

ANÁLISE DE LINHAGENS DE SOJA EM MULTIAMBIENTES VIA MODELOS MISTOS

Marcio Diego Pires¹, Glaucia Leticia Sete da Cruz^{1*}, Thiago Komuro Moriyama¹ e Juliana Parisotto Poletine¹

¹Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus de Umuarama, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Departamento de Ciências Agrônômicas. Estrada da Paca s/n, Bairro São Cristóvão, Umuarama - PR, CEP: 87500-000. E-mail: marciodiegop@yahoo.com.br, glaucialeleticia@gmail.com, thiago.tkm@hotmail.com, jppoletine@uem.br

*autor correspondente: glaucialeleticia@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade, adaptabilidade e estabilidade de dez linhagens experimentais de soja com três testemunhas comerciais. Estas linhagens são pertencentes a um programa de melhoramento genético de empresa privada, no estado do Paraná, na Macrorregião Sojícola 2 e na Região Edafoclimática (REC 201), totalizando 12 locais. A pesquisa foi conduzida em dois anos de ensaios nas safras 2020/2021 e 2021/2022, constituindo 18 ambientes por meio de modelagem mista REML/BLUP, com a utilização do método da MHPRVG. Os tratamentos foram dispostos num delineamento em blocos casualizados com três repetições. As parcelas foram compostas por quatro fileiras de plantas de 5 m de comprimento, com espaçamento de 0,50 m entre fileiras, com superfície útil da parcela foi de 5 m², sendo as duas linhas centrais colhidas nestes locais, avaliando-se a produtividade de grãos. A análise conjunta foi analisada, por meio do modelo misto utilizando-se o software Selegen REML / BLUP, com o Modelo 54, revelando efeito significativo de interação genótipo x local. Inicialmente, nos 18 ambientes, os dados obtidos revelaram efeito significativo da interação genótipo x ambiente para a produtividade de grãos. Posteriormente, os ambientes foram divididos em ambientes favoráveis, acima da média, e ambientes desfavoráveis, abaixo da média. Com base na ANADEV e nos resultados da modelagem mista, demonstrou-se que as linhagens EL8, EL5, EL3 e EL1 são promissoras para seleção, no âmbito de um programa de melhoramento genético com base em critérios de produtividade de grãos, bem como na adaptabilidade e estabilidade genotípica.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max*; melhoramento genético; estabilidade; adaptabilidade.

SOYBEAN INBREAD LINES ANALYSIS IN MULTIPLE ENVIRONMENTS THROUGH MIXED MODELS

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate grain yield, adaptability, and stability of ten experimental soybean inbred lines and three commercial checks. These lines belong to a soybean breeding private program in Paraná State, Soybean Macro region 2 and in at Edaphoclimatic Region (ERC 201), with a total of 12 locations. Trial was conducted over two years 2020/2021 and 2021/2022 harvest seasons, totalizing 18 environments. Statistical analysis was conducted by using mixed models with REML/BLUP and MHPRVG methods. Treatments were arranged in a randomized complete block design with three replications. Plots consisted of four rows of plants 5 m long, spaced 0.50 m apart, being useful plot area of 5 m², being harvest, central two rows, analyzing grain yield. Joint analysis was performed using the mixed model with Selegen REML/BLUP software, Model 54. Initially, in the 18 environments, obtained data revealed a significant effect of genotype x location interaction for grain yield. Subsequently, environments were divided into favorable, above-average environments and

unfavorable, below-average environments. Based on ANADEV and mixed modeling results, it was demonstrated that EL8, EL5 and EL3 lines were positioned for selection in a breeding program, based on grain yield, genotypic adaptability and stability criteria.

KEY WORDS: *Glycine max*; breeding; stability; adaptability.

INTRODUÇÃO

A cultura da soja é de grande importância na produção de grãos no Brasil. Segundo a CONAB (2023), a produtividade média atual da soja é de 3.508 kg ha⁻¹. No entanto, o potencial produtivo máximo das variedades de soja ainda não está sendo aproveitado. Para aumentar a produtividade, várias técnicas de manejo têm sido utilizadas, como o sistema de plantio direto, a integração lavoura-pecuária, a rotação de culturas, o uso de bioestimulantes, a agricultura de precisão e o uso de variedades melhoradas geneticamente (Costa et al., 2019).

Nos últimos anos, houve aumento significativo do interesse em obter informações sobre a interação entre o genótipo e o ambiente (GxA) no contexto do melhoramento genético de várias espécies cultivadas na agricultura (Borém e Miranda, 2013). Por um longo período, os geneticistas e melhoristas de plantas não deram importância ao fenômeno da interação GxA. Conforme Allard e Bradshaw (1964), isso se deve ao fato de acreditar-se que esse fenômeno é prejudicial e dificulta a indicação de cultivares para diferentes ambientes de cultivo, porém, podemos considerar a dificuldade na análise da GxA onde a MHPRVG traz a solução e facilita a recomendação de cultivares.

Para culturas anuais, é frequente a realização de experimentos onde são montados ensaios em diferentes locais e épocas de semeadura, com o objetivo de observar, estimar e recomendar baseado nos resultados da interação dos genótipos nesses ambientes. Para tornar esse processo mais eficiente, é importante garantir a qualidade da análise dos dados. Uma metodologia comumente utilizada para esse fim é a dos modelos mistos (REML/BLUP) (Pimentel, 2014).

Conforme Borém e Miranda (2013), adaptabilidade refere-se à capacidade do genótipo de responder às condições ambientais, enquanto estabilidade refere-se à capacidade do genótipo de desempenhar consistentemente sua função, mesmo diante de variações ambientais. A modelagem mista classifica os genótipos com base em seus valores genéticos e simula a estabilidade, adaptabilidade e produtividade, utilizando a média harmônica da performance relativa do genótipo (MHPRVG) oferecendo previsões precisas e permite identificar genótipos superiores.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar a produtividade, adaptabilidade e estabilidade de dez linhagens experimentais de soja com três referências comerciais em múltiplos ambientes através da modelagem mista e da MHPRVG nos anos agrícolas 2020/2021 e 2021/2022.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados pelo Programa de Melhoramento de Soja desenvolvido pela BASF SA de Londrina/PR, utilizando ensaios de valor cultivo e uso (VCU) abrangendo 13 genótipos de soja, sendo 3 variedades comerciais e 10 linhagens teste denominadas Elites, nas quais foi realizada a análise conjunta dos dados. As linhagens Elites possuem a tecnologia INTACTA 2 XTEND® que possui resistência aos herbicidas glifosato e dicamba e também resistência a lagartas soja e às variedades comerciais como testemunhas tolerantes ao glifosato e resistentes ao ataque de lagartas soja (Intacta RR2 PRO™), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Genótipos de soja e respectivo grupo de maturação

Genótipo	Grupo de maturação	Transgenia
EL1	5.9	INTACTA 2 XTEND®
EL2	6.0	INTACTA 2 XTEND®
EL3	6.1	INTACTA 2 XTEND®
EL4	6.2	INTACTA 2 XTEND®
EL5	6.2	INTACTA 2 XTEND®
EL6	6.2	INTACTA 2 XTEND®
EL7	6.3	INTACTA 2 XTEND®
EL8	6.3	INTACTA 2 XTEND®
EL9	6.0	INTACTA 2 XTEND®
EL10	6.2	INTACTA 2 XTEND®
REF1*	5.9	Intacta RR2 PRO™
REF2*	5.9	Intacta RR2 PRO™
REF3*	6.0	Intacta RR2 PRO™

*Testemunhas

Foram implantados ensaios em doze locais da REC 201, sendo que, em Ibiporã, foram alocados três ensaios: Ibiporã I (primeira época), Ibiporã II (segunda época) na safra 2020/2021 e Ibiporã III na safra 2021/2022. Os municípios de Medianeira, Pedrinhas Paulista, Campo Mourão e São Sebastião da Moreira foram instalados nos dois anos agrícolas, enquanto os demais locais foram implantados apenas em um dos anos agrícolas. No total, foram avaliados dezoito ambientes, sendo quinze locais no estado do Paraná e três no estado de São Paulo, na

REC 201 da Região Sojícola 2, de acordo com a terceira aproximação da Embrapa Soja (2012). Maiores detalhes sobre os locais estão apresentados na Tabela 2 e na Figura 1.

Tabela 2 - Ambientes avaliados (AMB) com as respectivas safras, locais, unidades federativas (UF), latitude (LAT), longitude (LONG) e altitude em metros de cada local (ALT) na região edafoclimática 201

SAFRA	LOCAL	UF	LAT	LONG	ALT (m)
2020/2021	Medianeira I	PR	-25.291	-54.098	415
2020/2021	Marechal Candido Rondon	PR	-24.556	-54.057	434
2020/2021	Maripá	PR	-24.418	-53.83	399
2020/2021	Ubiratã	PR	-24.545	-52.988	453
2020/2021	Ibiporã I	PR	-23.261	-51.058	437
2020/2021	Ibiporã II	PR	-23.272	-51.051	437
2020/2021	Pedrinhas Paulista I	SP	-22.815	-50.794	332
2020/2021	Campo Mourão I	PR	-24.046	-52.383	636
2020/2021	Corbélia	PR	-24.799	-53.307	612
2020/2021	São Sebastião da Amoreira I	PR	-23.461	-50.766	662
2021/2022	Medianeira II	PR	-25.295	-54.094	415
2021/2022	Assis	SP	-22.662	-50.412	539
2021/2022	Bela Vista do Paraíso	PR	-22.997	-51.191	509
2021/2022	Ibiporã III	PR	-23.269	-51.038	437
2021/2022	Pedrinhas Paulista II	SP	-22.815	-50.805	332
2021/2022	Sabáudia	PR	-23.318	-51.553	722
2021/2022	São Sebastião da Amoreira II	PR	-23.465	-50.771	662
2021/2022	Campo Mourão II	PR	-24.041	-52.398	636

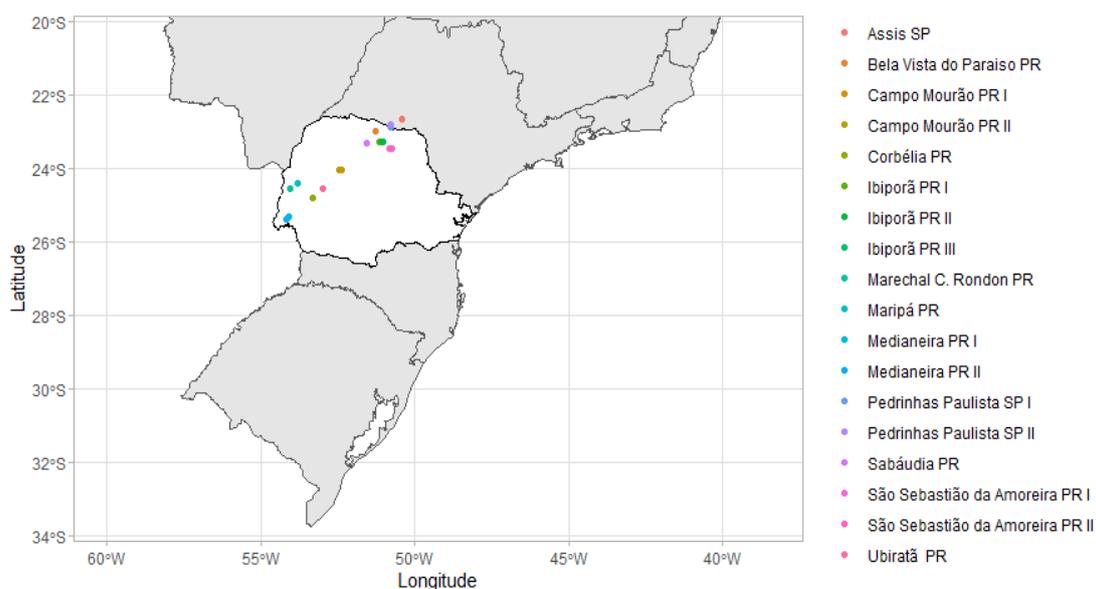


Figura 1 - Distribuição da rede de ensaios dos VCU's nas safras 2020/21 e 2021/22. Fonte: Autor.

Todos os ensaios foram semeados mecanicamente, usando semeadoras de parcela, a uma profundidade aproximada de 2,5 a 3,5 cm, com distribuição de 10 a 13 sementes por metro. A condução dos tratos culturais e da fertilização foi feita de maneira semelhante ao sistema utilizado pelos produtores locais para seguir as recomendações técnicas.

Os experimentos foram realizados usando um delineamento experimental em blocos casualizados com 3 repetições. As parcelas consistiram em quatro fileiras de plantas com 5 metros de comprimento e espaçadas de 0,50 m entre si. A área útil da parcela foi de 5 metros quadrados e duas linhas centrais foram colhidas através de colhedora mecânica de parcela extraíndo o peso e a umidade de forma automática durante o processo de colheita para avaliar a produtividade de grãos (PROD). Após a colheita, a massa das parcelas foi corrigida para 13% de umidade e o valor obtido foi extrapolado para kg ha^{-1} , conforme fórmulas a seguir:

$$a) \text{ Correção de umidade} \quad PF = PI \times \left(\frac{100 - UI}{100 - UF} \right)$$

$$b) \text{ Cálculo de produtividade} \quad PROD = \left(\frac{PF \times 10.000}{TP} \right)$$

Em que:

PF: peso final corrigido da amostra;

PI: peso inicial da amostra;

UI: umidade inicial da amostra;

UF: umidade final corrigida (13%);

PROD: Produtividade em (kg ha^{-1});

TP: Tamanho da parcela em m^2 ;

Condições climáticas

Conforme dados do Inmet (2020) durante o trimestre de setembro, outubro e novembro de 2020, a região onde os ensaios foram instalados experimentou temperaturas com grande variação, com mínimas entre 11,5 e 14,2 °C, e máximas acima da média histórica, atingindo picos entre 40,4 e 42,7 °C. Além disso, os volumes de chuva foram abaixo da média histórica, o que dificultou e atrasou a implantação e o desenvolvimento inicial dos experimentos, com chuvas variando entre 108,6 e 206,4 mm.

De acordo com Inmet (2020) e Inmet (2021), no trimestre de dezembro de 2020, janeiro e fevereiro de 2021, os volumes de chuva foram acima da média para essa época, variando entre 500 e 700 mm para a região. Isso prejudicou o enchimento de grãos da cultura da soja devido à falta de luz, o que levou a uma diminuição na fotossíntese. Além disso, essas condições favoráveis ao desenvolvimento de doenças foliares, como a mancha alvo e a ferrugem asiática, e a dificuldade na aplicação de fungicidas aumentaram ainda mais a pressão das doenças foliares, principalmente em cultivares e linhagens suscetíveis. As temperaturas durante esse período foram consideradas boas, variando entre 15 e 25 °C para as mínimas e entre 25 e 35 °C para as máximas.

Nos dados do Inmet (2021) para o trimestre de setembro, outubro e novembro de 2021, a região foi influenciada por padrões atmosféricos que variaram entre períodos de seca e episódios de chuva. Os meses de setembro e outubro foram caracterizados por chuvas irregulares e temperaturas com grande amplitude, com a mínima variando de 7 a 13 °C e máxima alcançando 40 °C. No entanto, no final do mês de outubro e em novembro, houve um aumento significativo nos volumes de chuva, distribuídos de maneira mais uniforme e atingindo ou excedendo a média histórica. Essas chuvas foram essenciais para reverter parcialmente os efeitos da seca prolongada e garantir melhores condições para o ciclo produtivo da soja na região, com volumes variando entre 400 e 500 mm.

Segundo o mesmo instituto, para o trimestre de dezembro de 2021, janeiro e fevereiro de 2022, houve variações significativas nas condições climáticas devido à transição entre a primavera e o verão. Os volumes de chuva no período ficaram abaixo da média histórica, entre 200 e 400 mm, e as temperaturas mínimas variaram entre 13 e 16 °C, com picos de temperatura chegando a 40 °C. Essa baixa disponibilidade de água no solo devido aos volumes reduzidos de chuva comprometeu a fase de enchimento de grãos, que é crucial para a formação do rendimento final.

Análise conjunta

Utilizando-se o modelo misto 54 do software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007), foram realizadas as análises. O modelo utilizado foi:

$$y = Xr + Zg + Wi + e$$

Em que y é o vetor de dados, r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral, g é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios), i é o

vetor dos efeitos da interação genótipo x ambiente (aleatórios) e é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios). As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos. O vetor r contempla todos as repetições de todos os locais (ajusta combinações repetição-local). Nesse caso, esse vetor contempla os efeitos de locais e de repetições dentro de locais. É essencial que as repetições sejam codificadas com diferentes números nos diferentes locais.

Estimativa das significâncias – ANADEV

O teste da razão da verossimilhança (LRT) foi realizado a fim de testar os efeitos aleatórios do modelo, por meio da análise de deviance (ANADEV), com o modelo completo e sem o efeito de genótipo e da interação genótipos x ambientes. A diferença entre a deviance do modelo completo e a deviance do modelo sem o efeito em questão foi então comparada com os valores de qui-quadrado com 1 grau de liberdade, para os níveis de significância de 1% e 5% de probabilidade. Essa abordagem segue as recomendações de Resende (2007) e pode ser expressa matematicamente, como:

$$LRT = -2 \ln \left(\frac{MV \text{ do modelo reduzido}}{MV \text{ do modelo completo}} \right)$$

Em que:

\ln : é o logaritmo neperiano e MV é máxima verossimilhança

Análises de adaptabilidade e estabilidade pela metodologia REML/BLUP

As análises de estabilidade genotípica foram calculadas utilizando a média harmônica dos valores genotípicos (MHVG). Isso se baseia na observação de que o comportamento genotípico apresenta uma média harmônica maior em locais onde o desvio padrão é menor. Assim, ao selecionar com base nos maiores valores da MHVG, estamos, simultaneamente, selecionando para produtividade e estabilidade. Adicionalmente, a instabilidade dentro dos locais também é considerada através da transformação $1/y$.

Equação da MHVG:

$$MHVG_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{VG_{ij}}}$$

Em que:

n_i : número de ambientes em que o genótipo i foi avaliado;

VG_{ij} : valor genotípico predito do genótipo i no ambiente j .

Para avaliar a adaptabilidade, a performance relativa dos valores genotípicos (PRVG) foi utilizada, o que é uma medida simples e eficiente no contexto dos modelos mistos. Neste método, os valores genotípicos preditos (ou os dados originais) são expressos como uma proporção da média geral de cada local e, em seguida, a média desta proporção é obtida através dos locais. Este conceito de performance relativa, que tem sido usado há muito tempo por Wright et al. (1966), citado em Resende, (2007), em termos de dados fenotípicos, serve como a fundação do método de Annicchiarico (1992), também citado em Resende (2007).

Equação PRVG:

$$PRVG_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{VG_{ij}}{\mu_j}$$

Em que:

n_i : Número de ambientes nos quais o genótipo i foi observado;

μ_j : média do ambiente j ;

VG_{ij} : valor genotípico predito do genótipo i no ambiente j ;

$VG_{ij}: \mu_j + g_i + ge_{ij}$.

Em que g_i é o efeito genotípico do genótipo i e o ge_{ij} é o efeito da interação genótipo x ambiente do genótipo i no ambiente j , ambos efeitos estimados via REML/BLUP.

Para avaliar simultaneamente a estabilidade, adaptabilidade e produtividade, foi utilizado o método da média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG), proposto por Resende (2004), no contexto de modelos mistos.

Equação MHPRVG:

$$MHPRVG_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{PRVG_{ij}}}$$

A estimação dos componentes de variância e efeitos de predição não viesada foram estimados via software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise conjuntas

De acordo com o Teste da Razão de Verossimilhança na Tabela 3, a análise conjunta de deviance entre os locais demonstrou um resultado estatisticamente significativo para os efeitos dos genótipos ($p < 0,05$) e uma interação altamente significativa entre genótipo e local, com um nível de probabilidade de ($p < 0,01$) pelo teste do χ^2 para produtividade de grãos. Portanto, a análise de Deviance indica que os genótipos apresentam variabilidade genética e respondem de maneiras distintas em diferentes ambientes.

Tabela 3 - Teste da Razão de Verossimilhança, componentes de variância e parâmetros genéticos de 13 genótipos de soja para rendimento de grãos em 18 ambientes avaliados nas safras 2020/2021 e 2021/2022 na REC201

Efeito	Deviance	LRT	Componentes de Variância	
Genótipos	8619.08	4,43*	Vg - Variância genotípica	12.490,48
Genótipo x Locais	8696.69	82,04*	Vint - Variância da interação genótipo x ambiente	123.888,48
Resíduo	-	-	Ve - Variância residual	186.733,61
Modelo Completo	8614.65	-	Vf - Variância fenotípica individual	323112,57
Parâmetros Genéticos				
	H ² mg (%) - Herdabilidade da média do genótipo			0.55
	h ² g (%) - Herdabilidade de parcelas individuais no sentido amplo			0,038657 +- 0,0213
	Acgen - Acurácia da seleção de genótipos			0.74
	c2int - Coeficiente de determinação dos efeitos da interação GXA			0.38
	Rgloc - Correlação genotípica através do ambiente			0.09
	CVgi% - Coeficiente de variação genotípica			2.564305
	CVe% - Coeficiente de variação residual			9.914965
	Razão entre VCgi% e VCe%			0,2586
	Média geral do experimento kg ha ⁻¹			4358.32945

¥: Deviance do modelo ajustado sem os efeitos correspondentes. * e **: Significativo pelo teste qui-quadrado (χ^2) tabelado com 1 grau de liberdade: a 5% (3,84) e 1% (6,63), respectivamente

No que diz respeito aos componentes de variância, o valor de 12.490,48 é atribuído à variância genotípica (Vg), 123.888,48 é atribuído à interação genótipo x ambiente (Vint) e 186.733,60 é atribuído à variância residual (Ve). É importante destacar que o valor de Ve contribuiu de forma mais significativa para a composição da variância fenotípica (Vf) com

323.112,57. Essa situação é comum em características complexas, como a produtividade de grãos, uma vez que ela é fortemente influenciada pelo ambiente e governada por diversos genes.

A herdabilidade média dos genótipos ($h^2mg\%$) e a acurácia seletiva de seleção de genótipos foram de 0,55 e 0,74, respectivamente. Casagrande et al. (2020) encontraram estimativas semelhantes para produção de grãos ao estudar a diversidade de um painel de genótipos de trigo utilizando a metodologia REML/BLUP. Resende e Duarte (2007) consideraram estimativas de acurácia seletiva acima de 0,70 como indicativas de alta precisão experimental. O coeficiente de variação experimental ($CVe\%$) para produtividade foi de 9,91%, o que está em concordância com a acurácia seletiva. No estudo realizado por Lucio et al. (1999) com 480 ensaios de competição de genótipos de soja, observou-se uma precisão média para os ensaios com $CVe\%$ variando de 9% a 15%, o que indica que o valor obtido neste estudo é esperado para a produtividade. A razão entre o VCg/VCe (0,25) foi menor que a unidade, sugerindo dificuldades na seleção multiambientes.

Os valores do $c2int$ - coeficiente de determinação para os efeitos da interação ($G \times A$) e $Rgloc$ - correlação genotípica através do ambiente, conforme mostrado na Tabela 4, foram baixos, 0,38 e 0,09, respectivamente. Essas estimativas de baixa magnitude são devido à existência de uma interação $G \times A$ complexa, o que indica uma falta de consistência na superioridade dos genótipos com a variação nos diferentes ambientes (Cruz et al., 2012).

A estimativa do coeficiente de determinação dos efeitos genotípicos (representado pela herdabilidade no sentido amplo H^2g), excluindo as interações entre um genótipo específico e um local e ano específico, foi de 0,038657 +- 0,0213. De acordo com (Cruz et al., 2012), a herdabilidade é uma medida da proporção da variabilidade fenotípica que é atribuída à herança genética. Essa baixa herdabilidade sugere que a variação fenotípica foi principalmente influenciada por fatores ambientais, com uma contribuição menor dos genes. Essa característica é de grande importância para os melhoristas, pois permite prever o sucesso da seleção, como mencionado por Nardino et al. (2017). A média de produtividade de grãos dos 18 locais, 13 genótipos, nas duas safras foi de 4.358,33 kg ha⁻¹.

Seleção de Genótipos - Todos Locais

Os resultados obtidos, que se referem aos efeitos genotípicos (g) e aos valores genotípicos preditos ($u+g$), foram obtidos sem considerar a interação com o ambiente. De acordo com Resende (2006), esses valores genotípicos médios em vários ambientes, representados por ($u+g+gem$), englobam uma interação média com todos os ambientes.

Ao utilizar os valores baseados em (u+g), também mostrados na Tabela 4, é possível selecionar as cultivares para ambientes que não foram incluídos na rede experimental, pois o desempenho dos materiais não é afetado pela interação com esses ambientes. Contudo, para ambientes que foram incorporados na rede de experimentos ou locais com interações similares às notadas no experimento, a sugestão mais fidedigna se apoia nos valores de (u+g+gem). Por outro lado, para contextos que não participaram da rede experimental, a aplicação de valores baseados em (u+g) é a alternativa mais segura (Resende, 2007).

Tabela 4 - Valores referentes aos efeitos (g) e valores (u+g) genotípicos preditos, (u+g+gem) valor genotípico médio nos vários ambientes para o caráter de produtividade de grãos em kg ha⁻¹, livres de toda interação com ambientes, assim como valores de LIIC e LSIC e média fenotípica

Ordem	Genótipo	Produtividade (kg ha ⁻¹)					Média Fenotípica
		G	u + g	U+g+gem	LIIC	LSIC	
1	EL8	141.19	4499.52	4577.32	4345.08	4653.96	4651.52
2	EL5	123.02	4481.34	4549.13	4326.90	4635.78	4571.65
3	EL3	84.64	4442.97	4489.60	4288.52	4597.41	4503.74
4	EL1	48.50	4406.82	4433.55	4252.38	4561.27	4440.28
5	REF13*	40.60	4398.93	4421.30	4244.20	4553.66	4419.20
6	REF12*	-4.44	4353.89	4351.44	4199.16	4508.61	4329.51
7	EL10	-17.90	4340.43	4330.57	4185.42	4495.45	4389.29
8	EL4	-17.94	4340.39	4330.50	4185.94	4494.84	4318.43
9	EL6	-48.00	4310.33	4283.88	4156.17	4464.49	4270.60
10	EL7	-60.14	4298.19	4265.06	4143.46	4452.93	4249.24
11	REF11*	-80.61	4277.72	4233.31	4123.28	4432.17	4204.58
12	EL2	-91.42	4266.91	4216.53	4111.61	4422.20	4175.99
13	EL9	-117.50	4240.83	4176.08	4086.10	4395.56	4127.47

* Testemunha.

A Figura 2 estabelece a classificação dos genótipos mais eficientes baseada nos valores de (u+g) e (u+g+gem). Uma avaliação dos valores genotípicos previstos em todos os ambientes estudados mostra que os genótipos EL8, EL5, EL3 e EL1 possuem os valores mais elevados, atingindo 4577.32, 4549.13, 4489.60 e 4433.55 kg ha⁻¹, respectivamente para (u+g+gem). Adicionalmente, os benefícios do ganho (g) ultrapassam aqueles dos cultivares comerciais REF13, REF12 e REF11, os quais apresentaram valores de (u+g+gem) de 4421.30, 4351.44 e 4233.31 kg ha⁻¹, respectivamente.

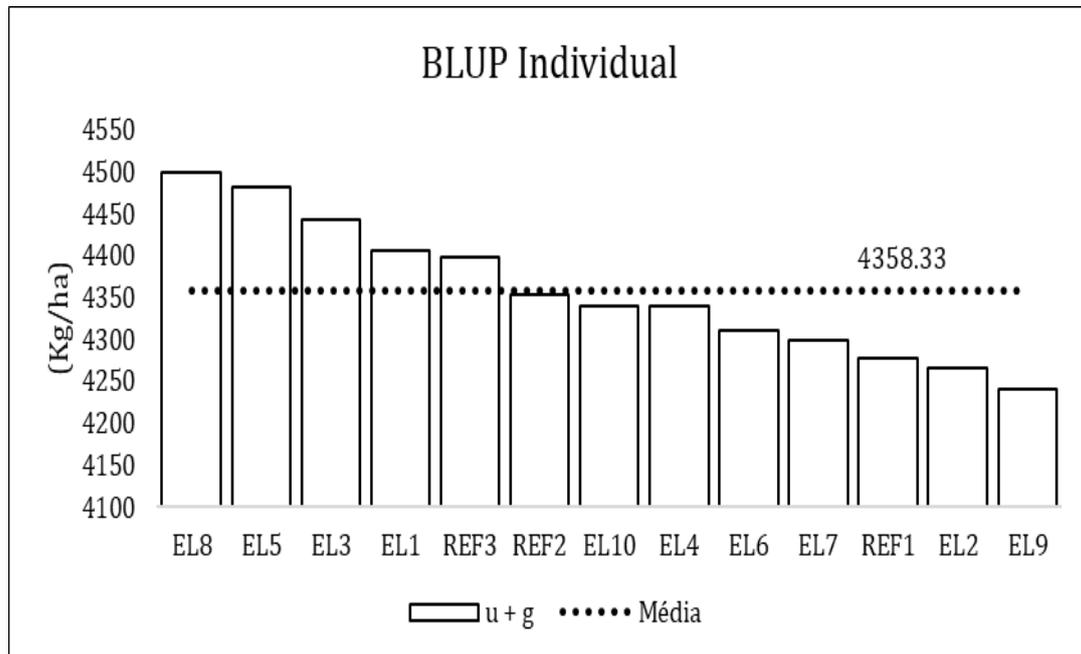


Figura 2 - Médias de (u+g) referente à produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 13 genótipos de soja avaliados em 18 ambientes da Região Edafoclimática Sojícola 201 na safra 2020/2021 e 2021/2022.

Estabilidade e Adaptabilidade de Valores Genéticos (MHPRVG)

Na Tabela 5, são apresentados os resultados de estabilidade (MHVG), adaptabilidade (PRVG) e a combinação de estabilidade e adaptabilidade (MHPRVG). A análise MHVG revela que os genótipos EL8, EL3 e EL5 apresentam a maior produtividade e estabilidade, com valores de 4374,33, 4309,23 e 4308,19, respectivamente. A análise MHVG integra a avaliação de produtividade e estabilidade ao mesmo tempo. A produtividade é estabelecida pela classificação dos genótipos baseada em seus valores genotípicos (BLUP), enquanto a estabilidade é calculada usando o desvio padrão do comportamento do genótipo em diversos ambientes. Quanto menor o desvio padrão, maior será a média harmônica dos genótipos.

A adaptabilidade genotípica (PRVG) é representada pela média proporcional dos valores genotípicos preditos em comparação à média geral de cada ambiente. Nesta análise, os genótipos com a maior adaptabilidade foram EL8, EL5 e EL3, apresentando valores de 1,0513, 1,0411 e 1,0332, respectivamente. Isso alterou a classificação do genótipo EL3, que estava em 2º lugar na análise MHVG e passou para o 3º lugar na PRVG. Da mesma forma, o genótipo EL5 mudou da 3ª para a 2ª posição, respectivamente.

Tabela 5 - Estabilidade de valores genotípicos (MHVG), adaptabilidade de valores genotípicos (PRVG), ordenada pela estabilidade e adaptabilidade de valores genotípicos (MHPRVG) para kg ha⁻¹ de 13 genótipos de soja

Genótipo	MHVG	PRVG	PRVG*MG	MHPRVG	MHPRVG*MG
EL8	4374.3347	1.0513	4581.9028	1.0499	4575.977
EL5	4308.1989	1.0411	4537.5084	1.0392	4529.3182
EL3	4309.2302	1.0332	4502.8124	1.0311	4493.9183
REF13*	4218.7881	1.0152	4424.4268	1.0131	4415.5081
EL1	4169.6574	1.0127	4413.8109	1.0095	4399.6465
REF12*	4170.9088	1.0018	4365.983	0.9985	4351.6036
EL4	4137.5002	0.9961	4341.1515	0.9919	4323.1723
EL10	4109.7403	0.993	4327.618	0.9895	4312.4848
EL6	4102.1139	0.9882	4307.0887	0.9785	4264.5147
EL7	4072.0989	0.9816	4278.0638	0.9747	4248.0938
EL2	4036.9978	0.9694	4225.1207	0.9672	4215.3121
REF11*	3936.2998	0.964	4201.3073	0.9585	4177.4088
EL9	3894.3979	0.9525	4151.4884	0.9452	4119.4062

MG: média geral = 4358,32945 Quilos por hectare de soja; * Testemunha

A Figura 3 apresenta as médias de MHPRVG*MG, que se referem à produtividade de grãos (kg ha⁻¹), em forma de gráfico, complementando a análise. Para MHPRVG, onde produtividade, estabilidade e adaptabilidade são analisadas conjuntamente, os genótipos EL8, EL5 e EL3 apresentaram os maiores valores com resultados de 1,0499, 1,0392 e 1,0311, respectivamente, superando as referências comerciais. O melhor genótipo comercial foi o REF13, posicionando-se em 4º lugar nas análises de MHVG, PRVG e MHPRVG simultaneamente.

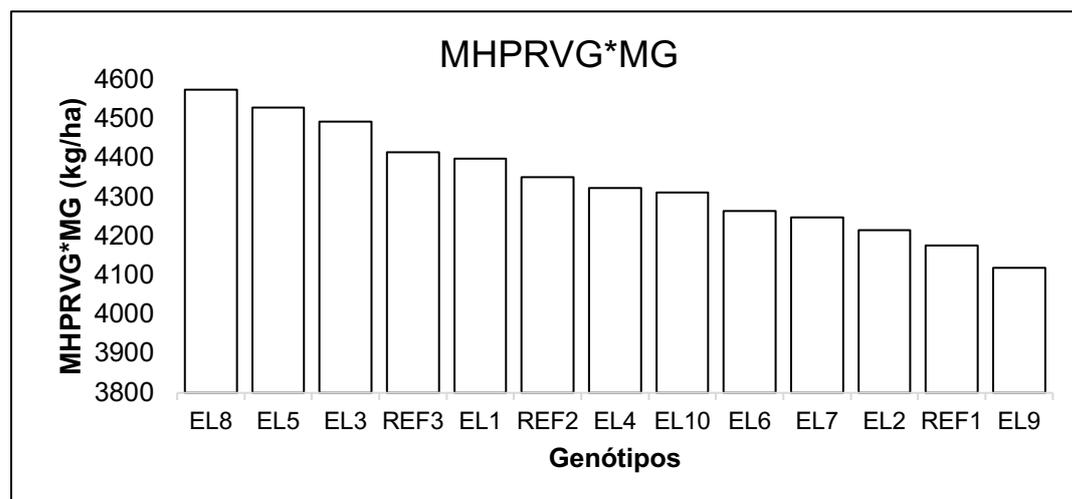


Figura 3 - Médias de MHPRVG*MG referente à produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de 13 genótipos de soja avaliados em 18 ambientes da Região Edafoclimática Sojícola 201 na safra 2020/2021 e 2021/2022.

De acordo com Resende (2007), quanto menor o erro padrão da PRGV através dos locais, maior é a MHVG, o que implica na seleção para produtividade e estabilidade. Por outro lado, EL9 foi o genótipo que mostrou a maior instabilidade em relação aos ambientes testados.

O método MHPRVG foi também empregado separadamente para os ambientes, dividindo os dezoito locais em dois grupos, com base na produtividade média dos genótipos em cada localidade. Os ambientes Medianeira-PR I, Marechal C. Rondon-PR, Maripá-PR, Ibitiporã-PR I, Ibitiporã-PR II, Corbélia-PR, São Seb. da Moreira-PR I, Assis-SP, Ibitiporã-PR III e São Seb. da Moreira-PR, que apresentaram uma produtividade média de grãos acima da média geral (4.358,33 kg ha⁻¹), foram classificados como favoráveis. Já os ambientes Ubitatã-PR, Pedrinhas Paulista-PR I, Campo Mourão-PR I, Medianeira-PR II, Bela V. do Paraíso-PR, Pedrinhas Paulista-PR II, Sabaudia-PR e Campo Mourão-PR II, com médias abaixo deste valor, foram considerados desfavoráveis.

Ao comparar os resultados alcançados em ambientes favoráveis e desfavoráveis (Tabela 6), foi observado que nos ambientes desfavoráveis houve uma previsão de maior herdabilidade (0,065253+/-0,0413), bem como maiores valores de precisão (71,25%) e correlação genotípica entre os ambientes (Rgloc=18,2787%).

Tabela 6 - Estimativa de componentes de variância para ambientes favoráveis e desfavoráveis referente a produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de 13 genótipos de soja avaliados em 18 ambientes da região Edafoclimática 201 na safra 2021/2022 e 2022/2023

Parâmetros	Ambientes Favoráveis	Ambientes desfavoráveis
h ² g (%) - Herdabilidade de parcelas individuais no sentido amplo	0,054931 +/- 0,0342	0,065253 +/- 0,0413
Acgen - Acurácia da seleção de genótipos	0,6959	0,7125
Rgloc - Correlação genotípica através do ambiente	0,1195	0,1827
Média geral do experimento (kg ha ⁻¹)	4.911,14	3.666,97

Em ambas as condições, favoráveis e desfavoráveis, uma ótima precisão experimental foi alcançada. Isso sugere que estes ambientes específicos foram impactados por uma interação complexa genótipo-ambiente, onde vários genes foram influenciados por fatores ambientais, levando a uma expressão fenotípica mais complexa. Essa complexidade pode surgir quando o ambiente oferece uma ampla gama de estímulos ou quando ocorrem interações entre diferentes fatores ambientais.

Quanto à média de produtividade, houve diferenças relevantes entre os ambientes favoráveis e desfavoráveis. A produtividade média nos ambientes favoráveis foi de 4.911,14 kg ha⁻¹, em contraste com 3.666,98 kg ha⁻¹ nos ambientes desfavoráveis. Em condições adversas, a média obtida superou em 4,33% a média de produtividade brasileira na colheita 2022/2023, enquanto a média dos ambientes favoráveis obteve uma média de 4.911,14 kg ha⁻¹ 28,57% maior que a média brasileira, de 3508 kg ha⁻¹, conforme dados da CONAB (2023). De modo geral, os genótipos avaliados provaram ser produtivos, o que já era previsto, visto que foram selecionados como genótipos Elite, passando por rigorosas seleções e pressão de seleção em safras anteriores no programa de melhoramento genético.

Ao examinar o gráfico (Figura 4) compara os ambientes favoráveis e desfavoráveis através de um diagrama de dispersão, os genótipos EL8, EL5, EL3, REF3, EL1 e EL4 foram categorizados como genótipos com ampla adaptabilidade geral e ampla estabilidade. O genótipo EL8 exibiu a maior estabilidade, seguido pelo EL3, ao passo que o genótipo EL5 evidenciou a maior adaptabilidade.

Por outro lado, os genótipos REF2, EL10, EL2 e EL6 mostraram adaptação específica a ambientes desfavoráveis. O genótipo REF1 demonstrou adaptação específica a ambientes

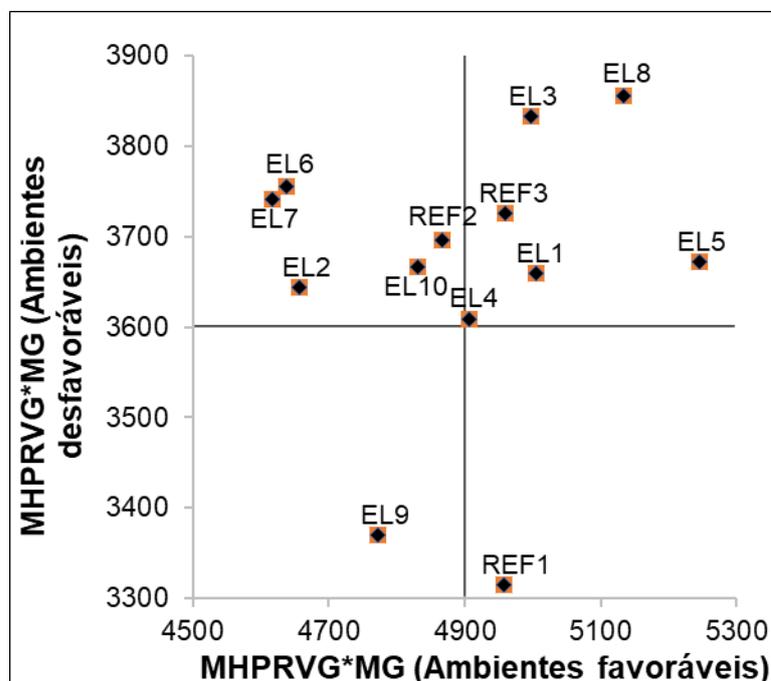


Figura 4 - Diagrama de dispersão em ambientes favoráveis e desfavoráveis para MHPRVG*MG referente a produtividade de grãos (kg ha⁻¹) de 13 genótipos de soja avaliados em 18 ambientes da região Edafoclimática 201 na safra 2021/2022 e 2022/2023.

favoráveis, enquanto o genótipo EL9 exibiu baixa estabilidade e adaptabilidade, ficando abaixo da média nos ambientes analisados.

O uso do método MHPRVG é crucial, já que se baseia na aplicação de métodos estatísticos que garantem uma maior precisão na predição dos valores genotípicos. Além disso, este método tem a vantagem de penalizar a instabilidade dos genótipos em diferentes ambientes e capitalizar a resposta (adaptabilidade) quando há melhorias no ambiente (RESENDE, 2007).

Seleção de Genótipos por locais

A Figura 5 apresenta uma análise da interação genótipo-ambiente (ge), que revela o ganho em kg ha⁻¹ por cada genótipo. Podemos observar uma variação de ganho que varia de 884,44 a -1.163,69, indicando que quanto maior o valor, maior foi a expressão do genótipo no ambiente em questão.

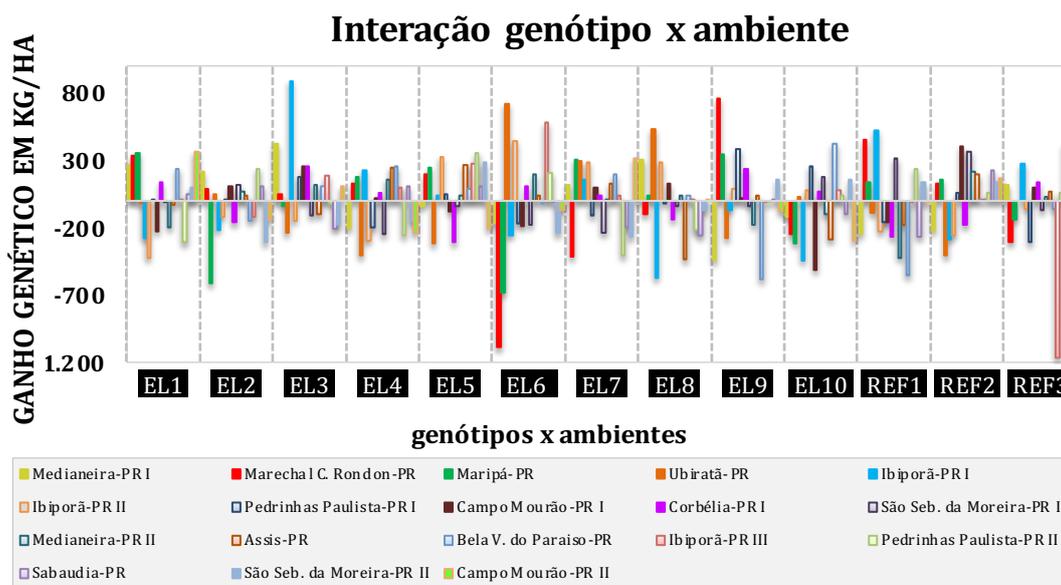


Figura 5 - Interação GE (genótipo x ambiente), ambientes compostos pela média dos anos agrícolas 2021/2022 e 2022/2023, ganho (g) de cada ambiente.

A soma total do ganho de cada local sempre resultará em zero, o que denota a anulação do ganho genético em cada ambiente. Ao somar o ganho genético de cada genótipo em todos os ambientes, nos deparamos com a complexidade inerente à seleção de genótipos em ambientes múltiplos. Nenhum genótipo apresentou um ganho positivo em todos os ambientes nessa análise, o que sublinha a importância de segmentar sub-regiões com condições ambientais similares para uma seleção de genótipos e posicionamento de cultivares assertivamente.

Alguns genótipos se destacam por terem maiores ganhos em uma maior quantidade de ambientes, o que contribui para a análise de todos os locais. O genótipo EL5 apresentou um ganho positivo em 12 diferentes ambientes, incluindo Marechal C. Rondon - PR, Maripá, Ibiporã - PR (I, II e III), Pedrinhas Paulista - (I e II), Medianeira - PR, Assis - SP, Bela Vista do Paraíso - PR, Sabáudia – PR e São Sebastião da Moreira - PR. Esses resultados contribuem para a análise, onde este genótipo se destacou como o segundo melhor em relação ao desempenho de MHPRVG em produtividade e apresentou um bom comportamento tanto em ambientes favoráveis quanto desfavoráveis. O genótipo EL3 obteve resultados positivos em dez ambientes diferentes, incluindo Medianeira – PR I, Marechal Cândido Rondon - PR, Ibiporã - PR, Pedrinhas Paulista - SP, Campo Mourão - PR, Corbélia - PR, Bela Vista do Paraíso - PR e Campos Mourão - PR. No entanto, em outros locais, o genótipo apresentou resultados negativos (ge), embora de baixa magnitude. O resultado mais expressivo foi de -234,56. Esses resultados explicam por que o genótipo EL3 foi classificado como o terceiro melhor na análise de MHPRVG.

O genótipo EL8 apresentou um resultado positivo em nove diferentes ambientes, incluindo Medianeira-PR I, Maripá-PR, Ubiratã-PR, Ibiporã-PR II, Campo Mourão-PR I, Medianeira-PR II, Bela V. do Paraíso-PR e Ibiporã-PR. Na análise de MHPRVG, o genótipo EL8 obteve o melhor desempenho e foi classificado em primeiro lugar, demonstrando uma ampla adaptabilidade e estabilidade, este genótipo também teve bons resultados na análise com ambientes favoráveis e desfavoráveis. O genótipo EL7 apresentou um resultado positivo em 12 diferentes ambientes, incluindo Medianeira-PR I, Maripá-PR, Ubiratã-PR, Ibiporã-PR I, Ibiporã-PR II, Campo Mourão-PR I, Corbélia-PR, Medianeira-PR II, Assis-PR, Bela V. do Paraíso-PR, Ibiporã-PR III e Campo Mourão-PR II. No entanto, na análise de MHPRVG, mostrou-se com baixa adaptabilidade e estabilidade geral, revelando uma maior adaptabilidade em ambientes desfavoráveis.

O genótipo REF2, que é uma testemunha, obteve um ganho positivo em um maior número de locais, totalizando 13 ambientes, incluindo Marechal C. Rondon-PR, Maripá-PR, Pedrinhas Paulista-PR I, Campo Mourão-PR I, São Seb. da Moreira-PR I, Medianeira-PR II, Assis-PR, Bela V. do Paraíso-PR, Ibiporã-PR III, Pedrinhas Paulista-PR II, Sabáudia-PR, São Seb. da Moreira-PR II e Campo Mourão-PR II. No entanto, na análise de MHPRVG, ficou posicionado em sexto lugar, mostrando uma adaptabilidade e estabilidade abaixo do esperado em comparação com as linhagens Elites. Por outro lado, o genótipo REF3 obteve um ganho

positivo em 11 ambientes, incluindo Medianeira-PR I, Ubiratã-PR, Ibiporã-PR I, Campo Mourão-PR I, Corbélia-PR, Medianeira-PR II, Assis-PR, Pedrinhas Paulista-PR II, Sabáudia-PR, São Seb. da Moreira-PR II e Campo Mourão-PR II, e foi posicionado em quarto lugar na análise de adaptabilidade e estabilidade (MHPRVG), sendo considerado o peso mais significativo para comparação com as linhagens Elites.

Os genótipos EL1, EL2, EL4, EL9, EL10, EL6 e REF1 apresentaram ganho em um intervalo de 6 a 10 ambientes. No entanto, esses genótipos não obtiveram resultados expressivos na análise de adaptabilidade e estabilidade, o que indica que eles podem ser desconsiderados para o posicionamento na região REC 201 devido à sua baixa performance geral nos ambientes estudados.

No gráfico apresentado na Figura 7 é evidente a complexidade da seleção de genótipos em múltiplos ambientes, mesmo quando esses ambientes estão inseridos na mesma Região Edafoclimática, neste caso a REC 201. Esse gráfico de Interação G x A (genótipo x ambiente) reflete os resultados da Tabela 10, na qual cada ambiente corresponde às médias das safras agrícolas 2020/2021 e 2021/2022, enquanto o eixo y representa o G x A.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados da modelagem mista, foi possível identificar as linhagens EL8, EL5 e EL3 como promissoras para seleção em programas de melhoramento da cultura da soja, objetivando aumento quanto à produtividade de grãos. O uso dos modelos mistos demonstrou ser uma ferramenta eficaz na seleção de cultivares em multiambientes.

REFERÊNCIAS

- ALLARD, R.W.; BRADSHAW, A.D. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. **Crop Science**, Madison, v.4, n.1, p.503-507, 1964.
- ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. **Journal of Genetics and Breeding**, Berlin, v.46, n.1, p.269-269, 1992.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G.V. **Melhoramento de Plantas**. 6Ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 523p.
- CASAGRANDE, C.R.; MEZZOMO, H.C.; CRUZ, C.D.; BORÉM, A.; NARDINO, M. Choosing parent tropical wheat genotypes through genetic dissimilarity based on REML/BLUP. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v.20, n.3, p.1-10, 2020.

CONAB. Companhia nacional de abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira 2023**. Disponível em: '<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos>'. Acesso em: 07 jun. 2023.

COSTA, L.C.; TAVANTI, R.F.R.; TAVANTI, T.R.; PEREIRA, C.S. Desenvolvimento de cultivares de soja após inoculação de estirpes de *Bacillus subtilis*. **Nativa**, Sinop, v.7, n.2, p.126-132, 2019.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa da Soja. **Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja - Terceira Aproximação -2000/01.**, Londrina: EMBRAPA, 2012. 69p. (Documento 330)

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Mapa de Precipitação Acumulada 2020**. Disponível em: '<https://tempo.inmet.gov.br/PrecAcumulada>'. Acesso em: 10 jul. 2024.

LÚCIO, A.D.; STORCK, L.; BANZATTO, D.A. Classificação dos experimentos de competição de cultivares quanto a sua precisão. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.5, n.1, p.99-103, 1999.

NARDINO, M.; BARETTA, D.; CARVALHO, I. R.; FOLLMANN, D. N.; FERRARI, M.; de PELEGRIN, A. J.; de Souza, V. Q. Divergência genética entre genótipos de milho (*Zea mays* L.) em ambientes distintos. **Revista de Ciências Agrárias**, Vila Real, v.40, n.6, p.164-174, 2017.

PIMENTEL, A.J.B.; GUIMARÃES, J.F.R.; SOUZA, M.A.; RESENDE, M.D.V.; MOURA, L.M.; RIBEIRO, G. Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.11, p.882-890, 2014.

RESENDE, M.D.V. **Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético**. Colombo: Embrapa, 2007. 561p.

RESENDE, M.D.V. **Métodos Estatísticos Ótimos na Análise de Experimentos de Campo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 57 p. (Documento 100).

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

WRIGHT, J.W.; PAULEY, S.S.; POLK, R.B.; JOKELA, J. J. Performance of Scotch pine varieties in North Central Region. **Silva e Genética**, Frankfurt, v.15, n.4, p.101-110, 1966.