) e limpas, para a determinação do rendimento dos grãos (CARVALHO, 2014).

2.5 Análise estatística

Para avaliar os efeitos específicos das covariáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes, foram realizadas análises sucessivas de regressão linear múltipla com seleção "stepwise" conforme detalhado por Nunes et al. (2011). A análise multivariada para estudar o efeito das covariáveis ambientais sobre a interação genótipos por ambientes foi realizada conforme descrito por Carvalho (2015). Todas as análises foram realizadas pelo software R (R CORE TEAM, 2020).

Para a análise REML/BLUP foi utilizado o seguinte modelo misto: $y = Xb + Zg + Wc + e$, em que y , b , g , c , e correspondem, respectivamente, aos vetores de dados, de efeitos fixos (médias de blocos através dos ambientes), de efeitos dos genótipos (aleatórios), de efeitos da interação genótipo x ambiente (aleatórios) e de erros aleatórios. Enquanto X , Z e W são as matrizes de incidência para b , e , e c , respectivamente. De posse dos efeitos obtidos via análise de deviance conjunta, os valores genotípicos preditos foram obtidos por $\mu + g_i$, em que μ é a média de todos os locais e g_i é o efeito genotípico livre da interação genótipo x ambiente. O critério para a seleção conjunta dos genótipos considerando simultaneamente a estabilidade e

a adaptabilidade foi dado pela estatística Média Harmônica da Performance Relativa dos Valores Genotípicos (RESENDE, 2007). Para realizar essas análises foi utilizado o programa SELEGEN (RESENDE, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se efeito significativo para genótipos e para a interação genótipos por ambientes (G x A) ($p < 0,05$) nos dois caracteres avaliados (Tabela 3).

A acurácia seletiva de seleção que mede a correlação entre os valores genotípicos preditos e observados variou de 0,71 (produtividade) a 0,73 (teor de óleo). A razão entre os coeficientes de variação genotípica e residual foram inferiores à unidade para todos os caracteres.

A variância fenotípica (V_{FEN}) foi explicada principalmente pela interação G x A para ambas as variáveis (Tabela 3). A razão entre os componentes de variância V_{GA}/V_G foi sempre superior à unidade. As estimativas variaram de 0,70 (teor de óleo) a 3,74 (produtividade). Observou-se baixa correlação genotípica quando se considera todos os ambientes com valores inferiores a 0,21.

Tabela 3 - Análise de Deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para os caracteres de teor de óleo e produtividade em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Efeito	LRT (Teste de Razão de Verossimilhança) – (χ^2)	
	Teor de óleo (%)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
G	4,82 ^{**}	3,99 [*]
GA	373,71 ^{**}	237,89 ^{**}
REML	Estimativas (Componentes de variância e Parâmetros genéticos)	
V_G	0,811 (20,53%)	147737,985 (17,23)
V_{GA}	2,764 (69,96%)	551814,410 (64,36)
V_E	0,376 (9,2%)	157793,675 (18,40)
V_{FEN}	3,951	857346,070
h^2_{mg}	0,53	0,50
A_S	0,73	0,71
r_G	0,23	0,21
V_{GA}/V_G	0,70	3,74
CV_G	4,28	16,47
CV_E	3,22	17,03
CV_G/ CV_E	1,33	0,97

Média	19,05	2333,06
-------	-------	---------

**Significativo pelo teste de Qui-quadrado a ($p < 0,01$) e ($p < 0,05$) pelo teste de Qui-quadrado, respectivamente; V_G : variância genotípica; V_{GA} : variância da interação genótipos por ambientes (GA); V_E : variância residual; V_F : variância fenotípica; h^2_{mg} : herdabilidade da média genotípica, A_s : acurácia seletiva; R^2_{GA} : coeficiente de determinação da interação da interação genótipos por ambientes; r_G : correlação genética entre todos os ambientes; CV_G : coeficiente de variação genotípica; CV_E : coeficiente de variação residual. Valores entre parênteses é a porcentagem da variação fenotípica observada (V_F).

Ensaio multiambientes são realizados com o intuito de recomendar os cultivares mais promissores para uma determinada região de cultivo. Geralmente nesses tipos de ensaios estão envolvidos genótipos com alta performance de produção cuidadosamente selecionados pelos pesquisadores. Em razão disso, é de se esperar pequenas diferenças que precisam ser detectadas. Assim sendo, o desafio é conduzir os ensaios com alta precisão experimental. A precisão experimental é tradicionalmente mensurada pelo coeficiente de variação residual (CV_E). No presente estudo, as estimativas obtidas estão dentro da faixa observada em ensaios para a produtividade (LEMOS et al., 2011; BULEGON et al., 2016; PEREIRA et al., 2018,) e teor de óleo (SILVA et al., 2016; CARNEIRO et al., 2019).

Além disso, a acurácia seletiva (A_s) tem sido empregada para avaliar a qualidade de experimentos de avaliação de genótipos. A acurácia mede a correlação entre o valor genotípico predito e o valor observado (RESENDE, 2007). As acurácias deste estudo estão dentro do intervalo (0,70 a 0,89) e podem ser consideradas altas (RESENDE; DUARTE, 2007). Com efeito, considerando as duas medidas, CV_E e A_s , podem ser considerados de precisão elevada, sem prejuízo das inferências.

A variabilidade genotípica foi constatada para ambos os caracteres e reflete os diferentes backgrounds genéticos dos materiais avaliados. Na maior parte dos ensaios multiambientes são comuns os relatos evidenciando diferenças entre genótipos tanto para produtividade quanto para o teor de óleo (MARCHIORI et al., 2015; CAMARA et al., 2018; PEREIRA et al., 2018; SILVA et al., 2016; CARNEIRO et al., 2019). A variância genotípica explicou somente 20,53% da variância genética, indicando que a heterogeneidade genotípica, mesmo presente, não foi acentuada. Outros dois resultados que reforçam esse fato são as estimativas de herdabilidade medianas e baixa relação entre os coeficientes de variação genotípica (CV_G) e residual (CV_E) (Tabela 3). A herdabilidade no sentido amplo quantifica a fração da variância fenotípica devido a efeitos genéticos. Estimativas próximas da unidade indicam menor efeito ambiental sobre o caráter (BASTIAANSE et al., 2019). Com relação à razão (CV_G/CV_E), a condição ideal é que esse valor seja o maior possível, pois indica maior efeito da variabilidade genética (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Todavia, nesse estudo, a

relação foi muito baixa evidenciando reduzida variabilidade genotípica, evidenciando a grande influência do ambiente na produtividade.

A presença da interação G x A indica resposta diferencial dos genótipos nas diversas condições ambientais. Esse fato é comum nas avaliações de genótipos em vários ambientes em soja para a produtividade (MATEI et al., 2017; TOLORUNSE et al., 2018; MILIOLI et al., 2018; CARNEIRO et al., 2019). Também tem sido observado para o teor de óleo (SILVA et al., 2016; CARNEIRO et al., 2019). A variância devida à interação G x A explicou mais de 60% da variância fenotípica e superou em mais de três vezes a variância genética nos dois caracteres (Tabela 3). Este resultado não é comum em ensaios multiambientais, na qual a expressão fenotípica costuma ser explicada principalmente pelas variâncias residual e genotípica (BORNHOFEN et al., 2017; MATEI et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; TOLORUNSE et al., 2018; CARNEIRO et al., 2019).

A interação G x A presente neste estudo é devida principalmente à parte complexa ou cruzada. A predominância da interação cruzada ocorre devido a reduzida correlação genotípica (r_G) entre todos os ambientes de avaliação como foi constatado (Tabela 3). A consequência é a alternância dos ordenamentos dos genótipos nos quatro ensaios, dificultando o processo de recomendação de cultivares (CRUZ; CASTOLDI, 1991; OLIVOTO et al., 2019). Muitos autores avaliando genótipos de soja para produção de grãos e teor de óleo também constaram a preeminência da parte qualitativa ou cruzada da interação G x A em relação à parte simples (SILVA et al., 2016; CAMARA et al., 2018; PEREIRA et al., 2018; SILVEIRA et al., 2018; CARNEIRO et al., 2019.; ODA et al., 2019).

Como os experimentos foram realizados no mesmo local, a variação ocorreu especialmente pelo clima. Isso indica a importância de fazer experimentos ao longo dos anos. Muitas vezes, o genótipo mais produtivo da última safra, pode não ser o melhor nas seguintes, mesmo considerando que o plantio será no mesmo local. Portanto a indicação das melhores cultivares deve levar em consideração outros anos agrícolas, sempre que possível.

3.1 Estudo de covariáveis e ecovalências

O ambiente a.17b foi aquele que mais contribuiu para a interação G x A para os dois caracteres estudados, uma vez que tem as maiores ecovalências. Esse ano também apresenta a maior média para os dois caracteres (produtividade de grãos e teor de óleo), sendo, portanto, um ambiente favorável à avaliação mesmo com a maior temperatura máxima (TMAX) e a segunda menor precipitação pluviométrica (PP) (Tabela 4).

Tabela 4 - Médias de cinco covariáveis ambientais e ecovalência de quatro ambientes de avaliação de genótipos de soja sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

	Ambiente (Média)			
	a.16	a.17 ^a	a.17b	a.18
Covariável				
Temperatura máxima (°C)	34,10	32,80	37,63	35,80
Temperatura mínima (°C)	24,00	23,00	21,02	19,70
Precipitação pluviométrica (mm)	70,00	183,00	85,00	210,00
Umidade relativa (%)	63,40	70,90	68,19	80,05
Radiação solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	29,40	23,80	28,50	24,20
Caráter				
Teor de óleo (%)	17,14d	18,74c	20,60a	19,74b
Produtividade (kg ha ⁻¹)	1418,317d	2320,856c	2963,709a	2629,34b
Ecovalência				
Teor de óleo (%)	17,05	10,76	64,34	7,85
Produtividade (kg ha ⁻¹)	13,46	23,13	44,42	19,00

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

3.2 Agrupamento dos ambientes

Verificou-se que os ambientes foram agrupados em dois grupos conforme a análise de componentes principais (Figura 2). Um grupo composto pelos ambientes a.16, a.17a e a.18 (Figura 2), relacionados principalmente à temperatura mínima (TMIN) e à PP, enquanto o segundo grupo foi composto apenas do ano a.17b com negativamente associado à TMIN e relacionado de forma positiva à TMAX e às ecovalências do teor de óleo e produtividade. Os ambientes com maior amplitude de temperaturas máxima e mínima foram os mais produtivos. De um modo geral, a temperatura máxima e, em menor escala, a umidade relativa (UR), contribuíram para aumentar a produtividade de grãos e óleo enquanto a temperatura mínima para redução de ambos os caracteres avaliados.

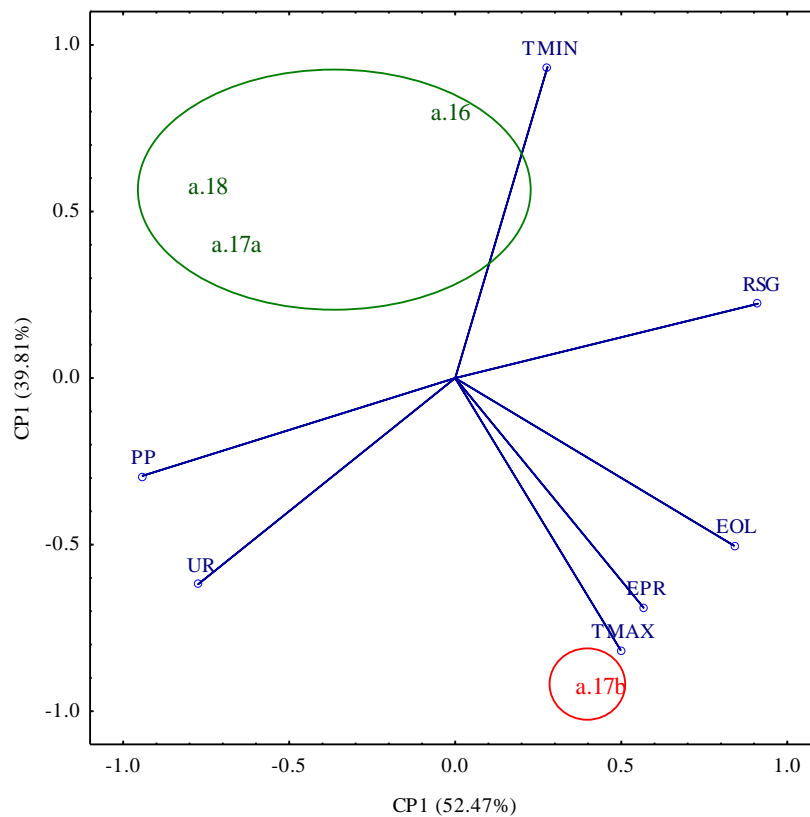


Figura 2 - Distribuição dos anos de avaliação e covariáveis em função dos dois primeiros componentes principais. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Por definição, o ambiente contempla todas as variáveis de origem não genética (SAEED; FRANCIS, 1984). Nesse sentido, o ambiente pode ser representado por covariáveis importantes como temperatura, precipitação pluviométrica entre outras. Neste trabalho, cinco covariáveis climáticas foram medidas nos quatro ambientes de avaliação. Na análise de agrupamento, verificou-se que o ambiente a.17b diferiu dos demais (Figura 2). O referido ambiente teve a maior temperatura máxima (37,63 °C). Em adição, neste ambiente foi observada maiores média da produção de grãos e teor de óleo. Esse foi o ambiente que mais contribuiu para a interação genótipos por ambientes. Não obstante os ambientes a.16, a.17a e a.18 estarem em um mesmo grupo, também diferem especialmente quanto à precipitação pluviométrica e umidade relativa (Tabela 4), evidenciando variação ambiental. A magnitude das diferenças entre ambientes influencia o efeito da interação genótipos por ambientes. Quanto maior a amplitude de condições edafoclimáticas ou mesmo de manejo de cultura mais complexa é a resposta genotípica.

3.3 Contribuição de covariáveis ambientais para a interação G x A

As covariáveis temperatura mínima e umidade relativa para o teor de óleo e a temperatura máxima para a produtividade foram as covariáveis que mais contribuíram para a interação G x A conforme a análise de regressão fatorial (Tabela 5).

Tabela 5 - Contribuição de covariáveis para a interação genótipos por ambiente em teor de óleo e produtividade avaliadas em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Covariável	Contribuição (%)	
	Teor de óleo (%)	Produtividade
Temperatura máxima (°C)	13,21	50,10
Temperatura mínima (°C)	50,44	25,57
Precipitação pluviométrica (mm)	39,90	20,94
Umidade relativa (%)	48,29	23,11
Radiação solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	42,25	21,45

O conhecimento das causas e natureza da interação G x A tem sido uma preocupação por parte dos pesquisadores. Van Eeuwijk et al. (1996) sugeriu o uso de covariáveis ambientais em regressão fatorial para explicar a interação genótipos por ambientes. Observou-se que as covariáveis temperatura mínima e umidade relativa para o teor de óleo e a temperatura máxima para a produtividade foram as covariáveis que mais contribuíram para a interação foram interação G x A conforme a análise de regressão fatorial (Tabela 5). Em soja, Oliveira et al. (2006) constaram que a altitude (57,21%), temperatura máxima (36,25%), fertilidade do solo (29,85%) e precipitação pluviométrica (28,20%) foram as covariáveis ambientais que mais explicaram a interação G x A em genótipos de soja avaliados no Estado de Goiás.

Nunes et al. (2011) avaliando híbridos de melão em condições de semiárido potiguar, verificaram que as temperaturas mínima, média e máxima explicaram 39,35 e 33% da interação G x A. Em trabalho realizado com o milho, Liu et al.(2013) observou efeito da temperatura, pluviosidade e radiação solar. Em cana de açúcar, foi verificado que as covariáveis sazonais temperatura e estresse hídrico foram as mais importantes para o rendimento de colmos (RABURAM et al., 2013). Cada espécie tem uma determinada resposta frente ao ambiente no qual está inserida. Em adição, mesmo dentro da espécie, há distinção entre cultivares que respondem de forma distinta aos estímulos causados por diferentes covariáveis ambientais. Em razão disso, e da própria variação ambiental, são esperados resultados diferentes entre manuscritos publicados na literatura.

Neste trabalho, todas as variáveis estudadas contribuíram em diferentes intensidades para a interação G x A. Relativo ao teor de óleo, a precipitação pluviométrica e a umidade relativa contribuíram positivamente para aumentar a interação. A temperatura máxima (32,80 a 37,63°C) também contribuiu de forma positiva, mesmo em menor grau para a interação. Comportamento oposto se verificou para a temperatura mínima (19,70 a 24,00°C) e, parcialmente, para radiação solar (Figura 4). Esses resultados concordam com as estimativas de correlação (não apresentadas) entre as covariáveis e média geral do teor de óleo, positivas para as três primeiras covariáveis citadas e negativas para as duas últimas. As temperaturas máximas foram altas, mas a soja suporta esse clima, desde que tenham outros fatores para compensar. Porém as mínimas também foram mais altas do que na região do cerrado, em que as temperaturas podem atingir 10 a 15°C. A amplitude térmica é importante para o desenvolvimento fisiológico da soja, sendo ideal, sol pleno diurno combinado com temperaturas noturnas amenas, em torno de 15°C para a maioria das cultivares do Cerrado.

3.4 Decomposição por valores singulares (DVS)

Após a decomposição por valores singulares da matriz das correlações entre os BLUPS das interações e dos valores das covariáveis em cada um dos ambientes, verificou-se para o teor de óleo que os dois primeiros componentes principais praticamente explicaram toda a variação (99,36%), sendo, portanto necessário um gráfico bidimensional para explicitar a interação G x A. O primeiro componente principal pode ser explicado como um contraste entre os efeitos positivos da PP e UR e os efeitos negativos das covariáveis temperatura mínima e radiação solar global (RSG). O segundo componente principal pode ser entendido como um contraste entre os efeitos positivos da TMAX e RSG e negativos da TMIN (Figura 3A).

Para a produtividade de grãos, os dois primeiros componentes principais explicaram 99,31% de toda a interação G x A. No primeiro componente principal, constatou-se que a RSG e, em menor grau, a TMAX, tiveram efeito positivo sobre a interação G x A enquanto a PP e UR. No segundo componente principal, a TMAX e UR contribuíram positivamente para a interação G x A enquanto a contribuição da TMIN foi negativa (Figura 3B).

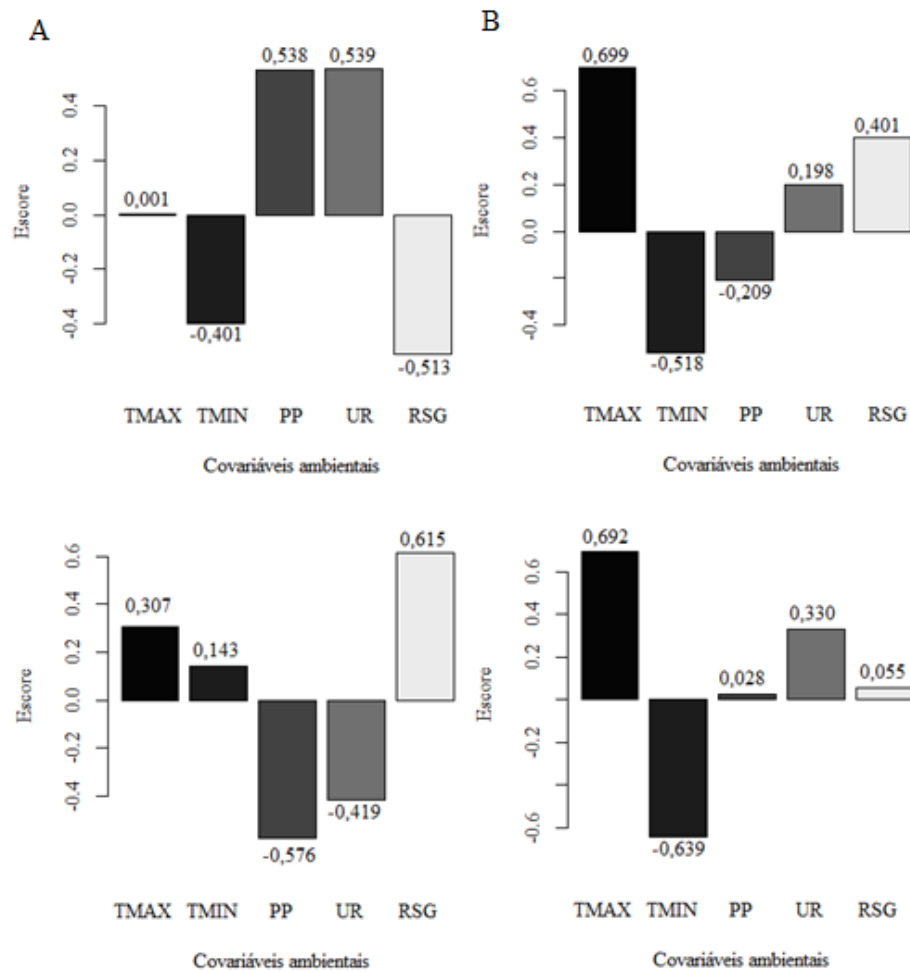


Figura 3 - Contribuição de cinco covariáveis ambientais nos dois primeiros componentes principais para interação G x A no teor de óleo (A) e produtividade de grãos (B) em genótipos de soja avaliados sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Concernente à produtividade, o efeito das covariáveis variaram bastante nos dois primeiros componentes principais. Considerando os dois componentes principais, a temperatura máxima foi à única covariável que exerceu influência positiva sobre a interação G x A. As demais covariáveis alternaram entre influência positivas/negativas ou efeito pequeno. Quando se considera a correlação das covariáveis e média geral da produtividade de grãos, verificou-se que foi positiva para temperatura máxima e negativa para a temperatura mínima. Os resultados parcialmente coerentes nesse caso podem ser devido a outras covariáveis ambientais que interferem na média do caráter como tipo de solo, manejo entre outras.

Utilizando a mesma metodologia, Carvalho (2015) concluiu que as variáveis sazonais temperatura média, umidade relativa, insolação total, número de dias de precipitação e total de precipitação foram as que mais influenciaram o desempenho a produtividade de genótipos

de feijão caupi. Segundo o mesmo autor, a diferença de comportamento dos genótipos pode ser atribuída aos fatores geográficos como latitude e longitude. Ressalta-se que no referido estudo foram contemplados mais ambientes com maior variação edafoclimáticas e de localização geográfica.

3.5 Covariáveis-biplots gerados pela análise de componentes principais

Na Figura 4, o cosseno do ângulo entre os vetores de duas covariáveis ambientais quaisquer mede a associação entre elas em função do seu efeito sobre a interação G x A. Assim sendo, para ambos os caracteres, a TMAX com ângulos obtusos ($>90^\circ$) com TMIN e PP, possui correlação negativa em relação a estas covariáveis. Existe correlação positiva entre RSG e UR ($<90^\circ$). A TMIN correlacionou-se negativamente com todas as variáveis ambientais com exceção da RSG. A RSG correlacionou-se negativamente com PP e UR que, por sua vez, mostraram associação positiva entre si. Covariáveis negativamente correlacionadas possuem efeitos opostos sobre a interação G x A enquanto a correlação positiva indica efeito semelhante das variáveis.

Também é possível visualizar o padrão de agrupamentos dos genótipos em relação à distribuição e influências das covariáveis ambientais (Figura 4). Relativo ao teor de óleo observou-se a formação de quatro grupos. O primeiro grupo refere-se aos G02, G10, G08 e G21, relacionados positivamente com a PP e UR, mas negativamente com TMIN, RSG e TMAX (Figura 4A). No segundo grupo, os genótipos G07, G15, G14, G04 e G17 associados positivamente à UR e TMAX, mas negativamente à TMIN e RSG. Os genótipos G06 e G11 têm associação positiva com RSG, mas negativa com PP e UR. O último grupo que tem efeito positivo da TMIN e RSG e negativo da PP, UR e TMAX.

Com relação à produtividade de grãos, o primeiro grupo foi composto pelos genótipos G07, G16 e G14 que são afetados positivamente pela TMIN e RSG e negativo da PP e UR e negativamente por TMIN e RSG (Figura 4B). Os genótipos G09, G10, G20 e G12 estão associados positivamente com a PP, porém negativamente TMAX, RSG e UR. Os genótipos do quarto grupo (G15, G11, G08 e G21) estão associados ao efeito positivo da TMIN e aos efeitos negativos às demais características. Os genótipos G06, G13 e G17 estão associados à RSG, mas sofrem efeito negativo da PP e UR, principalmente. O maior grupo é constituído por genótipos (G01, G02, G03, G04, G05, G18 e G19) com menor efeito das covariáveis ambientais sobre a interação G x A.

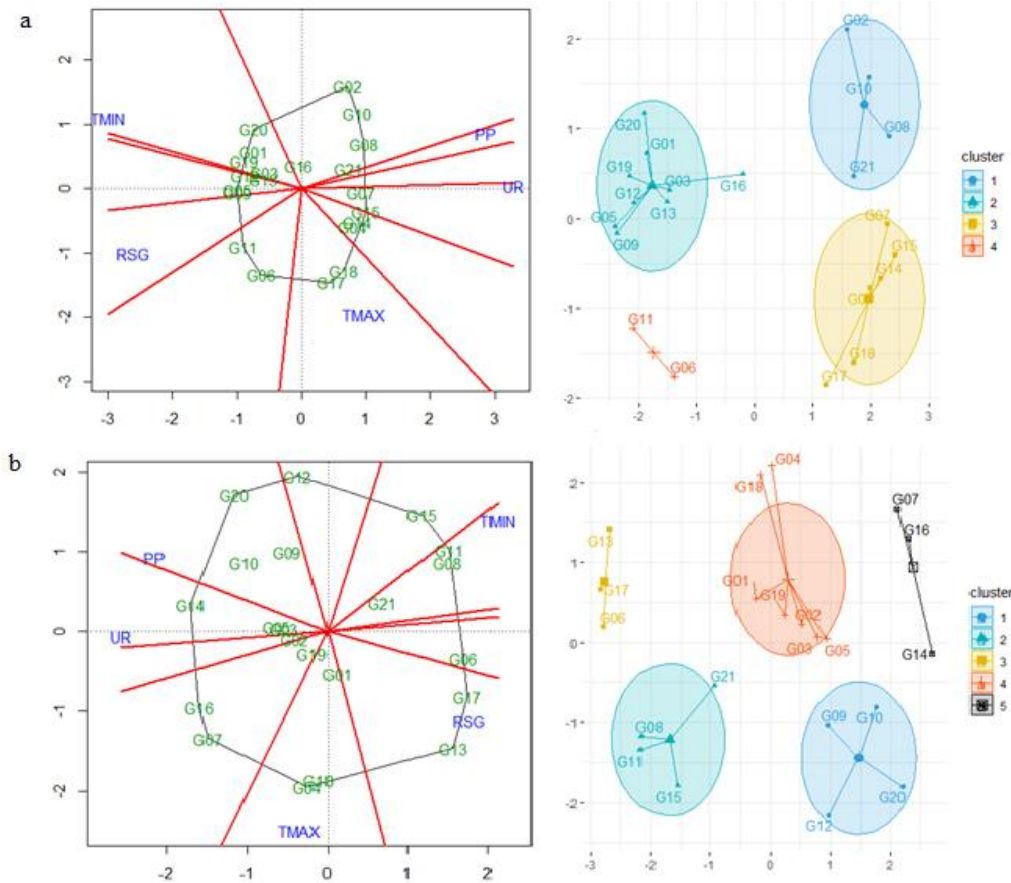


Figura 4 - Covariáveis-Biplots de acordo com os dois primeiros eixos gerados pela Análise de Componentes Principais entre cinco variáveis ambientais e os efeitos da interação GGE. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Com relação às respostas dos genótipos a cada uma das covariáveis ambientais, observou-se variabilidade com grupos de genótipos com sensibilidades diferentes (Figura 4). Pela variação de respostas dos cultivares frente as cinco covariáveis estudadas, percebe-se que as causas da interação $G \times A$ devem ser atribuídas a fatores fisiológicos e bioquímicos próprios de cada genótipo avaliado. Considerando que os genótipos se desenvolvem em sistemas dinâmicos, em que ocorrem constantes mudanças, desde a semeadura até a colheita, há geralmente um comportamento diferenciado destes em termos de respostas às variações ambientais. Esse fato foi verificado pelas diferentes sensibilidades dos genótipos em relação às covariáveis ambientais ao se utilizar as duas metodologias (Figura 4).

Ressalta-se que a resposta de cada genótipo associado com o efeito da interação $G \times A$, quando associados aos efeitos das covariáveis ambientais, permitiu a discriminação genotípica e auxiliou no entendimento parcial das causas do comportamento diferencial dos genótipos de soja avaliados nos quatro ambientes. Essa é a primeira vez que um estudo dessa natureza tem sido feita em soja sob condições do semiárido brasileiro. São necessários mais

estudos que englobem mais locais de avaliações para se estudar o efeito de variáveis espaciais sobre a interação G x A.

4. CONCLUSÕES

O modelo covariável-biplot é útil para relacionar fatores ambientais importantes e indicar a sua participação relativa na produtividade e teor de óleo.

A precipitação pluviométrica, a umidade relativa e a temperatura máxima contribuem positivamente para aumentar o teor de óleo enquanto a temperatura mínima e a radiação solar, para reduzir.

A temperatura máxima influencia positivamente a produção de grãos enquanto a mínima reduz.

Os genótipos mais estáveis e adaptados para a produtividade de grão e teor de óleo são BMX OPUS IPRO, P 98Y70 RR, BRS 333 RR, BRS 9280 RR, M 8644 IPRO, M 8372 IPRO e ST 920 RR.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of genotype-environment interactions in applied plant breeding. **Crop Science**, v. 4, n. 5, p. 503-508, 1964.
- BASTIAANSE, H. et al. A comprehensive genomic scan reveals gene dosage balance impacts on quantitative traits in *Populus* trees. **Proceedings of National Academy Science of United States America**, v. 16, n. 27, p. 13690-13699, 2019.
- BERNARDO, R. **Breeding for Quantitative Traits in Plants**. 2nd ed. Stemma Press, Woodbury, MN. ISBN 978-0-9720724-1-0, 2010.
- BORNHOFEN, E. et al. Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 1-10, 2017.
- BRANCOURT-HULMEL, M.; LECOMTE, C. Effect of environmental varieties of genotype x environment interaction of winter wheat: A comparison of biadditive factorial regression to AMMI. **Crop Science**, Madison, v. 43, n. 2, p. 608-617, 2003.
- BULEGON, L. G. et al. Componentes de produção e produtividade da cultura da soja submetida à inoculação de *bradyrhizobium* e *azospirillum*. **Terra latinoamericana**, v. 34, n. 2, p. 169-176, 2016.
- CÂMARA, A. R.; MORAES, R. N. O.; SIMON, G. A. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de soja nos estados de Goiás e Minas gerais. **Global Science Technology**, v. 11, n. 02, p. 23-36, 2018.
- CARMO FILHO, F. do; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino. Mossoró: ESAM, 1991, 121 p. (Coleção Mossoroense, 30).
- CARNEIRO, A. K. et al. Stability analysis of pure lines and a multiline of soybean in different locations. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 4, p. 395-401, 2019.
- CARVALHO, L. C. B. Interpretação da interação genótipos x ambientes em feijão-caupi usando modelos multivariados, mistos e covariáveis ambientais. **Tese - Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, 2015.
- CARVALHO, M. M. Influência de sistemas de semeadura na população de pragas e nas características morfofisiológicas em cultivares de soja. **Dissertação - Mestrado em Agronomia (Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade De Ciências Agrônômicas Campus De Botucatu, Botucatu, 2014.**
- CRUZ, C. D.; CASTOLDI, F. L. Decomposição da interação genótipos ambientes em partes simples e complexa. **Revista Ceres**, v. 38, n. 219, p. 422-430, 1991.
- DUGJE, I. Y. et al. Farmers' Guide to Soybean Production in Northern Nigeria. **International Institute of Tropical Agriculture**, 2009. 21 pp.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2006. 412 p.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia biosfera**, v. 7, n.12, p. 1-12, 2011.

GAUCH, H. G. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. **Crop Science**, Madison, v. 46, n. 03, p. 1488-1500, 2006.

GOMES, R. V.; COUTINHO, J. L. B. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: **2ª aproximação**. 3. ed. Revisada. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco-IPA, 2008. 212 p.

HEIL, C. Rapid, multi-component analysis of soybeans by FT-NIR Spectroscopy. Madison: Thermo Fisher Scientific, 2010. 3 p. Disponível: <<http://www.nicoletcz.cz/userfiles/file/vjegy/soybeans.pdf>> Acesso em: 28 dez. 2019.

LEMONS, L. B.; FARINELLI, R.; CAVARIANI, C.; ZAPPAROLI, R. L. Desempenho agrônomo e produtivo de cultivares de soja em diferentes safras. **Científica**, v. 39, n. 1/2, p. 44-51, 2011.

LIU, Y. et al. Spatial Adaptabilities of Spring Maize to Variation of Climatic Conditions. **Crop Science**, v. 53, n. 4, p. 1693-1703, 2013.

MACKAY, T. F. C. Q&A: Genetic analysis of quantitative traits. **Journal of Biology**, v. 8, n. 23, p. 1-5, 2010.

MALOSETTI, M.; BUSTOS-KORTS, D.; BOER, M. P.; VAN EEUWIJK, F. A. Predicting responses in multiple environments: Issues in relation to genotype · environment interactions. **Crop science**, v. 56, n. 5, p. 2210-2222, 2016.

MARCHIORI, R. et al. Adaptability and stability of transgenic soybean lines and cultivars in the Brazilian macroregion 3 assessed by using parametric and nonparametric methods. **African Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 49, p. 3248-3256, 2015.

MATEI, G. et al. Agronomic performance of modern soybean cultivars in multi-environment trials. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 52, n. 7, p. 500-511, 2017.

MILIOLI, A. S. et al. Yield stability and relationships among stability parameters in soybean genotypes across years. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 78, n. 2, p. 299-309, 2018.

MONTVERDE, E. et al. Integrating molecular markers and environmental covariates to interpret genotype by environment interaction in rice (*Oryza sativa* L.) grown in subtropical areas. **G3: Genes Genomes Genetics**, v. 9, n. 5, p. 1519-1531, 2019.

NUNES, G. H. N. et al. Influência de variáveis ambientais sobre a interação genótipos x ambientes em meloeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 4, p. 1194-1199, 2011.

ODA, M. C. et al. Estabilidade e adaptabilidade de produção de grãos de soja por meio de metodologias tradicionais e redes neurais artificiais. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 2, p. 117-124, 2019.

OLIVEIRA, A. B. et al. Environmental and genotypic factors associated with genotype by environment interactions in soybean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 6, n. 1, p.79-86, 2006.

OLIVEIRA, A. B.; DUARTE, J. B.; CHAVES, L. J.; COUTO, M. A. Environmental and genotypic factors associated with genotype by environment interactions in soybean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 79-86, 2006.

OLIVOTO, T. et al. Mean performance and stability in multi-environment trials II: selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2961-2969, 2019.

PEREIRA, W. A. et al. Performance of transgenic and conventional soybean plants subjected to bioassay for detection of glyphosate tolerant seeds. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 18, n. 1, p. 39-46, 2018.

R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

RAMASAMY, P. et al. Contribution of weather variables to G x E interaction in finger millet genotypes. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 37, n. 1, p. 79-81, 1996.

RAMBURAN, S. A.; ZHOU, M. A.; LABUSCHAGNE, M. Interpretation of genotype x environment interactions of sugarcane: Identifying significant environmental factors. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 392-399, 2011.

RESENDE, M. D. V. de. Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. Embrapa Florestas, Colombo. 2007. 435 p.

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

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

RODRIGUES, A. R.; ABREU, M. L.; OLIVEIRA, E. S. Cultivo da soja em sistemas de semeadura em linhas cruzadas e convencional. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 1, p. 17-23, 2017.

SAEED, M.; FRANCIS, C. A. Association of weather variables with genotype x environment interactions in grain sorghum. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 1, p. 13-16, 1984.

SILVA, K. B. et al. Adaptability and phenotypic stability of soybean cultivars for grain yield and oil content. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 2, p. 1-11, 2016.

SILVEIRA, D. A. et al. Adaptability and stability of grain yield in soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 05, p. 717-725, 2018.

TOLORUNSE, K. D.; GANA, A. S.; BALA, A.; SANGODELE, E. A. Yield stability studies of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) under rhizobia inoculation in the savanna region of Nigeria. **Plant Breeding**, v. 137, n. 3, p. 262-270, 2018.

VAN EEUWIJK, F. A.; DENIS, J. B.; KANG, M. S. Incorporating additional information on genotypes and environments in models for twoway genotype by environment tables. In **'Genotype-by-environment interaction'**. (Eds MS Kang, HG Gauch, I Goldringer) pp. 15–50. (CRC Press: Boca Raton, FL), 1996.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 486 p.

VOLTAS, J.; LÓPES-CÓRCOLES, H.; BORRÁS, G. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. **European Journal of Agronomy**, v. 22, n. 3, p. 309-324, 2005.

CAPÍTULO II

ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE GENÓTIPOS DE SOJA EM CONDIÇÕES DE SEMIÁRIDO

RESUMO

A produção de soja no Brasil concentra-se nas regiões centro e sul do país, mas há uma tendência de expansão da fronteira agrícola para o nordeste, onde predomina o clima semiárido. Existem poucas informações sobre o comportamento das cultivares de soja no semiárido. O objetivo deste trabalho foi analisar a interação genótipo por ambiente e identificar cultivares com adaptabilidade e estabilidade fenotípica. Foram avaliados 21 genótipos em blocos casualizados com quatro repetições nos anos de 2016, 2017 e 2018 em Mossoró-RN, para a produtividade e seus componentes (número de vagens por planta, número de grãos por vagens e peso de cem grãos). Foram utilizadas as metodologias GGE Biplot e da Média Harmônica da Performance Relativa dos valores Genotípicos para identificar genótipos adaptados e estáveis. A interação genótipos por safra em soja tem forte influência sobre o ambiente, é predominantemente quantitativa e dificulta a recomendação de genótipos no semiárido. As duas metodologias são apropriadas para estudar a interação G x A, com resultados complementares de acordo com a interpretação do melhorista. Os genótipos mais adaptados e estáveis para produtividade de grãos são BRS Pérola, BMX OPUS IPRO, Pampeana 007 RR, Pampeana 20 RR e BRS Sambaíba RR.

Palavras-chave: *Glycine max* L., interação genótipos por ambientes, modelos mistos, REML/BLUP, análise multivariada, produtividade.

ADAPTABILITY AND STABILITY OF SOYBEAN GENOTYPES IN SEMIARID CONDITIONS

ABSTRACT

Soybean production in Brazil is concentrated in the central and southern regions of the country, but there is a tendency to expand the agricultural frontier to the northeast where the semiarid climate predominates. There is little information on the behavior of soybean cultivars in the semiarid climate. The objective this work was to analyze the interaction of genotype and environment (G x E) and to identify adaptable and phenotypically stable cultivars. Twenty-one genotypes were evaluated in randomized blocks with four replications in the years 2016, 2017 and 2018 in Mossoró, Rio Grande do Norte, for their yield and its components (number of pods per plant, number of grains per pod, and weight of 100 grains). Two methodologies, GGE biplot and harmonic mean of the relative performance of genotypic values, were used to identify adapted and stable genotypes. The interaction genotype for years in soybean has a strong influence on the environment, it is predominantly quantitative and makes it difficult to recommend genotypes in the semiarid region. Both methodologies are appropriate for studying the G x E interaction, with complementary results according to the interpretation of the breeder. The most adapted and stable genotypes for grain yield are BRS Pérola, BMX OPUS IPRO, Pampeana 007 RR, Pampeana 20 RR and BRS Sambaíba RR.

Keywords: *Glycine max* L.; interaction of genotype and environment; mixed models; REML/BLUP; multivariate analysis; yield.

1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a leguminosa de maior importância econômica. O interesse mundial pelo cultivo desta leguminosa deve-se à excelente combinação apresentada em termos de produtividade e baixo custo de produção em função dos teores elevados de proteína (40%) e óleo (20%) das sementes, respectivamente (LOPES et al., 2016). O Brasil é o maior produtor e exportador mundial com aproximadamente 122,1 milhões de toneladas produzidas na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020). O agronegócio brasileiro tem sido impulsionado principalmente pelo “complexo soja”, destacando-se pela sua considerável participação nas exportações sob a forma de farelo, óleo e grãos, assim como o suprimento do mercado interno de óleos comestíveis e derivados proteicos.

Em razão disso, o avanço da área de cultivo de soja vem ocorrendo em todas as regiões do País. Nos últimos anos, têm se ampliado a fronteira agrícola da soja, especialmente no Nordeste (NE) (ALCANTARA NETO et al., 2011; ROCHA et al., 2012). A referida região apresenta grande demanda para compor a alimentação humana e animal, não necessitando da importação de estados do Centro-Sul. Além disso, a região é beneficiada pela posição estratégica do território, com proximidade de portos, resultando no menor custo de frete para escoamento da produção para exportação. A grande vantagem é a possibilidade de produção durante todo o ano, desde que haja irrigação. Como o NE é próximo ao Trópico do Equador, a variação climática é menor, especialmente quanto ao fotoperíodo.

Com o potencial de cultivo na região Nordeste também surge os novos desafios para a pesquisa torná-la uma região com elevada produção de grãos de soja. Um deles é a identificação de genótipos com elevada produtividade e estabilidade de grãos nas condições de cultivo do semiárido brasileiro caracterizadas por temperaturas elevadas e precipitação concentrada em poucos meses do ano (EMBRAPA, 2019). As referidas condições climáticas fazem com que o ciclo de cultivo da soja produzida no semiárido seja inferior àquele das regiões Sul e Centro-oeste do país, a qual apresenta elevado potencial para produção de sementes de alta qualidade (EMBRAPA, 2019).

As informações para a recomendação de cultivares são advindas de experimentos realizados em diferentes ambientes, seja no tempo ou espaço, para representar às diferentes condições edafoclimáticas da região na qual se pretende estabelecer a cultura. Nesses ensaios multi-ambientes é comum à ocorrência da interação genótipos por ambientes (G x A) que tem, geralmente, importante papel na manifestação fenotípica (MATEI et al., 2017; VEENSTRA et al., 2019). Geralmente, a interação genótipos por ambientes, é um problema, pois reduz a

correlação genotípica e dificulta a seleção nos programas de melhoramento ou a recomendação de novas cultivares (MILIOLI et al., 2018). Uma vez presente, a interação G x A deve ser estudada em relação à sua magnitude sobre o fenótipo e, sobretudo, em termos de predomínio das suas partes simples ou complexa. Destas, a interação complexa ou qualitativa é a que realmente dificulta o trabalho do melhorista, pois o ordenamento dos materiais muda em função do ambiente de avaliação.

Uma das opções para atenuar o efeito da interação é utilizar genótipos com alta capacidade de produção e estabilidade fenotípica em diferentes ambientes (BORNHOFEN et al., 2017). Existem diversos métodos descritos para estudar a adaptabilidade e a estabilidade. Dentre os métodos, a análise gráfica GGE Biplot (YAN; KANG, 2003) tem sido utilizada desde o começo do século com sucesso para muitas culturas (YAN, 2011; PEIXOUTO et al., 2016). Mais recentemente, também tem ampliado os opções de análise que consideram o efeito de genótipos como aleatório, dentre eles o método da Média Harmônica da Performance Relativa dos valores Genotípicos (MHPRVG) (RESENDE, 2007), com aplicação em diferentes culturas (CARVALHO, 2015; MILIOLI et al., 2018, SANTOS et al., 2019)

Este trabalho teve como objetivo analisar a interação genótipo por ambiente e identificar cultivares com adaptabilidade e estabilidade fenotípica para o semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E METÓDOS

2.1 Ambientes

O estudo foi realizado em quatro safras, duas durante as estações secas de 2016-2017 e duas chuvosas em 2017 e outra em 2018. Todas na fazenda experimental Rafael Fernandes, localizada no distrito de Alagoinha, zona rural de Mossoró, Rio Grande do Norte, localizado geograficamente a 5° 03'37"S 37° 23'50"W Gr e 72 m de altitude, distando 20 km da cidade de Mossoró-RN. Segundo Thornthwaite, o clima local é DdAa', ou seja, semiárido (CARMO FILHO et al., 1991).

Os dados meteorológicos médios do período de realização dos experimentos foram obtidos a partir de estação meteorológica instalada a 1,80 km da área experimental (Figura 1). Os ensaios foram instalados nas seguintes datas de plantio, 25 de setembro de 2016, 29 de março de 2017, 30 de setembro de 2017 e 16 de março de 2018.

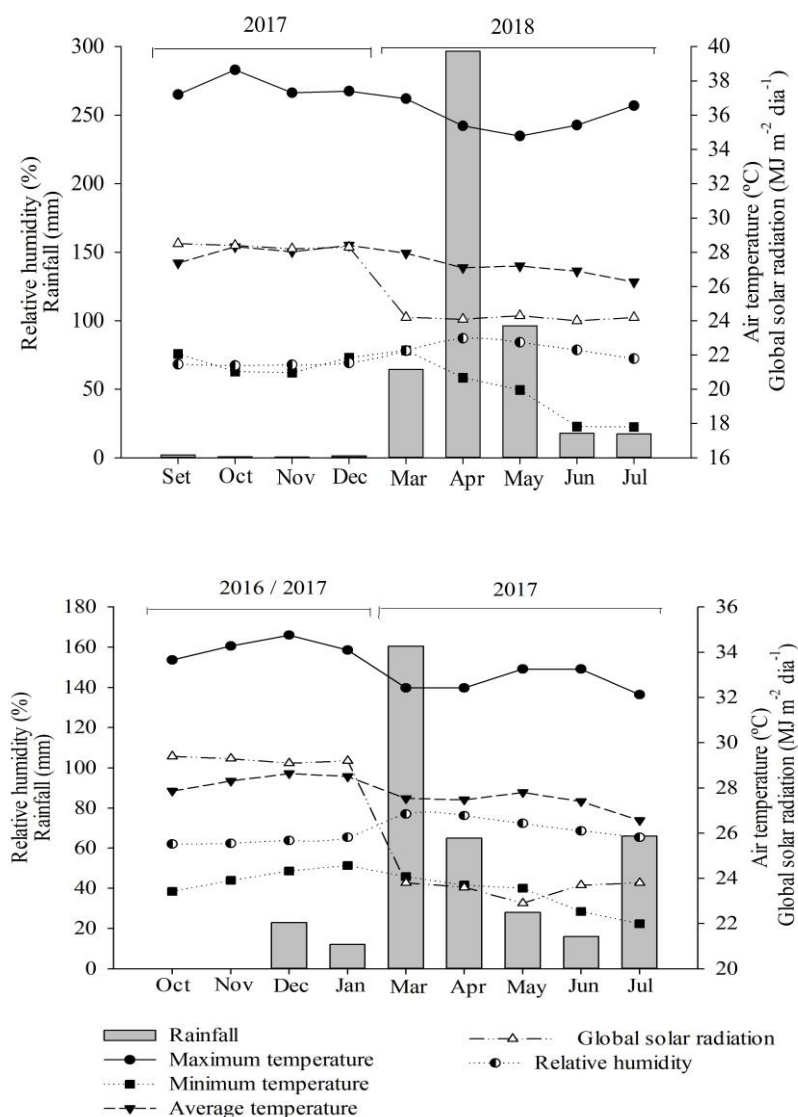


Figura 1 - Valores médios de temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm) para quatro safras de soja nos de 2016, 2017 e 2018. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Foram realizadas aração, gradagem, assim como a calagem do solo, quando necessário. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Argissólico franco arenoso (EMBRAPA, 2006), cujas análises químicas, na profundidade de 0,20 m, antes da instalação de cada experimento, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análises químicas do solo, em cada ano de cultivo, referente à profundidade de 0,20 m. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Safras	N (g kg ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	K -----mg/dm ³ -----	P	Na	Ca Mg cmol _c /dm ³	pH	CE dS m ⁻¹
2016/17	0,15	8,03	54,03	4,23	8,30	2,30 1,20	6,64	0,56
2017.1	0,42	12,95	41,71	2,17	8,61	1,05 0,93	6,32	0,67
2017.2	0,35	11,78	53,73	3,50	4,20	1,00 1,12	5,87	0,73
2018.1	0,41	10,53	27,12	2,34	8,54	1,56 1,24	6,2	0,47

*CE = condutividade elétrica; MO = matéria orgânica. P, K⁺ e Na⁺: Mehlich (HCl+H₂SO₄); Ca²⁺, Mg²⁺: KCl 1M.

2.2 Genótipos e delineamento experimental

Foram avaliados 21 genótipos de soja (Tabela 2) em blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas foram formadas por quatro fileiras de plantas com 5 m de comprimento, espaçamento de 0,50 m entre fileiras e 0,07 m entre plantas. A área útil da parcela continha 4 m², sendo colhidas às duas fileiras centrais, desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades. Os genótipos estudados foram obtidos com a Embrapa Meio-Norte.

Tabela 2 - Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Categoria	Identificação	Nome	Grupo (Maturação)	Ciclo (dias)
1	G02	‘BRS Carnaúba’	9.6	101
	G03	‘BRS Pérola’	8.8	103
	G04	‘BRS Tracajá’	9.2	101
	G05	‘BRS Sambaíba’	9.3	100
	G07	‘BRS 8590’	8.5	104
2	G01	‘BMX OPUS IPRO’	8.6	101
	G08	‘BRS 9383 IPRO’	9.3	103
	G09	‘BRS 9180 IPRO’	9.1	111
	G12	‘M 8644 IPRO’	8.6	102
	G13	‘M 8372 IPRO’	8.3	106
3	G06	‘BRS Sambaíba RR’	9.3	107
	G10	‘BRS 333 RR’	9.4	102
	G11	‘BRS 9280 RR’	9.2	105
	G14	‘P 98Y70 RR’	8.7	102
	G15	‘ST 920 RR’	9.2	106
	G16	‘Pampeana 10 RR’	9.8	111
	G17	‘Pampeana 20 RR’	10.0	118
	G18	‘Pampeana 40 RR’	9.5	111
	G19	‘Pampeana 50 RR’	9.6	111
	G20	‘PAS 13565-74 RR’	9.5	117
G21	‘Pampeana 007 RR’	9.7	111	

Categoria 1: genótipos de soja convencionais. Categoria 2: genótipos de soja de alto rendimento, resistentes ao glifosato e que apresentam proteção e supressão contra algumas pragas soja. Categoria 3: genótipos de soja resistentes ao glifosato.

2.3 Detalhes experimentais

As sementes foram inoculadas antes da semeadura com inoculante turfoso (TotalNitro Ultra) aplicado na dose de 4 g de inoculante/1 kg de sementes e líquido (TotalNitro Full) aplicado no sulco de plantio, sobre as sementes, na dose de 500 ml/ha, assegurando que as sementes foram completamente cobertas pelo inoculante. Os inoculantes foram obtidos junto à Total Biotecnologia, Curitiba, Paraná, Brasil. A semeadura foi realizada manualmente, com o auxílio de régua de madeira previamente perfuradas, de acordo com o espaçamento desejado.

O controle de plantas daninhas foi realizado manualmente com enxadas após a semeadura, conforme recomendado por Dugje et al. (2009). Devido à instabilidade pluviométrica no período de instalação dos experimentos, houve complementação hídrica quando necessário. As irrigações foram efetuadas por meio da aspersão, com turno de rega

diária parcelada em duas aplicações (manhã e tarde), conforme requerimento hídrico da cultura, com base na evapotranspiração de referência (ET_o).

A adubação foi realizada conforme recomendação para a cultura e com base na análise de solo, sendo aplicados, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, por ocasião do plantio, e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, em cobertura (GOMES; COUTINHO, 2008). As fontes de fósforo e potássio foram, super fosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

2.4 Caracteres avaliados

Os caracteres relacionados à produção de grãos foram avaliados: a) número de vagens por planta: obtido pela contagem do número de vagens por planta; b) número de grãos por vagens: obtido a partir da contagem do número de grãos das vagens dividido pelo número total de vagens; c) peso de cem grãos: determinado em função da massa e número total de sementes por unidade experimental; e d) produtividade: na maturidade fisiológica (95% das vagens maduras), as plantas de soja foram colhidas nas duas fileiras centrais de cada parcela, 4 m², desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades. Após a colheita, as plantas foram trilhadas e as sementes então pesadas, depois de secas (12% de umidade) e limpas, para a determinação do rendimento dos grãos. Para os caracteres número de vagens por planta e número de grãos por vagens foram utilizadas dez plantas amostradas ao acaso (CARVALHO, 2014).

2.5 Análise estatística

2.5.1 Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG)

Para a análise REML/BLUP foi utilizado o seguinte modelo misto: $y = Xb + Zg + Wc + e$, em que y , b , g , c , e correspondem, respectivamente, aos vetores de dados, de efeitos fixos (médias de blocos através dos ambientes), de efeitos dos genótipos (aleatórios), de efeitos da interação genótipo x ambiente (aleatórios) e de erros aleatórios. Enquanto X , Z e W são as matrizes de incidência para b , e , e c , respectivamente.

As distribuições e estruturas de médias (E) e variâncias (Var) assumidas foram as seguintes:

$$E \begin{bmatrix} y \\ g \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xb \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \text{Var} \begin{bmatrix} g \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I\sigma_g^2 & 0 & 0 \\ 0 & I\sigma_c^2 & 0 \\ 0 & 0 & I\sigma_e^2 \end{bmatrix}$$

O ajuste do modelo foi obtido a partir das equações de modelo misto:

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z & X'W \\ Z'X & Z'Z + I\lambda_1 & Z'W \\ W'X & W'Z & W'W + I\lambda_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{g} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \\ W'y \end{bmatrix}$$

Onde $\lambda_1 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2} = \frac{1 - h_g^2 - c^2}{h_g^2}$; em que: $h_g^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_c^2 + \sigma_e^2}$ corresponde à herdabilidade individual no sentido amplo no bloco; $c^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_g^2 + \sigma_c^2 + \sigma_e^2}$ corresponde ao coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipo x ambiente; σ_g^2 é a variância genotípica entre híbridos (genótipos) de soja; σ_c^2 é a variância da interação genótipo x ambiente; σ_e^2 é a variância residual entre parcelas; $r_{gloc} = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_g^2 + \sigma_c^2} = \frac{h_g^2}{h_g^2 + c^2}$ corresponde à correlação genotípica dos genótipos, através dos ambientes.

Os estimadores iterativos dos componentes de variância, por REML, via algoritmo EM, são: $\hat{\sigma}_e^2 = \frac{[y'y - \hat{b}'x'y - \hat{g}'z'y - \hat{c}'w'y]}{[N - r(x)]}$; $\hat{\sigma}_g^2 = \frac{[\hat{g}'g + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr} C^{22}]}{q}$; $\hat{\sigma}_c^2 = \frac{[\hat{c}'c + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr} C^{33}]}{s}$; em que C^{22} e

C^{33} advêm de $C^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} C^{11} & C^{12} & C^{13} \\ C^{21} & C^{22} & C^{23} \\ C^{31} & C^{32} & C^{33} \end{bmatrix}$, sendo C a matriz de

coeficientes das equações de modelo misto; tr o operador traço matricial; r(x) o posto da matriz X; N, q e s, número total de dados, número de genótipos e número de combinações genótipo x ambiente, respectivamente.

Por meio desse modelo foram obtidos os preditores BLUP empíricos dos valores genotípicos livres da interação, dados por $\hat{\mu} + \hat{g}_i$, em que $\hat{\mu}$ é a média de todos os ambientes e \hat{g}_i é o efeito genotípico livre da interação genótipo x ambiente. Para cada ambiente j, os valores genotípicos são preditos por $\hat{\mu} + \hat{g}_i + \hat{g}_{e_{ij}}$, em que $\hat{\mu}_j$ é a média do ambiente j, \hat{g}_i é o efeito genotípico e $\hat{g}_{e_{ij}}$ é o efeito da interação genótipo x ambiente concernente ao genótipo i.

A seleção conjunta, considerando-se simultaneamente o caráter em questão, a estabilidade e a adaptabilidade dos genótipos de soja (híbridos) é dada pela estatística média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos preditos $MHPRVG_i = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{Vg_{ij}}}$, em

que n é o número de locais onde se avaliou o genótipo i, Vg_{ij} é o valor genotípico do genótipo i no ambiente j, expresso como proporção da média desse ambiente. Todas as análises foram realizadas no pacote Metan (OLIVOTO; DAL'COL LÚCIO, 2020) do software R (R CORE TEAM, 2020).

2.5.2 Método GGE biplot

A análise GGE Biplot foi realizada a partir do seguinte modelo: $\hat{g}_i + \hat{g}\hat{e}_{ij} = \sum_{k=1}^p \lambda_k a_{ik} t_{jk} + \rho_{ij}$, em que: $(\hat{g}_i + \hat{g}\hat{e}_{ij})$ é a estimativa do valor genotípico i acrescentado com o efeito da interação do genótipo i no ambiente j obtida na análise na REML/BLUP; λ_k : efeito do valor singular (autovalor) do componente principal k ; a_{ik} : efeito do autovetor do genótipo i no eixo k ; t_{jk} : efeito do autovetor do ambiente j no eixo k ; ρ_{ij} : efeito residual remanescente quando não são utilizados todos os componentes principais p , isto é, $p = \min(g - 1; e - 1)$. Os escores dos genótipos e ambientes foram utilizados para obtenção de um gráfico Biplot para a interpretação da estrutura da interação genótipos por ambientes. Foi utilizado o pacote GGEbiplotGUI (BERNAL, 2016) do software R (R CORE TEAM, 2020). Apenas a produtividade foi analisada por essa metodologia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de deviance e componentes de variância

O teste da razão de verossimilhança (LTR) indicou efeitos significativos ($p < 0,05$) para os efeitos de genótipos (G) e da interação genótipos por ambientes (G x A) (Tabela 3).

A variância fenotípica (V_{FEN}) foi explicada principalmente pela interação G x A para os caracteres número de vagens por planta (NVP), peso de cem grãos (PCG) e produtividade de grãos (PRO). A exceção esteve para o número de grãos por vagens (NGV) cuja componente residual foi preponderante com mais de 70% (Tabela 3).

A acurácia seletiva de seleção que mede a correlação entre os valores genotípicos preditos e observados variou de 0,68 (NVP) a 0,80 (PCG). A razão entre os coeficientes de variação genotípica e residual foram inferiores à unidade para todos os caracteres.

A razão entre os componentes de variância V_{GA}/V_G foi sempre superior à unidade. As estimativas variaram de 1,29 (NGV) a 4,07 (NVP). Observou-se baixa correlação genotípica quando se considera todos os ambientes com valores inferiores a 0,44.

O coeficiente de variação (CV) é a medida mais clássica utilizada na comparação da precisão experimental. As estimativas do presente trabalho para os caracteres avaliados estão dentro da faixa de CV observada para ensaios com soja em diversas condições ambientais (BRAZ et al., 2010; CRUZ et al., 2010; LEMOS et al., 2011; BULEGON et al., 2015; PEREIRA et al., 2018, MEIER et al., 2019).

Outra medida de apurar a precisão experimental é a acurácia seletiva (A_S), parâmetro cada vez mais utilizado pelos melhoristas. A acurácia evidencia alta precisão das inferências das médias genotípicas, pois esta tem a propriedade de informar sobre o correto ordenamento das cultivares para fins de seleção (RESENDE, 2007). Segundo a classificação apresentada por Resende e Duarte (2007), as acurácias do presente trabalho são consideradas moderada para o número de vagens por plantas (0,50 a 0,69) e alta para os demais caracteres (0,70 a 0,89) (Tabela 3). Considerando as duas medidas, CV e A_S , podem ser considerados de precisão mediana, mas sem prejuízo das inferências.

Tabela 3 - Análise de deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para quatro caracteres em genótipos de soja avaliados em quatro ambientes em Mossoró-RN. Mossoró-RN, UFRS, 2020.

Efeito	LTR (Teste de Razão de Verossimilhança) – (χ^2)			
	NVP	NGV	PCG (g)	PRO (kg ha ⁻¹)
G	4,19*	6,68**	8,93**	3,99*
GA	159,68**	10,24**	294,67**	237,89**
REML	Estimativas (Componentes de variância e Parâmetros genéticos)			
V_G	22,594 (14,24)	0,024 (12,00)	2,087 (27,87)	147737,985 (17,23)
V_{GA}	91,846 (57,87)	0,142 (15,43)	4,488 (59,84)	551814,410 (64,36)
V_E	44,271 (27,89)	0,030 (72,58)	0,925 (12,33)	157793,675 (18,40)
V_{FEN}	158,711	0,196	7,500	857346,070
h^2_{mg}	0,47	0,59	0,64	0,50
A_S	0,68	0,77	0,80	0,71
r_G	0,20	0,44	0,32	0,21
V_{GA}/V_G	4,07	1,29	2,15	3,74
CV_G	9,17	7,90	10,37	16,47
CV_E	12,84	19,44	6,90	17,03
CV_G/ CV_E	0,71	0,41	1,50	0,97
Média	51,81	1,94	13,93	2333,06

**.* Significativo pelo teste de Qui-quadrado a ($p < 0,01$) e ($p < 0,05$) pelo teste de Qui-quadrado, respectivamente; V_G : variância genotípica; V_{GA} : variância da interação genótipos por ambientes (GA); V_E : variância residual; V_F : variância fenotípica; h^2_{mg} : herdabilidade da média genotípica, A_S : acurácia seletiva; r_G : correlação genética entre todos os ambientes; CV_G : coeficiente de variação genotípica; CV_E : coeficiente de variação residual. Valores entre parênteses é a porcentagem da variação fenotípica observada (V_F). NVP: número de vagens por planta; NGP: número de grãos por vagens; PCG: peso de cem grãos; PRO: produtividade de grãos.

3.2 Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG)

As estimativas dos parâmetros de adaptabilidade e estabilidade obtidos pelo método da Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG) estão na Tabela 4.

A MHVG (Média Harmônica dos Valores Genotípicos) permite a seleção com base na estabilidade e a produtividade. Segundo o referido critério, os genótipos de maior destaque para o PCG, as maiores estimativas foram observadas nos genótipos G06, G05, G03, G01 e G11. Para PRO, os genótipos de maior realce foram G21, G17, G19, G06, G01 e G03.

A performance relativa dos valores genotípicos (PRVG) capitaliza a capacidade de resposta de cada genótipo à melhoria do ambiente. Nesse critério, para NVP, sobressaíram-se os mesmos genótipos listados em MHVG porém em ordem crescente diferente (G16, G04, G02 e G19). Os genótipos que se destacaram para NGV foram G12, G10, G20, G16 e G15. Portanto, um grupo de genótipos distinto daquele citado para o critério MHVG, com exceção do genótipo G16, presente nos dois casos. Os genótipos de maior performance relativa para PCG foram os mesmos que se destacaram para o critério MHVG, mas em uma ordem crescente distinta, qual seja, G05, G03, G01, G06 e G11 (Tabela 4). Relativo à PRO, os genótipos de maiores valores foram G21, G17, G01, G03, G04 e G08.

A MHVG penaliza a instabilidade, quando genótipos são avaliados em diversos ambientes, resultando em nova média ajustada por essa penalização. Segundo o referido parâmetro, os resultados são muito semelhantes àqueles observados para PRVG. A única diferença está na ordem de classificação dos genótipos. Assim sendo, sobressaíram-se G04, G02, G19 e G16 (NVP); G16, G17, G21, G13 e G11 (NGV); G11, G01, G03, G05 e G06 (PCG); G03, G01, G06, G19, e G17 (PRO) (Tabela 4).

A heterogeneidade entre genótipos foi constatada para todos os caracteres, resultado comum na maioria das avaliações de cultivares de soja (MONTEIRO et al., 2015; MARCHIORI et al., 2015; CAMARA et al., 2018; PEREIRA et al., 2018). Entretanto, embora presente, a variabilidade genotípica não foi acentuada como pode ser comprovado pelas estimativas moderadas das herdabilidades médias no sentido amplo (Tabela 4). A herdabilidade no sentido amplo quantifica a fração da variância fenotípica devido às causas genéticas. Valores próximos da unidade indicam menor efeito ambiental sobre o caráter (BASTIAANSE et al., 2019). Outro fato que corrobora com a reduzida variabilidade entre os genótipos são as estimativas baixas da razão entre os coeficientes de variação genotípica e

residual. Quanto maior a referida razão maior a liberação de variabilidade genética (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992), fato não comprovado no presente trabalho.

Em ensaios multi-ambientes é comum a presença da interação em soja. A presença da interação $G \times A$ indica comportamento diferencial dos genótipos frente às mudanças ambientais. No presente estudo, verificou-se que a interação teve maior efeito sobre a manifestação fenotípica para as variáveis NVP, PCG e PRO como pode ser observado pela porcentagem da contribuição do componente de variância da interação $G \times A$ (VGA) e pela relação entre os componentes de variância da interação $G \times A$ e genotípica (VGA/VG) (Tabela 4). Esse resultado indica que mesmo na reduzida variabilidade genética, os genótipos responderam com maior intensidade e de maneira discrepantes às diferentes condições de cultivo. Esse fato não é comum nas avaliações de genótipos em vários ambientes em soja. Geralmente, em soja e maioria das culturas, o efeito de genótipos tem maior efeito sobre o fenótipo (MATEI et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; TOLORUNSE et al., 2018; MILIOLI et al., 2018; BORNHOFEN et al., 2017).

A interação $G \times A$ decorre de duas partes de diferentes natureza. A primeira, denominada de simples, quantitativa ou de escala, ocorre devido às magnitudes das diferenças de variabilidade entre os genótipos; e a segunda, denominada de complexa, qualitativa ou cruzada, depende da correlação genética dos genótipos nos ambientes (CRUZ; CASTOLDI, 1991). No presente trabalho verificou-se predominância da parte complexa da interação para todos os caracteres como pode ser verificado pelas reduzidas estimativas da correlação genotípica (r_G) ao longo dos ambientes (Tabela 4), fato comum em soja quando se avalia a produtividade (MARQUES et al., 2011; CAMARA et al., 2018; PEREIRA et al., 2018; SILVEIRA et al., 2018, ODA et al., 2019).

A quantificação das partes simples e complexa da interação $G \times A$ é importante para o melhorista. Quando a parte complexa predomina indica mudanças de ordenamento dos genótipos, isto é, genótipos que se comportam bem em um ambiente não repetem a performance em outros. Esse fato dificulta o processo de seleção em etapas iniciais do programa ou recomendação de cultivares nos ensaios de valor de cultivo e uso (VCU) (YAN et al., 2007; OLIVOTO et al., 2019). Uma das maneiras de atenuar a interação genótipos \times ambientes é identificar no grupo avaliado aqueles materiais produtivos com maior estabilidade e adaptabilidade.

Tabela 4 - Estimativa da média harmônica dos valores genotípicos (MHVG), performance relativa dos valores genotípicos (PRVG) e média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG) do número de vagens por planta, número de grãos por vagens, peso de cem grãos e produtividade em genótipos de soja avaliados em quatro ambientes em Mossoró. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Genótipo	Número de vagens por planta			Número de grãos por vagens			Peso de cem grãos (g)			Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	MHVG	PRVG	MHPRVG	MHVG	PRVG	MHPRVG	MHVG	PRVG	MHPRVG	MHVG	PRVG	MHPRVG
G01	49,20	54,03	52,81	1,91	1,92	1,92	15,69	15,99	15,95	2492,56	2733,95	2715,81
G02	59,31	63,79	62,95	1,79	1,79	1,79	14,52	14,67	14,66	1294,02	1483,07	1412,04
G03	46,70	50,55	49,78	1,88	1,89	1,89	15,53	15,88	15,67	2633,07	2813,51	2746,55
G04	59,57	62,37	61,03	1,89	1,90	1,90	14,13	14,35	14,23	2305,22	2919,11	2608,30
G05	41,15	45,09	42,71	1,94	1,95	1,95	15,32	15,53	15,48	1822,32	2032,88	1901,43
G07	50,66	55,54	54,19	1,95	1,96	1,96	11,61	12,17	11,71	2147,63	2317,60	2317,05
G08	33,45	44,14	39,04	1,68	1,82	1,70	12,55	13,37	12,75	1351,41	3031,77	1851,18
G09	45,52	50,86	47,90	1,77	1,78	1,82	11,25	11,65	11,52	1215,95	1370,26	1309,96
G12	41,41	45,71	43,09	1,77	2,02	1,78	12,88	13,26	13,14	966,33	1138,96	1091,11
G13	46,43	49,16	47,13	2,00	1,89	2,02	12,23	12,78	12,38	2211,57	2406,30	2305,89
G06	47,82	50,58	50,22	1,88	1,94	1,89	15,04	16,19	15,39	2454,61	2606,79	2545,13
G10	44,15	47,12	45,69	1,92	2,02	1,94	14,66	14,87	14,86	2208,15	2610,77	2347,15
G11	39,11	41,59	41,44	2,00	1,84	2,02	17,77	18,16	18,06	2301,15	2448,63	2422,52
G14	45,83	48,12	47,76	1,83	1,85	1,84	14,39	14,61	14,57	2160,57	2351,37	2339,45
G15	49,16	51,77	51,62	1,84	2,47	1,85	13,62	14,18	13,85	2022,88	2223,37	2054,44
G16	58,30	61,29	61,07	2,45	2,13	2,47	12,65	12,91	12,78	1940,23	2202,30	2148,68
G17	44,65	49,20	48,59	2,12	1,93	2,13	12,01	12,23	12,03	2449,80	2722,14	2507,88
G18	44,36	50,56	49,14	1,92	1,97	1,93	12,78	13,68	12,92	1651,48	2022,20	1900,25
G19	58,53	64,46	63,42	1,95	1,92	1,97	12,33	12,65	12,44	2453,89	2671,76	2506,05
G20	41,72	46,34	44,67	1,91	2,06	1,92	10,69	10,95	10,87	1779,44	2172,23	1990,41
G21	51,80	55,69	54,69	2,04	1,92	2,06	11,75	12,44	12,00	2449,35	2715,22	2609,16

O método da média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG), baseado em valores genotípicos preditos via modelos mistos, permite a seleção com base na estabilidade e a produtividade. Os valores da MHVG são os próprios valores da produtividade, penalizados pela instabilidade, o que certamente facilita a seleção dos genótipos mais produtivos e ao mesmo tempo mais estáveis (RESENDE, 2004; RESENDE, 2007). Nesse caso, destacaram-se, pela ordem, os genótipos G04 (BRS Tracajá), G01 (BMX OPUS IPRO), G21 (Pampeana 007 RR), G04 (BRS Tracajá), G06 (BRS Sambaíba RR), G17 (Pampeana 20 RR), G19 (Pampeana 50 RR) e G11 (BRS 9280 RR). Interessante que as cultivares convencionais, desenvolvidas a bastante tempo, tiveram um comportamento extremamente competitivo comparadas as transgênicas mais modernas. Essas cultivares fizeram parte do início do desenvolvimento da soja no Nordeste e são bem adaptadas a áreas rústicas. O trabalho indica que continuam sendo competitivas nessas condições.

Não obstante o método MHPRVG incorpora em uma única estatística a estabilidade, a adaptabilidade e a média do caráter de interesse (RESENDE, 2007), não permite a visualização do padrão da interação G x A.

Em soja, os produtores costumam apreciar o peso dos grãos como um indicativo da produtividade, porém em condições empíricas. Na prática, algumas cultivares modernas tem apresentado elevado PCS, para atender o desejo do mercado. Porém cientificamente carecemos de avaliar se essa característica se correlaciona com a produtividade. Em Mossoró, na média, os seguintes geótipos se destacaram: G11 (BRS 9280RR), G01 (BMX 8579 IPRO BONUS), G03 (BRS Pérola), G05 (BRS Sambaíba), G06 (BRS Sambaíba RR) e G10 (BRS 333 RR) para a característica (Tabela 4). A cultivar BMX 8579 IPRO BONUS nas áreas do MATOPIBA em talhões produtivos sem interferência de veranicos costuma ter PCS de mais de 20 g, assim como a M8644 IPRO. Nas condições do semiárido ficaram bem abaixo do potencial. Outras cultivares mantiveram sua média histórica, como a BRS Sambaíba, BRS Sambaíba RR, dentre outras.

Outras características empíricas debatidas nas fazendas são os números de grãos por vagem e grãos por planta. Comumente traz esperança de grandes rendimentos quando os produtores constatarem vagens com 4 grãos em algumas cultivares. No trabalho o número de grãos por vagem não se correlacionou com a produtividade, já que genótipos com mais grãos por vagem tiveram bom ou mau desempenho produtivo. No entanto, os genótipos que apresentaram mais grãos por plantas foram mais produtivos. Ou seja, é muito mais importante a quantidade de grãos final que a planta produz do que a quantidade produzida por vagem.

3.3 GGE biplot

Na metodologia GGE Biplot é importante que os dois primeiros componentes principais derivados da decomposição singular da soma dos efeitos G + GE capturem a maior parte da variação. O primeiro componente está associado à produtividade (adaptabilidade) enquanto o segundo componente à estabilidade do genótipo. Para todos os caracteres, o acúmulo da variação nos dois eixos foram superiores a 70%.

3.3.1 Produtividade de grãos

Para produtividade de grãos os genótipos geralmente foram estáveis, pois não diferiram tanto do eixo, sendo que alguns ficaram tão próximos que dificultam a visualização. Dos mais estáveis, apenas G01, G17, G03 e G21 (Figura 2a) estão acima da média geral de produtividade. No entanto, G07, G04, G12, G20 e G15 tiveram comportamento distinto e apresentaram baixa estabilidade. Se o melhorista faz a análise apenas baseado na média, G04 e G07 iriam se destacar. Sua baixa estabilidade indica que seu comportamento não foi previsível quando houve variação ambiental. De fato, o genótipo G04 sobressaiu-se nos ambientes a.17b e a.18 e caiu bastante o desempenho nos outros (Figura 2b). Já o genótipo G07 teve elevada produção em a.17b e a.18 e baixa em a.16 e a.17a (Figura 2c).

O polígono foi composto por cinco vértices (Figura 2b). No primeiro vértice está o G12 (sentido horário), vencedor nos ambientes a.16 e a.17a. No quinto vértice destacou-se G07 com maiores produtividades em a.17b e a.18. Os genótipos se distanciaram do genótipo ideal. Os mais próximos foram os genótipos G01, G07 e G21 (Figura 2c).

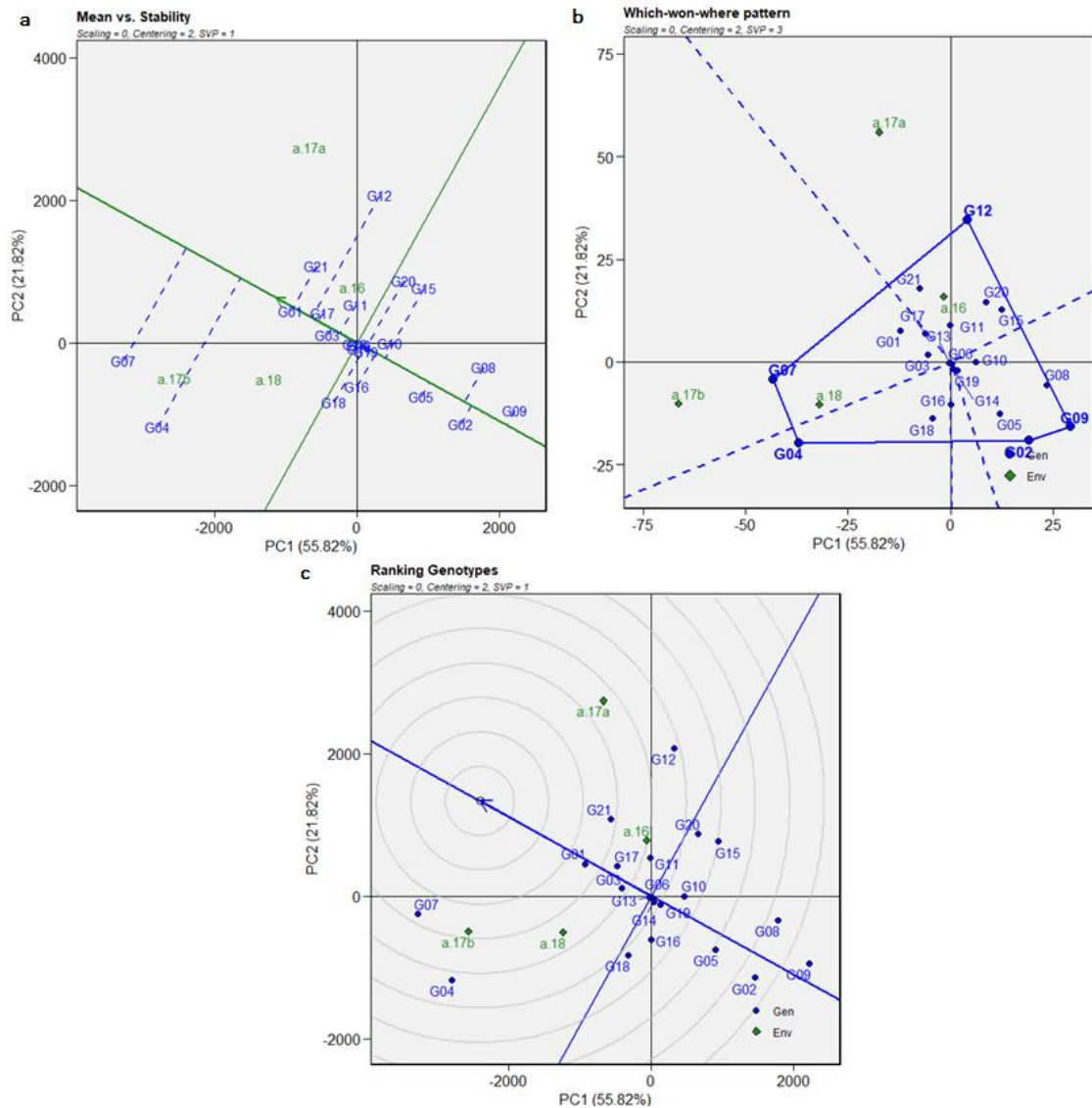


Figura 2 - Gráficos da Média vs estabilidade, “Quem vence onde” e do ordenamento de genótipos gerados pela metodologia GGE Biplot da produtividade de grãos em cultivares de soja avaliadas em quatro ambientes. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

A metodologia proposta por métodos multivariados, como a AMMI e GGE Biplot permitem a visualização da interação por um gráfico Biplot (YAN; KANG, 2003; GAUCH JUNIOR, 2013; VEENSTRA et al., 2019). No presente trabalho optou-se pela metodologia GGE Biplot, mas com uma adaptação, qual seja, os genótipos foram considerados de efeito aleatório e, por conseguinte, utilizou-se os valores predito para a decomposição dos valores singulares (DVS).

Conforme esse método, para produtividade os genótipos mais indicados seriam G01, G21, G17, G13, G03 e G11. Os genótipos G04 e G07 (Figura 2a) não foram estáveis em

razão da magnitude das suas projeções no eixo do primeiro componente principal. Então mesmo com médias altas, não seriam indicados pela sua baixa estabilidade.

Portanto uma média alta pode ser por causada de uma interação muito forte com um ambiente, nesse caso, uma condição específica. Já que o local era sempre o mesmo, a variação ocorreu por alguma condição ambiental decorrente provavelmente do clima. Em todo caso, em Mossoró, precisamos avaliar os genótipos ao longo dos anos para termos condições de indicar os melhores. Porque quando as condições se alteram a interação pode ser tão alta que o comportamento genotípico, pode não ser repetido em outros anos.

Comparando as duas metodologias, os genótipos estáveis indicados pelo GGE Biplot (G01, G21, G17, G11 e G03) se destacaram também no MHPRVG. Apenas esse segundo método indicaria mais alguns que não entraram no GGE Biplot. G13 poderia entrar pelo GGE Biplot e ficou intermediário no MHPRVG. Milioli et al. (2018), em soja; Santos et al. (2019), em feijão e Gonçalves et al. (2020) concluíram que os métodos MHPRVG e GGE Biplot apresentaram resultados concordantes na seleção de cultivares estáveis e produtivos.

Ao se trabalhar com metodologias diferentes é de se esperar complementação das informações, mas os resultados, muitas vezes, são discrepantes. O modelo GGE Biplot considera como fixos os efeitos tanto de genótipos como da interação $G \times A$. Decompõe a matriz dos efeitos da interação em uma análise de componentes principais. Por outro lado, o método MHPRVG aborda modelos mistos, estima componentes de variância por REML e prediz por BLUP os efeitos aleatórios dos genótipos e da interação dos efeitos genótipos e da interação $G \times A$ interações (considerados de natureza aleatória no presente estudo) com base na máxima verossimilhança residual (GAUCH, 1988; YAN et al., 2000; RESENDE, 2007). Os trabalhos que utilizaram e comparam às duas metodologias apontam a preferência pelo método MHPRVG por apresentar os resultados de forma simplificada e em função dos valores genotípicos (MILIOLI et al., 2018, SANTOS et al., 2019, SILVA et al. , 2011, CARVALHO, 2015). Em nosso trabalho evidenciamos que o método MHPRVG facilita a interpretação dos resultados, estando de acordo com os trabalhos acima citados, no entanto, vale salientar que as metodologias são completivas em função da análise dos resultados.

A metodologia GGE Biplot facilita a interpretação da relação entre genótipos e ambientes. Porém quando os dois primeiros componentes principais capturam pouca porcentagem da variação total apresenta baixa eficiência e tem resultados imprecisos. Nessa situação, há a necessidade de métodos mais precisos, como a metodologias que usam modelos mistos (PIEPHO et., 2008; YANG et al., 2009). No presente trabalho, os dois componentes explicaram no mínimo 72% da variação, sendo, portanto, razoável seu uso com os dados

disponíveis. No entanto, uma porcentagem da variação não foi explicada. Por outro lado, o método MHPRVG mesmo levando em consideração a estabilidade dos genótipos, prioriza a média do carácter, em detrimento dos mais estáveis e menos produtivos. Por essa razão, há uma associação positiva entre o ordenamento via MHPRVG e aquele obtido pela produtividade média dos genótipos apresentada. Fato também observado no presente trabalho. Com isso, trabalhar conjuntamente com as duas metodologias pode facilitar a segurança dos melhoristas no processo seletivo.

5. CONCLUSÕES

A interação genótipos por anos em soja tem forte influência sobre a manifestação fenotípica, é predominante qualitativa e dificulta a recomendação de genótipos no semiárido.

As duas metodologias são apropriadas para se estudar a interação $G \times A$, e com resultados complementares.

Os genótipos mais adaptados e estáveis para produtividade de grãos são BRS Pérola, BMX OPUS IPRO, Pampeana 007 RR, Pampeana 20 RR e BRS Sambaíba RR.

REFERÊNCIAS

- ALCANTARA NETO, F. et al. Análise de trilha do rendimento de grãos de soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Comunicata Scientiae**, v. 2, n. 2, p. 107-112, 2011.
- BASTIAANSE, H. et al. A comprehensive genomic scan reveals gene dosage balance impacts on quantitative traits in Populus trees. **Proceedings of National Academy Science of United States America**, v. 16, n. 27, p. 13690-13699, 2019.
- BERNAL, E. F. GGEBiplotGUI: Interactive GGE Biplots in R, 2016.
- BORNHOFEN, E. et al. Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 1-10, 2017.
- BRAZ, G. B. P. et al. Componentes de produção e rendimento de soja em função da época de dessecação e do manejo em pós-emergência. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 9, n. 2, p. 63-72, 2010.
- BULEGON, L. G. et al. Componentes de produção e produtividade da cultura da soja submetida à inoculação de *bradyrhizobium* e *azospirillum*. **Terra latino-americana**, v. 34, n. 2, p. 169-176, 2016.
- CÂMARA, A. R. et al. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de soja nos estados de Goiás e Minas gerais. **Global Science Technology**, v. 11, n. 02, p. 23-36, 2018.
- CARMO FILHO, F. do; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. **Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino**. Mossoró: ESAM, 1991, 121 p. (Coleção Mossoroense, 30).
- CARVALHO, L. C. B. Interpretação da interação genótipos x ambientes em feijão-caupi usando modelos multivariados, mistos e covariáveis ambientais. **Tese - Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, 2015.
- CARVALHO, M. M. Influência de sistemas de semeadura na população de pragas e nas características morfofisiológicas em cultivares de soja. **Dissertação - Mestrado em Agronomia (Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade De Ciências Agrônômicas Campus De Botucatu, Botucatu, 2014.**
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 7 - Safra 2019/20 - Sétimo levantamento, Brasília, p. 1-66, abril 2020. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos>. Acesso em: 20 de abril de 2020.
- CRUZ, C. D.; CASTOLDI, F. L. Decomposição da interação genótipos ambientes em partes simples e complexa. **Revista Ceres**, v. 38, n. 219, p. 422-430, 1991.
- CRUZ, T. V. et al. Componentes de produção de soja em diferentes épocas de semeadura, no oeste da Bahia. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 5, p. 709-716, 2010.

DUGJE, I. Y. et al. Farmers' Guide to Soybean Production in Northern Nigeria. **International Institute of Tropical Agriculture**, 2009. 21 pp.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 412 p.

EMBRAPA. Sealba: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro/ PROCÓPIO, S. O. et al. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 62 p.

GAUCH JUNIOR, H. G. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. **Crop Science**, v. 53, n. 5, p. 1860-1869, 2013.

GAUCH, H. G. Model selection and validation for yield trials with interaction. **Biometrics**, v. 44, n. 3, p. 705-715, 1988.

GOMES, R. V.; COUTINHO, J. L. B. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação. 3. ed. Revisada. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco-IPA, 2008. 212 p.

GONÇALVES, G. M. C. et al. Adaptability and yield stability of soybean genotypes by REML/BLUP and GGE Biplot. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 53, p. e282920217, 2020.

LEMOS, L. B. et al. Desempenho agrônomo e produtivo de cultivares de soja em diferentes safras. **Científica**, v. 39, n. 1/2, p. 44-51, 2011.

LOPES, J. A. M.; PELÚZIO, J. M.; MARTINS, G. S. Teor de proteína e óleo em grãos de soja, em diferentes épocas de plantio para fins industriais. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 10, n. 3, p. 49-53, 2016.

MARCHIORI, R. et al. Adaptability and stability of transgenic soybean lines and cultivars in the Brazilian macroregion 3 assessed by using parametric and nonparametric methods. **African Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 49, p. 3248-3256, 2015.

MARQUES, M. C. et al. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de soja em diferentes épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, p. 59-69, 2011.

MATEI, G. et al. Agronomic performance of modern soybean cultivars in multi-environment trials. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 52, n. 7, p. 500-511, 2017.

MEIER, C. et al. Performance agrônômica e correlação linear entre componentes de rendimento da soja em segunda safra. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.4, p. 933-941, 2019.

MILIOLI, A. S. et al. Yield stability and relationships among stability parameters in soybean genotypes across years. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 78, n. 2, p. 299-309, 2018.

MONTEIRO, F. et al. Correlação entre parâmetros de quatro metodologias de adaptabilidade e estabilidade em cultivares de soja em ambientes distintos. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 114, n. 2, p. 143-147, 2015.

ODA, M. C. et al. Estabilidade e adaptabilidade de produção de grãos de soja por meio de metodologias tradicionais e redes neurais artificiais. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 2, p. 117-124, 2019.

OLIVOTO, T. et al. Mean performance and stability in multi-environment trials II: selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2961-2969, 2019.

OLIVOTO, T.; DAL'COL LÚCIO, A. Metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 00, p. 1-7, 2020.

PEIXOUTO, L. S.; NUNES, J. A. R.; FURTADO, D. F. Factor analysis applied to the G+GE matrix via REML/BLUP for multi-environment data. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2016.

PEREIRA, W. A. et al. Performance of transgenic and conventional soybean plants subjected to bioassay for detection of glyphosate tolerant seeds. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 18, n. 1, p. 39-46, 2018.

PIEPHO, H. P.; MÖHRING, J.; MELCHINGER, A. E.; BÜCHSE, A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. **Euphytica**, v. 161, n. 1, p. 209-228, 2008.

R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

RESENDE, M. D. V. de. Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. Embrapa Florestas, Colombo. 435 p. 2007.

RESENDE, M. D. V. de. Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo. Embrapa Florestas, Colombo. 65 p. (Documentos 100). 2004.

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

ROCHA, R. S. et al. Desempenho agrônomo de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude em Teresina-PI. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 154-162, 2012.

SANTOS, P. R. et al. GGE Biplot and REML/BLUP based-analysis of yield stability and adaptability for common beans in multi-environment trials. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, p. 1-6, 2019.

SILVA, A. F. et al. Doses de inoculante e nitrogênio na semeadura da soja em área de primeiro cultivo. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 3, p. 404-412, 2011.

SILVEIRA, D. A. et al. Adaptability and stability of grain yield in soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 05, p. 717-725, 2018.

TOLORUNSE, K. D.; GANA, A. S.; BALA, A.; SANGODELE, E. A. Yield stability studies of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) under rhizobia inoculation in the savanna region of Nigeria. **Plant Breeding**, v. 137, n. 3, p. 262-270, 2018.

VEENSTRA, L. D. et al. Influence of genotype and environment on wheat grain fructan content. **Crop Science**, v. 59, n. 1, p. 190-198, 2019.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 486 p.

YAN, W. et al. GGEbiplots vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop Science**, v. 47, n. 2, p. 643-655, 2007.

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

YAN, W.; HUNT, L. A.; SHENG, Q.; SZLAVNICS, Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 596-605, 2000.

YAN, W.; KANG, M. S. GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL. Yates, F., and W.G. Cochran. 1938. The analysis of groups of experiments, 2003.

YANG, R. C.; CROSSA, J.; CORNELIUS, P. L.; BURGUEÑO, J. Biplot analysis of genotype x environment interaction: proceed with caution. **Crop Science**, v. 49, n. 5, p. 1564-1576, 2009.

CAPÍTULO III

INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO GENÓTIPOS POR AMBIENTES NA DIVERGÊNCIA GENÉTICA DE SOJA

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da interação genótipos por ambientes em estudos de divergência genética em soja. Foram conduzidos quatro experimentos em blocos casualizados com quatro repetições para avaliar 21 genótipos de soja. Foram utilizados os seguintes descritores para quantificar a divergência: altura da planta, matéria seca, teor de óleo, número de vagens por plantas, número de grãos por vagem, peso de cem grãos, produtividade, dias para o florescimento e dias para maturação. Utilizou-se o método hierárquico UPGMA para agrupar os genótipos a partir da matriz de distâncias de Mahalanobis estimadas utilizando as medias genotípicas estimadas pelo método REML/BLUP. O agrupamento dos genótipos são dependentes das condições de avaliação, principalmente devido aos efeitos da interação genótipos x anos. A análise conjunta, sem a presença do efeito da interação, permite a obtenção de dois grupos de genótipos. Os cruzamentos mais indicados envolvem os genótipos BRS Tracajá, BRS Pérola, BRS Carnaúba, M 8644 IPRO, BRS 8590 e BMX OPUS IPRO, e o genótipo BRS Sambaíba, especialmente aquele entre genótipo BMX OPUS IPRO e BRS Sambaíba, maior dissimilaridade.

Palavras-chave: *Glycine max* L., germoplasma, dissimilaridade, escolha de genitores.

INFLUENCE OF THE GENOTYPE INTERACTION BY ENVIRONMENTS ON THE GENETIC DIVERGENCE OF SOYBEAN

ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate the influence of genotype interaction by environments in studies of genetic divergence soybean. Four experiments were carried out in randomized blocks with four repetitions to evaluate twenty-one soybean genotypes. The following descriptors were used to quantify the divergence: plant height, dry matter, oil content, number of pods per plant, number of grains per pod, hundred grain weight, yield, days for flowering and days for maturation. The UPGMA hierarchical method was used to group the genotypes from the Mahalanobis distance matrix estimated using the genotypic means estimated by the REML/BLUP method. The grouping of genotypes depends mainly to the effects of the interaction between genotypes x years. The joint analysis, without the presence of the effect of the interaction, allows to obtain two groups of genotypes. The most recommended crosses involve the group of lines BRS Tracajá, BRS Pérola, BRS Carnaúba, M 8644 IPRO, BRS 8590 and BMX OPUS IPRO with the genotype BRS Sambaíba, especially the one between BMX OPUS IPRO and BRS Sambaíba, greater dissimilarity .

Key words: *Glycine max* L., germplasm, dissimilarity, choice of parents.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é a leguminosa com maior importância na economia mundial em razão do seu extensivo cultivo e comércio mundial. Possui uma utilização diversificada como matéria prima, rações para animais, indústria química, de alimentos, óleos vegetais e biocombustível. O Brasil é o maior exportador e o segundo maior produtor da oleaginosa. Na safra 2018/2019, o país teve uma produtividade média de 55,36 sacas por hectare resultado de uma produção de 118.800 mil toneladas do grão em 35.760,4 mil hectares. Houve incremento de 1,7% da área plantada em relação com a safra passada (CONAB, 2020), havendo a tendência de expansão da fronteira agrícola com a exploração da região semiárida brasileira. Todavia, ainda há poucas informações sobre a performance dos genótipos de soja nas condições edafoclimáticas características do semiárido, em especial as elevadas temperaturas.

Os experimentos de cultivares, às vezes denominado de ensaios de avaliação e cultivos (VCU), são geralmente realizadas em diferentes ambientes, sejam locais ou anos de cultivo, característicos da região de interesse. Quando são avaliados vários genótipos em mais de um ambiente é comum a presença do fenômeno da interação genótipos por ambientes (G x A). O referido fenômeno é definido como o comportamento diferencial dos genótipos ao longo dos ambientes e assume um papel importante na manifestação fenotípica. A interação G x A, quando predominantemente qualitativa ou cruzada, dificulta o processo seletivo ou de recomendação de cultivares, pois a ordem dos genótipos é alterada nos ambientes de avaliação.

As informações sobre o desempenho genotípico também podem ser relevantes para a escolha de genitores em programas de melhoramento genético. Nesse contexto, embora a produtividade seja o caráter de maior interesse, outros caracteres são relevantes para a soja, sendo, portanto, considerados na avaliação genotípica. Quando se tem informações de vários caracteres, seja natureza morfológica, agrônômica, bioquímica ou molecular, é possível realizar estudos de divergência genética. Todavia, mesmo sendo notória a presença da interação genótipos por ambientes em soja e outras culturas, existem poucas informações sobre a sua influência em estudos de divergência uma vez que os estudos de divergência genética são geralmente realizados em apenas um ambiente de avaliação.

A carência de informações requer um olhar mais atento por parte dos pesquisadores, sejam curadores de bancos de germoplasma ou melhoristas uma vez que estudos de divergência são importantes sob dois aspectos principais. Um primeiro aspecto está

relacionado às atividades intrínsecas realizadas em bancos de germoplasmas com o intuito de avaliar toda a estrutura de variação com o intuito de preservá-la e otimizar sua manutenção em coleções nucleares. Um segundo aspecto, não menos importante em relação ao primeiro, é que estudos de divergência genética são empregados para definir grupos com a intenção de direcionar cruzamentos que potencialmente possam gerar populações segregantes com maior variabilidade genética (TORRES et al., 2015). Com efeito, considerando que a interação genótipos por ambientes pode alterar a discriminação dos acessos em grupos em função das condições ambientais, a definição dos cruzamentos a serem executados pode ser dificultada.

As considerações supracitadas e a carência de estudos dessa natureza motivaram a realização do presente trabalho que se propõe a estudar o efeito da interação genótipos por ambientes sobre a divergência genética de soja avaliada sob condições de semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização ambiental

O estudo foi realizado durante as estações secas de 2016-2017 e chuvosas de 2017-2018 na fazenda experimental Rafael Fernandes, localizada no distrito de Alagoinha, zona rural de Mossoró, Rio Grande do Norte, localizado geograficamente a 5° 03'37"S 37° 23'50"W Gr e 72 m de altitude, distando 20 km da cidade de Mossoró-RN. Segundo Thornthwaite, o clima local é DdAa', ou seja, semiárido (CARMO FILHO et al., 1991). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Argissólico franco arenoso (EMBRAPA, 2006).

2.2 Germoplasma

A identificação e características dos genótipos de soja avaliados e pertencentes à Embrapa Meio-Norte estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Categoria, identificação, nome, grupo de maturação e ciclo de 21 genótipos de soja avaliados em quatro safras em condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Categoria	Identificação	Nome	Grupo (Maturação)	Ciclo (dias)
1	G02	‘BRS Carnaúba’	9.6	101
	G03	‘BRS Pérola’	8.8	103
	G04	‘BRS Tracajá’	9.2	101
	G05	‘BRS Sambaíba’	9.3	100
	G07	‘BRS 8590’	8.5	104
2	G01	‘BMX OPUS IPRO’	8.6	101
	G08	‘BRS 9383 IPRO’	9.3	103
	G09	‘BRS 9180 IPRO’	9.1	111
	G12	‘M 8644 IPRO’	8.6	102
	G13	‘M 8372 IPRO’	8.3	106
3	G06	‘BRS Sambaíba RR’	9.3	107
	G10	‘BRS 333 RR’	9.4	102
	G11	‘BRS 9280 RR’	9.2	105
	G14	‘P 98Y70 RR’	8.7	102
	G15	‘ST 920 RR’	9.2	106
	G16	‘Pampeana 10 RR’	9.8	111
	G17	‘Pampeana 20 RR’	10.0	118
	G18	‘Pampeana 40 RR’	9.5	111
	G19	‘Pampeana 50 RR’	9.6	111
	G20	‘PAS 13565-74 RR’	9.5	117
G21	‘Pampeana 007 RR’	9.7	111	

Categoria 1: genótipos de soja convencionais. Categoria 2: genótipos de soja de alto rendimento, resistentes ao glifosato e que apresentam proteção e supressão contra algumas pragas soja. Categoria 3: genótipos de soja resistentes ao glifosato.

2.3 Detalhes experimentais

As sementes foram inoculadas antes da semeadura com inoculante turfoso (TotalNitro Ultra) aplicado na dose de 4 g de inoculante/1 kg de sementes e líquido (TotalNitro Full) aplicado no sulco de plantio, sobre as sementes, na dose de 500 ml/ha, assegurando que as sementes foram completamente cobertas pelo inoculante. Os inoculantes foram obtidos junto à Total Biotecnologia, Curitiba, Paraná, Brasil. A semeadura foi realizada manualmente, com o auxílio de régua de madeira previamente perfuradas, de acordo com o espaçamento desejado.

O controle de plantas daninhas foi realizado manualmente com enxadas após a semeadura, conforme recomendado por Dugje et al. (2009). As irrigações foram efetuadas por meio da aspersão, com turno de rega diária parcelada em duas aplicações (manhã e tarde),

conforme requerimento hídrico da cultura, com base na evapotranspiração de referência (ET_o). Sendo que, no período chuvoso a irrigação foi realizada apenas quando necessário.

A adubação foi realizada conforme recomendação para a cultura e com base na análise de solo, sendo aplicados, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, por ocasião do plantio, e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, em cobertura (GOMES; COUTINHO, 2008). As fontes de fósforo e potássio foram, super fosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

Os experimentos foram conduzidos em blocos casualizados com quatro repetições. As unidades experimentais foram formadas por quatro fileiras de plantas com 5 m de comprimento, espaçamento de 0,50 m entre fileiras e 0,07 m entre plantas. A área útil da parcela continha 4 m², sendo colhidas às duas fileiras centrais, desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades.

2.4 Descritores avaliados

Os caracteres avaliados foram: a) altura da planta: avaliada por meio de uma régua, avaliando-se dez plantas aleatórias na parcela, na fase R5.3, conforme Zambiazzi;Carvalho (2014); b) matéria seca: obtida a partir da amostragem de dez plantas por parcela, ao final do ciclo, em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até atingirem peso constante, conforme Brandt (2006); c) teor de óleo: determinado a partir da seleção de 30 g (moídas) de sementes de cada parcela através da técnica da Refletância do Infravermelho Próximo (NIR) e expressos em porcentagem (%), segundo Heil (2010); d) número de vagens por plantas: obtido pela contagem do número de vagens por planta; e) número de grãos por vagens: obtido a partir da contagem do número de grãos das vagens dividido pelo número total de vagens; f) peso de cem sementes: determinado em função da massa e número total de sementes por unidade experimental; g) produtividade: na maturidade fisiológica (95% das vagens maduras), as plantas de soja foram colhidas nas duas fileiras centrais de cada parcela, 4 m², desprezando-se 0,5 m de bordadura nas extremidades. Após a colheita, as plantas foram trilhadas e as sementes então pesadas, depois de secas (12% de umidade) e limpas, para a determinação do rendimento dos grãos (CARVALHO, 2014); h) dias para o florescimento: foram contados os dias a partir da emergência, necessários para que se tenha uma flor aberta em 50% das plantas da parcela, a partir de dez plantas escolhidas aleatoriamente, conforme Carvalho (2014); e i) dias para maturação: determinado a partir da contagem dos dias a partir da emergência, necessários para que se tenha 95% de vagens maduras, avaliando-se dez plantas aleatórias na parcela, conforme Carvalho (2014).

2.5 Análise estatística

A análise REML/BLUP foi realizada a partir do modelo 54 do programa SELEGEN (RESENDE, 2016). Por meio desse modelo foram obtidos os preditores BLUP empíricos dos valores genotípicos livres da interação, dados por $\hat{\mu} + \hat{g}_i$, em que $\hat{\mu}$ é a média de todos os ambientes e \hat{g}_i é o efeito genotípico livre da interação genótipo x ambiente. Para cada ambiente j, os valores genotípicos são preditos por $\hat{\mu} + \hat{g}_i + \hat{g}e_{ij}$, em que $\hat{\mu}_j$ é a média do ambiente j, \hat{g}_i é o efeito genotípico e $\hat{g}e_{ij}$ é o efeito da interação genótipo x ambiente concernente ao genótipo i. A partir da matriz das médias genotípicas de cada caráter para cada genótipo e da matriz de variância-covariância residual, foram calculadas as distâncias generalizadas de Mahalanobis (MAHALANOBIS, 1936). A análise de agrupamento foi realizada com a matriz de distâncias de Mahalanobis entre genótipos, utilizando o método hierárquico UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean). A qualidade do ajustamento foi quantificada pelo coeficiente de correlação cofenética (SOKAL E ROHLF, 1962). As análises foram processadas no programa Genes (2016) e pelos pacotes *Pheatmap* (KOLDE, 2019) e *Biotoools* (SILVA, 2016) do Projeto R (R CORE TEAM, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação à qualidade experimental, os valores do coeficiente de variação estão dentro da faixa observada em soja, sendo o menor observado para o teor de óleo (4,28%) e o maior para a matéria seca (51,18%). Com exceção da matéria seca, as estimativas do presente trabalho para os caracteres avaliados estão dentro da faixa de CV observada para ensaios com soja (CRUZ et al., 2016; LEMOS et al., 2011; BULEGON et al., 2015; PEREIRA et al., 2018, MEIER et al., 2019). As maiores acurácias seletivas foram verificadas para o florescimento e para a maturação enquanto a menor para a matéria seca, conformando a menor precisão observada para este último caráter. As acurácias do presente trabalho são consideradas baixa para a matéria seca (<0,30), moderada para o número de vagens por plantas (0,50 a 0,69), muito alta para florescimento e maturação (>90) e alta para os demais caracteres (0,70 a 0,89), conforme Resende e Duarte (2007) (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise de Deviance, estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos e fenotípicos para nove caracteres medidos em genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFRSA, 2020.

Efeito	Caráter								
	AP	MS	TO	VP	GV	PC	PR	FL	MT
(Deviance) (Teste LRT – Qui-quadrado)									
G	4,82*	1,82 ^{ns}	4,82**	4,19*	6,68**	8,93**	3,99*	6,75**	8,12**
GA	3,91*	4,71*	373,71**	159,68**	10,24**	294,67**	237,89**	0,23 ^{ns}	0,03 ^{ns}
REML	Estimativas de Componentes de Variância e Parâmetros genéticos								
V _G	19,31	0,39	0,81	22,59	0,02	2,09	147,74	7,83	20,91
V _{GA}	10,91	9,13	2,76	91,85	0,14	4,49	551,81	0,11	0,23
V _E	60,47	285,41	0,38	44,27	0,03	0,93	157,79	26,01	54,38
h ² _{mg}	0,75	0,02	0,53	0,47	0,59	0,64	0,50	0,83	0,86
A _S	0,86	0,14	0,73	0,68	0,77	0,80	0,71	0,91	0,93
r _G	0,64	0,04	0,23	0,20	0,44	0,32	0,21	0,99	0,99
CV _E	18,93	51,18	4,28	9,17	7,90	10,37	16,47	14,45	7,41

AP: altura da planta, em cm; MS: matéria seca, em %, TO: teor de óleo, em %; VP: número de vagens por plantas; GV: número de grãos por vagem, PC: peso de cem grãos; PR: produtividade, em kg ha⁻¹; DF: número de dias para o florescimento; MT: número de dias para maturação.

Observou-se efeito significativo de genótipos para todos os caracteres avaliados com exceção a matéria seca, indicando heterogeneidade genética entre os genótipos, fato corroborado as estimativas das herdabilidade médias. Essa variabilidade, embora não muito elevada, pode ser corroborada pelas estimativas de herdabilidade, com exceção da matéria seca. A herdabilidade no sentido amplo quantifica a fração da variância fenotípica devido às causas genotípicas. A herdabilidade varia de 0 a 1,0, sendo que estimativas próximos da unidade indicam menor efeito ambiental sobre o caráter. Caracteres quantitativos sofrem maior efeito ambiental e tendem a ter menores valores de herdabilidade (BASTIAANSE et al., 2019). Esse fato ocorreu com a matéria seca, porém para a maioria dos caracteres, as herdabilidades podem ser consideradas intermediárias. Para a altura de planta, florescimento e maturação as herdabilidades foram elevadas, indicando menor efeito ambiental sobre esses caracteres.

A interação G x A foi significativa para todos os caracteres com exceção do número de dias para o florescimento e para a maturação (Tabela 2). A presença da interação G x A é um fenômeno comum em ensaios de avaliação de cultivares de soja e reflete o comportamento diferencial dos genótipos nos diferentes ambientes (RAMALHO et al., 2012). O componente de variância da interação G x A foi superior àquele da variância genotípica para os caracteres matéria seca, teor de óleo, número de vagens por plantas, número de grãos por vagem, peso de cem sementes e produtividade (Tabela 2), indicando maior influência da interação sobre a variação fenotípica. Esse fato não é comum nas avaliações de genótipos em vários ambientes em soja. Geralmente, em soja, o efeito de genótipos tem maior efeito sobre o fenótipo (PEREIRA et al., 2018; TOLORUNSE et al., 2018; MILIOLI et al., 2018; BORNHOFEN et al., 2017).

A interação pode ser quantitativa, devido à magnitude das diferenças entre os genótipos nos ambientes ou qualitativa, devido à falta de correlação genotípica nos ambientes (OLIVOTO et al., 2019). Neste trabalho, considerando as estimativas de correlação genotípica em todos os ambientes, variando de 0,02 (matéria seca) a 0,64 (altura de planta), a interação foi predominante qualitativa ou cruzada para todos os caracteres nos quais houve interação G x A (Tabela 2). A predominância da interação cruzada dificulta o trabalho dos melhoristas uma vez que os ordenamentos dos genótipos nos diferentes ambientes é alterado de forma sensível. Nesta situação, é difícil recomendar um genótipo para todos os ambientes, sendo, necessária, recomendações específicas. A presença da interação cruzada também foi mencionada por diversos autores ao avaliar cultivares de soja em diversas condições edafoclimáticas (CAMARA et al., 2018; PEREIRA et al., 2018; TOLORUNSE et al., 2018; MILIOLI et al., 2018; ODA et al., 2019).

A análise hierárquica de agrupamento conforme UPGMA apresentou resultados diferentes ao longo das avaliações, embora tenha havido pouca discriminação entre os genótipos (Figura 1). Ressalta-se que as estimativas de correlação cofenética foram superiores a 0,85 em todas as avaliações, indicando elevada qualidade de agrupamento, isto é, há muita semelhança entre as matrizes de dissimilaridade original e final (SOKAL; ROHLF, 1962).

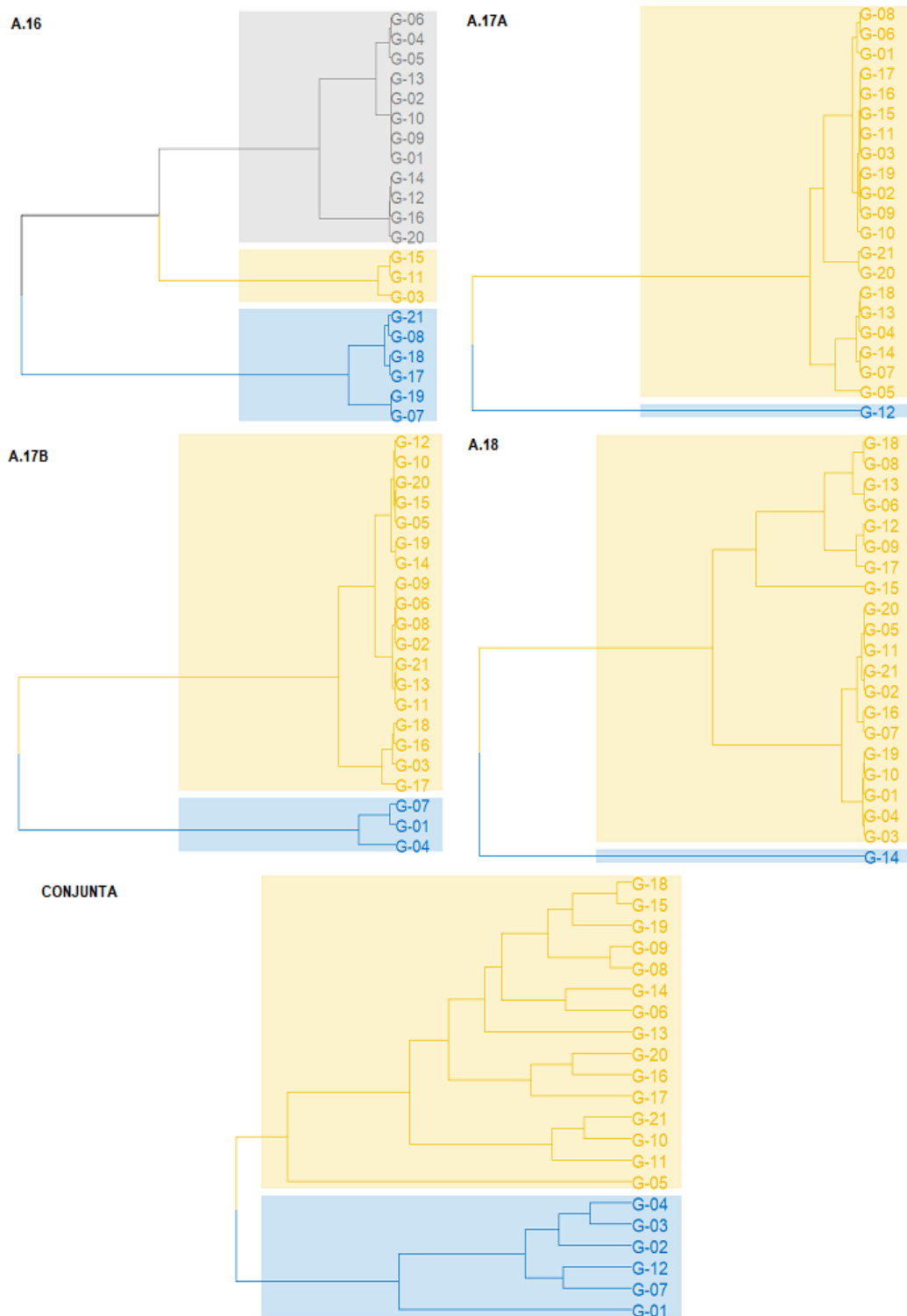


Figura 1 - Dendrogramas UPGMA obtidos a partir da matriz de distâncias de Mahalanobis entre genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Concernente ao agrupamento, no ano de 2016, houve a formação de três grupos de genótipos, sendo o primeiro composto por G-21, G-08, G-18, G-17, G-19 e G-07. O segundo grupo foi formado apenas pelos genótipos G-15, G-11 e G-03. O terceiro grupo foi

constituído dos demais genótipos. Na avaliação 2017A, os genótipos foram reunidos praticamente em um mesmo grupo, sendo o genótipo G-12 não agrupado (Figura 1). Na avaliação em 2018, o genótipo não agrupado aos demais foi G-14. Em 2017B, os genótipos G-07, G-01 e G-04 foram reunidos em grupo enquanto os demais genótipos formaram o segundo grupo. A análise conjunta subdividiu os genótipos em um grupo menor composto por G-04, G-03, G-02, G-12, G-07 e G-01. O segundo grupo contemplou os demais genótipos.

Visando avaliar a contribuição dos caracteres para a diversidade, utilizou-se a técnica de componentes principais. Em todas as avaliações, os quatro primeiros componentes principais explicaram mais de 70% da variação total observada, revelando a redução do espaço multidimensional de nove para apenas quatro componentes principais ortogonais (Tabela 3).

Tabela 3 - Contribuição do caráter para o autovalor λ_i na análise de componentes principais envolvendo genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Autovalor (λ_i)	Contribuição do caráter para o autovalor λ_i				
	A.16	A.17A	A.17B	A.18	Conjunta
1	PR (28,02)	VP (28,82)	MT (28,85)	FL (23,18)	AP (29,47)
2	MT (22,79)	MT (18,31)	VP (23,87)	PC (19,15)	PR (22,09)
3	VP (18,87)	PR (15,27)	PR (12,73)	PR (17,62)	PC (14,80)
4	TO (9,87)	AP (10,31)	GV (11,44)	GV (13,74)	GV (11,30)
Total	78,91	72,71	76,89	73,70	77,65

AP: altura da planta, em cm; MS: matéria seca, em %, TO: teor de óleo, em %; VP: número de vagens por plantas; GV: número de grãos por vagem, PC: peso de cem sementes; PR: produtividade, em kg ha⁻¹; DF: número de dias para o florescimento; MT: número de dias para maturação.

Utilizando os pesos nos quatro primeiros componentes, os caracteres com maiores participações na divergência considerando todas as quatro avaliações foram à produtividade, número de vagens por planta e o número de dias para maturação. Na análise conjunta os caracteres de maior destaque foram altura de planta e produtividade. Também merece destaque o número de grãos por vagem em duas avaliações e na análise conjunta. Considerando que nos caracteres supracitados verificou-se predominância da interação cruzada (Tabela 2), infere-se que a interação G x A possui peso relevante no ordenamento das distancias e por consequência, alteração nos grupos formados.

Outro resultado para reforçar o fato de que a ordem das distâncias foi alterada nas diversas avaliações são as estimativas das correlações entre as matrizes de dissimilaridade. As correlações foram praticamente todas não significativas com exceção da correlação entre a análise conjunta e avaliação 2017B (Figura 2).

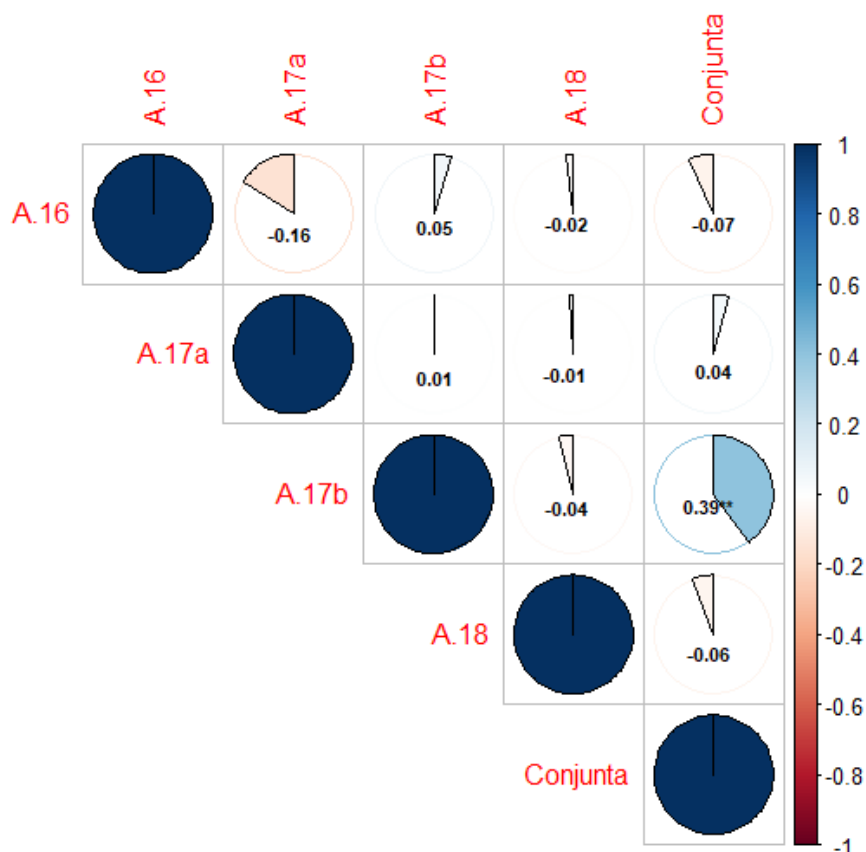


Figura 2 - Correlações entre matrizes de distâncias de Mahalanobis de genótipos de soja avaliados em quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

Embora exista uma vasta literatura que aborde os efeitos da interação G x A sobre a seleção e a identificação de cultivares, decorrentes do comportamento diferencial dos genótipos nos ambientes, pouca atenção foi dada ao efeito da interação nos estudos de diversidade. Considerando que estudos de divergência são utilizados para o direcionamento inicial de cruzamentos visando obter populações com grande variabilidade e elevada média para os caracteres de interesse, é relevante investigar o efeito da interação na formação de grupo heteróticos, como nas coleções nucleares. No presente trabalho, verificaram-se diferenças de agrupamento nas quatro avaliações.

A presença do efeito da interação confundido com o efeito genotípico em cada uma das quatro avaliações não só resultou em diferenças nos agrupamentos como também

dificultou a diferenciação dos genótipos avaliados. O uso das estimativas das médias genotípicas livres da interação obtidas na análise conjunta pode ser uma alternativa mais adequada para definir os grupos heteróticos e, por consequência, os cruzamentos a serem realizados. No presente trabalho, os cruzamentos devem ser feitos entre os genótipos do grupo composto por G-04, G-03, G-02, G-12, G-07 e G-01 e os genótipos do segundo grupo. Mais especificamente, o genótipo G-05. A maior dissimilaridade foi verificada entre os genótipos G-01 e G-05, em vermelho no mapa de calor (Figura 3). Cruzamentos podem ser feitos entre o genótipo G-01 e os genótipos G-13, G-15 e G-18.

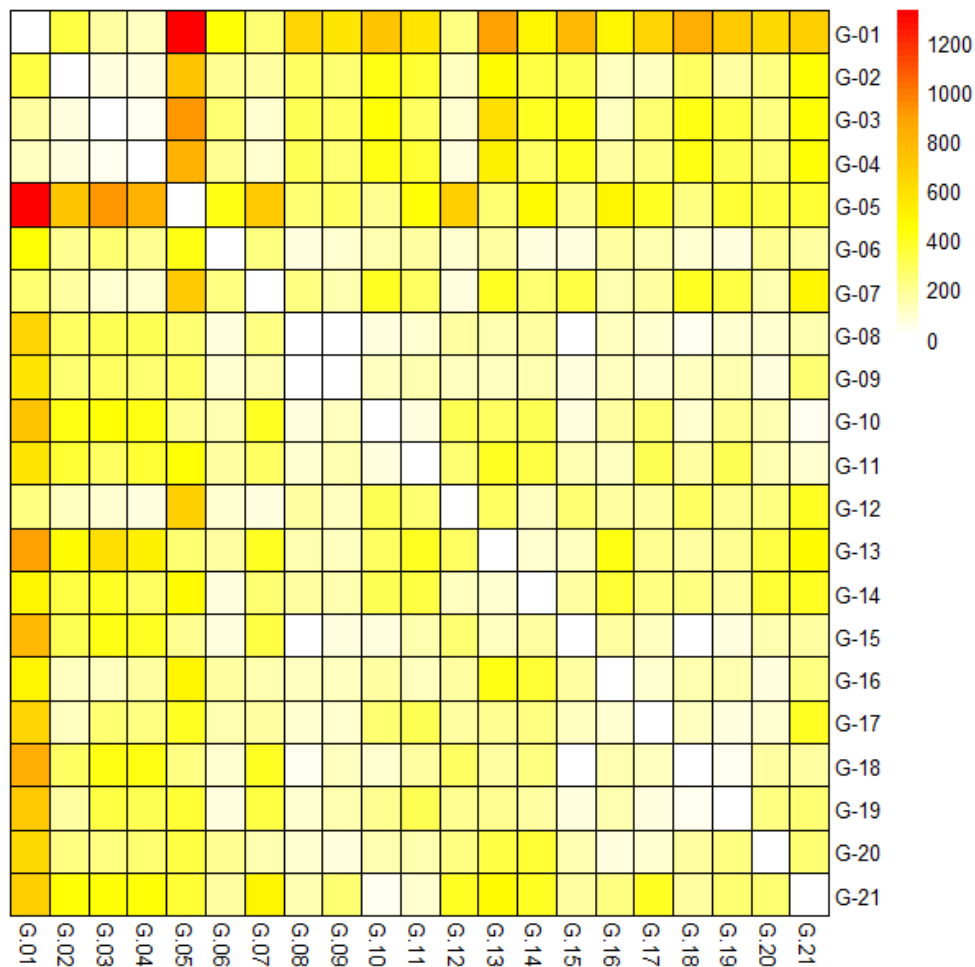


Figura 3 - Distâncias de Mahalanobis de genótipos de soja avaliados obtidas na análise conjunta de quatro ensaios conduzidos sob condições de semiárido. Mossoró-RN, UFERSA, 2020.

4. CONCLUSÕES

O agrupamento dos acessos são dependentes das condições de avaliação, principalmente devido aos efeitos da interação genótipos x anos;

A análise conjunta, sem a presença do efeito da interação, permite a obtenção de dois grupos de genótipos;

Os cruzamentos mais indicados envolvem os genótipos BRS Tracajá, BRS Pérola, BRS Carnaúba, M 8644 IPRO, BRS 8590 e BMX OPUS IPRO, e o genótipo BRS Sambaíba, especialmente aquele entre genótipo BMX OPUS IPRO e BRS Sambaíba, maior dissimilaridade.

REFERÊNCIAS

- BASTIAANSE, H. et al. A comprehensive genomic scan reveals gene dosage balance impacts on quantitative traits in *Populus* trees. **Proceedings of National Academy Science of United States America**, v. 16, n. 27, p. 13690-13699, 2019.
- BORNHOFEN, E. et al. Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 1-10, 2017.
- BRANDT, E. A. et al. Desempenho agrônômico de soja em função da sucessão de culturas em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 869-874, 2006.
- BULEGON, L. G. et al. Componentes de produção e produtividade da cultura da soja submetida à inoculação de *bradyrhizobium* e *azospirillum*. **Terra latino-americana**, v. 34, n. 2, p. 169-176, 2016.
- CÂMARA, A. R. et al. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de soja nos estados de Goiás e Minas gerais. **Global Science Technology**, v. 11, n. 02, p. 23-36, 2018.
- CARMO FILHO, F. do; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. **Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino**. Mossoró: ESAM, 1991, 121 p. (Coleção Mossoroense, 30).
- CARVALHO, M. M. Influência de sistemas de semeadura na população de pragas e nas características morfofisiológicas em cultivares de soja. **Dissertação** - Mestrado em Agronomia (Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade De Ciências Agrônômicas Campus De Botucatu, Botucatu, 2014.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 7 - Safra 2019/20 - Sétimo levantamento, Brasília, p. 1-66, abril 2020. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 20 de abril de 2020.
- CRUZ, C. D. Genes Software - extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 38, n. 4, p. 547-552, 2016.
- DUGJE, I. Y. et al. Farmers' Guide to Soybean Production in Northern Nigeria. **International Institute of Tropical Agriculture**, 2009. 21 pp.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 412 p.
- GOMES, R. V.; COUTINHO, J. L. B. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação. 3. ed. Revisada. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco-IPA, 2008. 212 p.

HEIL, C. Rapid, multi-component analysis of soybeans by FT-NIR Spectroscopy. Madison: Thermo Fisher Scientific, 2010. 3 p. Disponível: <<http://www.nicoletcz.cz/userfiles/file/vjegy/soybeans.pdf>> Acesso em: 28 dez. 2019.

KOLDE, R. (2019). pheatmap: Pretty Heatmaps. R package version 1.0.12. <https://CRAN.R-project.org/package=pheatmap>.

LEMOS, L. B. et al. Desempenho agrônômico e produtivo de cultivares de soja em diferentes safras. **Científica**, v. 39, n. 1/2, p. 44-51, 2011.

MAHALANOBIS, P. C. On the generalized distance in statistics. **Proceedings of Natural Institute of Sciences**, v. 2, p. 49-55, 1936.

MEIER, C. et al. Performance agrônômica e correlação linear entre componentes de rendimento da soja em segunda safra. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.4, p. 933-941, 2019.

MILIOLI, A. S. et al. Yield stability and relationships among stability parameters in soybean genotypes across years. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 78, n. 2, p. 299-309, 2018.

ODA, M. C. et al. Estabilidade e adaptabilidade de produção de grãos de soja por meio de metodologias tradicionais e redes neurais artificiais. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 2, p. 117-124, 2019.

OLIVOTO, T. et al. Mean performance and stability in multi-environment trials II: selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2961-2969, 2019.

PEREIRA, W. A. et al. Performance of transgenic and conventional soybean plants subjected to bioassay for detection of glyphosate tolerant seeds. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 18, n. 1, p. 39-46, 2018.

R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

RAMALHO, M. A. P. et al. Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas. Lavras: UFLA, 2012. 522p.

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

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

SILVA, A. R.; MALAFAIA, G.; MENEZES, I. P. P. Biotools: an R function to predict spatial gene diversity via an individual-based approach. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 2, p. 2-6, 2017.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. The comparison of dendrograms by objective methods. **Taxonomy**, v. 11, n. 1, p. 30-40, 1962.

TOLORUNSE, K. D.; GANA, A. S.; BALA, A.; SANGODELE, E. A. Yield stability studies of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) under rhizobia inoculation in the savanna region of Nigeria. **Plant Breeding**, v. 137, n. 3, p. 262-270, 2018.

TORRES, F. E. et al. Desempenho agronômico e dissimilaridade genética entre genótipos de soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 111-117, 2015.

ZAMBIAZZI E. V. Aplicações da adubação potássica na cultura da soja. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.