



LUCAS MARTINS XAVIER

**VIABILIDADE DA SELEÇÃO PRECOCE PARA O PESO DE
MIL GRÃOS EM POPULAÇÕES SEGREGANTES DE SOJA**

**LAVRAS - MG
2026**

LUCAS MARTINS XAVIER

**VIABILIDADE DA SELEÇÃO PRECOCE PARA O PESO DE MIL GRÃOS EM
POPULAÇÕES SEGREGANTES DE SOJA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Mestrado Profissional em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

Dr. Guilherme Leite Dias Vilela
Coorientador

**LAVRAS- MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Xavier, Lucas Martins.

Viabilidade da seleção precoce para o peso de mil grãos em populações
segregantes de soja / Lucas Martins Xavier. - 2026.
39 p. : il.

Orientador: Adriano Teodoro Bruzi

Coorientador: Guilherme Leite Dias Vilela

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Produtividade. 2. Glycine max (L.) Merrill. 3. Melhoramento Vegetal. I.
Teodoro Bruzi, Adriano. II. Leite Dias Vilela, Guilherme. III. Universidade Federal de
Lavras. IV. Título.

LUCAS MARTINS XAVIER

**VIABILIDADE DA SELEÇÃO PRECOCE PARA O PESO DE MIL GRÃOS EM
POPULAÇÕES SEGREGANTES DE SOJA**

**FEASIBILITY OF EARLY SELECTION FOR THOUSAND-GRAIN WEIGHT IN
SEGREGATING SOYBEAN**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Mestrado Profissional em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31/03/ 2026

DSc.Nelson Júnior Dias Vilela

DSc. Luiz Silva Luz

INOVA GENÉTICA

UFV

Orientador

Prof. DSc. Adriano Teodoro Bruzi

LAVRAS – MG

2026

INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam impactos científicos e tecnológicos relacionados ao melhoramento genético da soja. A pesquisa contribui para o entendimento da relação entre os componentes do rendimento e a produtividade de grãos, demonstrando que a obtenção de genótipos superiores depende do equilíbrio entre diferentes caracteres agronômicos, e não da seleção isolada de um único componente.

As informações geradas podem auxiliar programas de melhoramento na escolha de genitores e na condução de populações segregantes, tornando o processo de seleção mais eficiente. Dessa forma, os resultados apresentam potencial de aplicação no desenvolvimento de cultivares de soja mais produtivas, contribuindo para o aumento da eficiência dos sistemas de produção.

O estudo foi realizado em parceria com a empresa Inova Genética LTDA, em Porto Nacional, Tocantins, promovendo interação entre a pesquisa acadêmica e o setor produtivo. O território relacionado ao estudo compreende a região do Cerrado brasileiro, com potencial benefício para pesquisadores, estudantes, empresas de melhoramento e produtores envolvidos na cadeia produtiva da soja.

Embora o trabalho não tenha envolvido ações extensionistas diretas, os conhecimentos gerados podem ser utilizados futuramente em atividades de transferência de tecnologia e capacitação de profissionais ligados ao melhoramento vegetal. Os impactos estão relacionados principalmente às áreas temáticas da Política Nacional de Extensão de Tecnologia e Produção (7), Meio Ambiente (5) e Trabalho (8).

A pesquisa apresenta alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente o ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável, por contribuir para estratégias de aumento da produtividade agrícola; o ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, pela geração de conhecimento aplicado à inovação tecnológica; e o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, pelo desenvolvimento de estratégias que favorecem maior eficiência produtiva.

Os impactos gerados são principalmente científicos e tecnológicos, com resultados concretos na geração de conhecimento sobre a determinação da produtividade da soja e potencial de aplicação futura em programas de melhoramento genético e na cadeia produtiva da cultura.

IMPACT INDICATORS

The results obtained in this study present scientific and technological impacts related to soybean genetic improvement. The research contributes to understanding the relationship between yield components and grain yield, demonstrating that the development of superior genotypes depends on the balance among different agronomic traits rather than the selection of a single component.

The information generated may support breeding programs in parent selection and the development of segregating populations, increasing the efficiency of selection processes. Thus, the results have potential application in the development of higher-yielding soybean cultivars, contributing to more efficient production systems.

The study was conducted in partnership with Inova Genética LTDA, located in Porto Nacional, Tocantins, Brazil, promoting interaction between academic research and the productive sector. The territory associated with the study comprises the Brazilian Cerrado region, with potential benefits for researchers, students, breeding companies, and professionals involved in the soybean production chain.

Although the study did not include direct extension activities, the knowledge generated may be used in future technology transfer actions and training activities for professionals involved in plant breeding. The impacts are mainly related to the thematic areas of the National Extension Policy: Technology and Production (7), due to the generation of applied knowledge in plant breeding; Environment (5), by contributing to more efficient agricultural systems; and Work (8), by supporting the soybean production chain.

The research is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 2 – Zero Hunger and Sustainable Agriculture, by contributing to strategies for increasing agricultural productivity; SDG 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, through the generation of knowledge applied to technological innovation; and SDG 12 – Responsible Consumption and Production, by supporting strategies that promote greater efficiency in agricultural production.

The impacts generated by this research are primarily scientific and technological, with concrete contributions to the understanding of soybean yield determination and potential applications in genetic improvement programs and the soybean production chain.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e força e por, mesmo nos momentos de incerteza, ter me mantido focado.

Ao meu pai, Orlando Alves Xavier Filho, pelo apoio, pelos conselhos, pela confiança e por todo o amor que me proporcionou ao longo dessa caminhada.

À minha mãe, Terezinha de Fátima Martins Xavier, pelo carinho, incentivo, dedicação e por sempre acreditar em mim.

À minha esposa, Erica Gaia, pela confiança, amor, paciência, conselhos e por ser minha companheira em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Adriano Teodoro Bruzi, pelos ensinamentos acadêmicos e de vida, pela orientação e por toda a confiança transmitida.

Ao meu coorientador, Prof. Guilherme Vilela, pela disponibilidade, contribuições, apoio e aprendizados compartilhados durante o desenvolvimento do trabalho.

À equipe da Inova Genética, que me ajudou desde o início, pela parceria, colaboração e por contribuir direta e indiretamente para minha formação. Em especial, a Anderson Dona, Arthur Tavares e Luiz Luz, pelo suporte, colaboração, paciência e incentivo em todas as etapas.

À empresa Inova Genética, por proporcionar a oportunidade de realizar o curso e por todo o apoio oferecido ao longo desse período.

Por fim, agradeço a todos que se fizeram presentes e contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho e para minha jornada acadêmica.

Muito obrigado!

RESUMO

A produtividade de grãos em soja é um caráter quantitativo complexo, determinado pela interação entre diferentes componentes do rendimento, como o peso de mil grãos, o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem. Com a hipótese de que o uso de genitores com elevado peso de mil grãos em cruzamentos pode influenciar positivamente a expressão desse caráter e componentes de produção em populações segregantes; o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade de grãos e a contribuição de seus principais componentes em populações de soja oriundas de cruzamentos entre genitores com diferentes níveis de peso de mil grãos. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Inova Genética LTDA em Porto Nacional, Tocantins, em delineamento experimental de blocos casualizados com 4 repetições, incluindo testemunhas comerciais. As populações segregantes foram classificadas de acordo com o tipo de cruzamento (alto $\times$ alto, alto $\times$ médio e alto $\times$ baixo). Foram avaliadas as variáveis peso de mil grãos, produtividade de grãos, o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem. As análises incluíram comparação de médias entre grupos, estimativas de parâmetros genéticos de variâncias e herdabilidade, análise de correlação de Pearson e análise geométrica da contribuição relativa dos componentes do rendimento. Os resultados demonstraram que o tipo de cruzamento influenciou significativamente o peso de mil grãos e a produtividade de grãos, com tendência de redução do peso de mil grãos à medida que diminui o valor médio dos genitores. No entanto, o peso de mil grãos apresentou baixa herdabilidade, evidenciando forte influência ambiental. Em contraste, número de vagens por planta e o número de grãos por vagem apresentaram elevadas herdabilidades, indicando maior controle genético. A análise de correlação revelou baixa associação entre peso de mil grãos e produtividade, enquanto o número de grãos apresentou maior relação com o rendimento. A análise geométrica evidenciou que os genótipos superiores apresentam equilíbrio entre os componentes do rendimento, e não a maximização isolada de um único caráter, indicando a ocorrência de mecanismos compensatórios. Conclui-se que a produtividade de grãos em soja é determinada mais pelo equilíbrio entre componentes. Dentre as dez primeiras populações mais produtivas, seis são oriundas de cruzamentos de genitores de alto peso de mil grãos com médio peso de mil grãos. Os resultados contribuem para o entendimento da arquitetura do rendimento e auxiliam na definição de estratégias mais eficientes em programas de melhoramento genético de soja.

Palavras-chave: Produtividade; *Glycine max* (L.) Merrill; Melhoramento Vegetal.

ABSTRACT

Grain yield in soybean is a complex quantitative trait determined by the interaction among different yield components, such as thousand grain weight, number of pods per plant, and number of grains per pod. Based on the hypothesis that the use of parents with high thousand grain weight in crosses may positively influence the expression of this trait and yield components in segregating populations, the objective of this study was to evaluate grain yield and the contribution of its main components in soybean populations derived from crosses between parents with different levels of thousand grain weight. The experiment was conducted at the Experimental Station of Inova Genética LTDA, located in Porto Nacional, Tocantins, Brazil, using an experimental design suitable for evaluating segregating populations, including commercial checks. The segregating populations were classified according to the type of cross (high $\times$ high, high $\times$ medium, and high $\times$ low). The evaluated traits were thousand grain weight, grain yield, number of pods per plant, and number of grains per pod. The analyses included comparison of means among groups, estimation of genetic parameters (variance components and heritability), Pearson correlation analysis, and geometric analysis of the relative contribution of yield components. The results showed that the type of cross significantly influenced thousand grain weight and grain yield, with a decreasing trend in thousand grain weight as the average value of the parents decreased. However, thousand grain weight exhibited low heritability, indicating strong environmental influence. In contrast, the number of pods per plant and number of grains per pod showed high heritability, indicating greater genetic control. Correlation analysis revealed a weak association between thousand grain weight and grain yield, whereas the number of grains showed a stronger relationship with yield. The geometric analysis indicated that superior genotypes present a balance among yield components rather than the maximization of a single trait, suggesting the occurrence of compensatory mechanisms. It is concluded that soybean grain yield is determined primarily by the balance among its yield components. Among the ten highest-yielding populations, six originate from crosses between parents with high thousand-grain weight (TGW) and medium thousand-grain weight. These results contribute to understanding yield architecture and help define more efficient strategies in soybean breeding programs.

Keywords: Grain yield; Glycine max (L.) Merrill; Plant breeding.

SUMÁRIO

1	ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVA.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Botânica e fenologia da soja.....	12
2.2	Panorama da produção de soja	13
2.3	Melhoramento genético	15
2.3.1	Cruzamentos	15
2.3.2	Semente de soja	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Classificação climática.....	18
3.2	Seleção dos genitores	18
3.3	Condução do bloco de cruzamentos	19
3.4	Obtenção e condução da geração F ₁	20
3.4.1	Condução e confirmação da geração F ₂	20
3.4.2	Condução e avaliação da geração F ₃	21
3.5	Análise estatística dos dados	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5	CONCLUSÕES.....	32
6	PROJETO TÉCNICO ATRELADO	33
	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	35

1 ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVA

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura de importância global e uma das mais cultivadas em todo o mundo. O Brasil se destaca como o maior produtor mundial, com a produção de soja na safra 2025/26 estimada em um recorde de 180 milhões de toneladas (USDA, 2026). O relatório do USDA de março de 2026 confirmou essa projeção, destacando uma produtividade esperada de 3,64 toneladas por hectare. Além disso, a safra 2024/25 foi revisada para 171,5 milhões de toneladas (USDA, 2026). Esses indicadores refletem significativamente na economia nacional, consolidando ainda mais a soja como uma das principais culturas do país.

A soja é uma leguminosa rica em óleo, proteína e carboidratos, sendo amplamente utilizada na alimentação animal e fornece óleo vegetal e proteína para consumo humano (Hu *et al.*, 2023). Aproximadamente 70% do óleo de cozinha e metade da proteína para rações animais são derivados da soja (Duan *et al.*, 2023). Nesse cenário, o Brasil também se destaca como o maior exportador de soja e o segundo maior exportador de farelo e óleo de soja globalmente, exportando 70% de sua produção (Ali *et al.*, 2022).

Devido à alta demanda pela cultura, o melhoramento de plantas tem como objetivo principal o lançamento de cultivares cada vez mais produtivas. A seleção fenotípica é uma etapa crucial em programas de melhoramento comercial, onde o melhorista observa os fenótipos para selecionar características desejáveis com o objetivo de melhorar geneticamente as características-alvo (Kaler *et al.*, 2022).

A produtividade é alavancada, entre outros aspectos, pela qualidade do grão e pelo Peso de Mil Grãos (PMG). A produção de grãos na soja é um caráter de baixa herdabilidade, influenciado por muitos genes, o que permite maior influência ambiental (Rossmann, 2011). O tamanho do grão é uma característica quantitativa complexa, influenciada por fatores genéticos e ambientais durante o desenvolvimento (Duan *et al.*, 2023).

Aumentar a produtividade da soja, bem como melhorar a qualidade das sementes, é de grande importância. O peso e tamanho da semente, o teor de óleo e o teor de proteína são as três principais características que determinam a qualidade da semente, sendo que o peso da semente também influencia a produtividade. (Hu *et al.*, 2023)

A hipótese desta pesquisa considera que o cruzamento entre cultivares elite masculinas de soja com alto PMG e três grupos distintos de cultivares fêmeas resultará em progênie que poderão expressar alto PMG. Espera-se que a combinação de características genéticas das

cultivares elite masculinas com aquelas dos grupos de cultivares fêmeas permita a obtenção de progênes com desempenho superior em termos de PMG, contribuindo para a seleção de genótipos mais produtivos e adaptados às condições de cultivo.

Nesse contexto, o objetivo é avaliar o desempenho produtivo e a contribuição dos componentes do rendimento, com ênfase no peso de mil grãos, em populações de soja obtidas a partir do cruzamento de genitores elite com diferentes níveis médios de PMG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Botânica e fenologia da soja

A soja cultivada é uma planta autógama, diploide $2n = 4x = 40$, taxonomicamente pertence à família Fabaceae, subfamília Papilionoideae, tribo Phaseoleae, gênero *Glycine* e espécie *Glycine max* (L.) Merrill (EMBRAPA, 2021). É originária do Leste da Ásia, mais precisamente do nordeste da China (Silva *et al.*, 2022).

O sistema radicular da soja é composto por uma raiz principal axial e por raízes secundárias. O caule é herbáceo, ereto, pubescente e ramificado. Durante o crescimento e desenvolvimento da planta de soja, três tipos de folhas são observados: as folhas cotiledonares, que são as iniciais; as folhas unifolioladas, que surgem no início do desenvolvimento; e as folhas trifolioladas, que aparecem logo após as unifolioladas (Tejo; Fernandes; Buratto, 2019).

As flores da soja desenvolvem-se em racemos axilares ou terminais, nelas estão localizadas as partes masculinas e femininas: um pistilo único e em sua volta o androceu formado por dez estames com as anteras nas suas extremidades, protegidos pela corola e pelo cálice (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010; Silva *et al.*, 2022).

Resultante do desenvolvimento do ovário, o fruto da soja é do tipo legume, comumente chamado de vagem, que pode conter de uma a cinco sementes, com a maioria das cultivares apresentando de duas a três sementes (Silva *et al.*, 2022).

A germinação da semente soja é relativamente rápida, desde que em condições favoráveis. A radícula é a primeira estrutura do embrião a romper o tegumento, ocorrendo de um a dois dias após a semeadura. O desenvolvimento de raízes primárias se dá entre quatro a cinco dias após a semeadura. Segue-se o desenvolvimento da plântula com o alongamento do hipocótilo até que ocorra a emergência (Câmara, 2006).

De modo que o primeiro estágio fenológico “VE”, é representado pela emergência dos cotilédones, seguido de “VC”, em que os cotilédones se encontram abertos e expandidos. A partir de “VC”, os estádios vegetativos são numerados sequencialmente precedidos de “V” onde a numeração indica o número de nós, com folhas totalmente desenvolvidas. Os estádios reprodutivos são denominados pela letra “R” seguida da numeração progressiva de um a oito, que descrevem o período de florescimento até a maturação na Tabela 1 encontra-se a descrição de cada estágio fenológico da cultura (EMBRAPA, 2007).

Tabela 1 – Fenologia da cultura da soja.

Estádio	Denominação	Descrição
VE	emergência	cotilédones acima da superfície do solo
VC	cotilédone	cotilédones completamente abertos
V1	primeiro nó	folhas unifolioladas completamente desenvolvidas
V2	segundo nó	primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V3	terceiro nó	segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
V4	quarto nó	terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V5	quinto nó	quarta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V6	sexto nó	quinta folha trifoliolada completamente desenvolvida
Vn	enésimo nó	enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida
R1	início do florescimento	uma flora aberta em qualquer nó do caule
R2	florescimento pleno	uma flor aberta num dos dois últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R3	início da formação da vagem	vagem com 5 mm de comprimento num dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R4	vagem desenvolvida	vagem com 2 cm de comprimento num dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R5	início do enchimento do grão	grão com 3 mm de comprimento em vagem num dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R6	grão cheio ou completo	vagem contendo grão verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos quatro últimos nós do caule
R7	início da maturação	uma vagem normal no caule com coloração de madura
R8	maturação plena	maturação plena 95% das vagens com coloração de madura

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2007).

2.2 Panorama da produção de soja

Na safra 2023/2024, a cultura da soja ocupou mundialmente 138,00 milhões de hectares, com produtividade de 2,80 toneladas/ha e produção total de 382,00 milhões de toneladas. Os principais produtores mundiais na mesma safra foram Brasil, com 165,00 milhões de toneladas, Estados Unidos da América (118,00 milhões de toneladas) e Argentina (26,00 milhões de toneladas). O Brasil também ocupa a primeira colocação em área cultivada, seguido pelos EUA e Argentina. No que se refere à produtividade, a Turquia lidera com 4,20 toneladas por hectare, seguida por Brasil e EUA. Detalhamentos podem ser observados na Tabela 2 (USDA, 2025).

Tabela 2 – Dados de áreas, produtividade e produção mundial de soja safra 2023/24.

Ranking	País	Estimativa
Área (milhões de hectare)		
1 °	Brasil	45,00
2 °	EUA	35,00
3 °	Argentina	15,00
4 °	Índia	13,50
5 °	China	10,50
Produtividade (toneladas por hectare)		
1 °	Turquia	4,20
2 °	Brasil	3,75
3 °	EUA	3,40
4 °	Canadá	3,15
5 °	Paraguai	2,85
Produção (milhões de toneladas)		
1 °	Brasil	165,00
2 °	EUA	118,00
3 °	Argentina	26,00
4 °	China	21,00
5 °	Índia	13,00

Fonte: Adaptado de USDA (2025).

Como maior produtor mundial na safra 2024/25, o Brasil possui áreas de cultivo de soja distribuídas em todo o país. No entanto, a maior concentração está na região Centro-Oeste, que foi responsável por 50,49% da produção nacional em 46,54% da área de cultivo de soja nacional (Tabela 3) (CONAB, 2025).

Tabela 3 – Dados de áreas, produtividade e produção brasileira de soja safra 2024/25.

Região	Área (milhões de hectare)	Área (%)	Produção (milhões de toneladas)	Produção (%)	Produtividade (kg/ha)
Norte	3.701,60	7,82	13.087,20	7,63	3.535,55
Nordeste	4.679,50	9,88	17.514,80	10,21	3.742,88
Centro-Oeste	22.035,20	46,54	86.578,30	50,49	3.929,09
Sudeste	3.672,50	7,76	14.463,90	8,44	3.938,43
Sul	13.261,80	28,01	39.828,10	23,23	3.003,22
Brasil	47.350,60	100,00	171.472,30	100,00	3.621,33

Fonte: Adaptado de CONAB (2025).

2.3 Melhoramento genético

O Melhoramento Genético Vegetal é aplicação de técnica visando capitalizar o máximo potencial genético. Para Bernardo (2020) o Melhoramento de Plantas é a ciência, arte e negócio de melhorar plantas para benefícios humanos.

O objetivo do esperado determina a direção de qualquer programa de melhoramento. O melhorista deve ter definido o que busca no programa para aprimorar uma ou mais características, para a cultura da soja características de importância são a produtividade de grãos, maturidade, resistência a pragas, doenças, ao acamamento, a quebra, qualidade e composição do grão, além de perspectivas futuras que surgem a partir de demandas de mercado e novos objetivos (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010).

O interesse comercial na cultura da soja foi maior difundido a partir da segunda década do século XX, quando os EUA iniciaram sua exploração como adubo verde, forrageira e posteriormente como grão. Há registros de estudos de soja no Brasil ainda no século XIX, Faculdade de Agronomia de Cruz das Almas e posteriormente o Instituto Agrônomo de Campinas (Gazzoni; Dall'agnol, 2018). Mas foi no Rio Grande Sul que o cultivo comercial teve início, por volta de 1935 (Silva *et al.*, 2022).

Os programas de melhoramento de soja brasileiros são relativamente recentes, com as primeiras introduções de germoplasmas vindas dos EUA na década de 1940, e sendo a pesquisa fitotécnica no melhoramento genético da cultura que impulsionou a expansão no território nacional (Santos *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022).

2.3.1 Cruzamentos

O cruzamento da cultura da soja demanda ferramentas simples, sendo necessário pinças de qualidade e materiais para identificação, porém a execução é mais complexa. A flor é típica de leguminosa, possuindo cálice com cinco sépalas, corola composta de cinco pétalas que envolvem um pistilo único e em sua volta o androceu formado por dez estames com as anteras nas suas extremidades, naturalmente o pólen é liberado diretamente sobre o estigma, resultando em autopolinização (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010).

Na soja a autogamia é favorecida pela cleistogamia, processo no qual os grãos de pólen atingem a maturidade e polinizam o estigma antes da abertura do botão floral (Borém; Miranda; Fritsche-Neto, 2021). Devido a esse processo, quando deseja-se realizar o cruzamento é

necessário realizar a emasculação. A flor deve ser preparada, onde são selecionados os botões florais que se encontram inchados e a corola visível através do cálice. Após esse preparo a polinização deverá ser realizada o mais rápido possível. Aquelas flores que estiverem prestes a abrir foram selecionadas como doadoras de pólen (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010).

Um dos aspectos primordiais antes mesmos dos cruzamentos são as escolhas dos parentais. Inicialmente o melhorista identifica quais mudanças são necessárias em uma determinada linhagem para alcançar o ganho buscado. Sendo o próximo passo a seleção dos parentais de fato (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010).

A seleção de parentais para o cruzamento requer expertise do melhorista, tendo em vista que apenas o desempenho fenotípico por si só nem sempre fornece informações adequadas para fins de melhoramento. Estudos de capacidade de combinação fornecem um entendimento para selecionar parentais de elite e combinações cruzadas desejáveis para melhoramento mais focado nos objetivos (Maphosa *et al.*, 2012).

A busca dos parentais pode ser realizada em coleções nacionais e internacionais de germoplasma, acordos de transferência de materiais e o uso de linhagens experimentais dentro dos atuais programas de melhoramento (Bilyeu; Ratnaparkhe; Kole, 2010).

2.3.2 Semente de soja

O peso das sementes no reino vegetal demonstra ampla variação, mas apresenta variação restrita dentro de cada espécie. O peso e o tamanho das sementes desempenham papéis fundamentais na aptidão e adaptação das plantas ao ambiente, como modo de dispersão, altura da planta, área foliar e tolerância ao estresse. Mas também na determinação da produtividade, o peso das sementes está correlacionado com o número de sementes, e ambos influenciam a produtividade (Hu *et al.*, 2023).

A semente é um dos principais insumos para a agricultura, sendo sua qualidade fisiológica um fator determinante para o processo agrícola (Camozzato *et al.*, 2009; Scheeren *et al.*, 2010). As sementes de soja das cultivares modernas contêm aproximadamente 17% de óleo (variando de 8,3 a 27,9%), 35% de proteína (variando de 34,1 a 56,8%), 31% de carboidratos, 13% de umidade e 4% de cinzas (Duan *et al.*, 2023).

O tamanho da semente, o teor de óleo e proteína são características quantitativas complexas governadas por múltiplos genes (Duan *et al.*, 2023). Dentre algumas das métricas correlacionadas a semente o PMS (Peso de mil sementes) na cultura da soja é uma estimativa

para o cálculo da quantidade de quilos de sementes necessários para a semeadura de lavouras. O PMG/PMS da soja, geralmente, é de 140 g a 220 g a cada 1000 grãos ou sementes (AEGRO, 2019).

Questões ambientais diversas influenciam no desempenho das plantas, dos elementos climáticos, a temperatura, fotoperíodo e a disponibilidade hídrica são os que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade (EMBRAPA, 2007).

Duan *et al.* (2023) relatam que o tamanho do grão é determinado pelos sinais integrados dos tecidos materno e zigótico que influenciam o crescimento coordenado do embrião, endosperma e tegumento. Pois o embrião e o endosperma são gerados a partir da célula-ovo fertilizada e da célula central.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Classificação climática

O estudo foi conduzido na estação experimental da Inova Genética no município de Porto Nacional, estado do Tocantins, Brasil, situado nas coordenadas geográficas 10°50'20" S e 48°21'44" W, a uma altitude média de 235 m em relação ao nível do mar, em área de relevo plano pertencente à bacia hidrográfica do rio Tocantins. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo **Aw** (clima tropical de savana, com estação seca de inverno), caracterizado por temperaturas médias anuais elevadas (em torno de 26–27 °C) e precipitação pluviométrica concentrada no período de outubro a abril, com estação seca bem definida entre maio e setembro, totalizando precipitação anual média entre 1.500 e 1.800 mm. A vegetação nativa predominante na região é o Cerrado.

3.2 Seleção dos genitores

Para realizar este trabalho, foram utilizadas quatro cultivares elite com peso de mil grãos elevado e média de 199,7 g, variando entre 188 g e 210 g. Essas cultivares foram utilizadas como genitores masculino e hibridadas com três grupos de genitores feminino conforme descrição a seguir:

- O primeiro grupo de genitores feminino contém cinco cultivares de PMG alto, com média de 185,6 g, variando entre 181 g e 210 g.
- O segundo grupo é composto por cinco cultivares de PMG médio, com média de 163,4 g, variando entre 160 g e 168 g.
- O terceiro grupo inclui cinco cultivares de PMG baixo, com média de 147,4 g, variando entre 132 g e 156 g.

O total de 60 cruzamentos é exposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição das cultivares utilizadas.

Bloco	Linhagem	PMG (g)	PMS
Macho	ST 580 I2X	210	Alto
Macho	NEO 820 IPRO	210	Alto
Macho	CZ 26B47 I2X	191	Alto
Macho	CZ 37B66 I2X	188	Alto
Média	-	199,7	-
Fêmea I	NEO 710 IPRO	192	Alto
Fêmea I	ATAQUE I2X	186	Alto
Fêmea I	NEO761 I2X	186	Alto
Fêmea I	SPARTA I2X	183	Alto
Fêmea I	OLIMPO IPRO	181	Alto
Média	-	185,6	-
Fêmea II	NEO 790 IPRO	168	Médio
Fêmea II	CZ 37B60	164	Médio
Fêmea II	NEO 800 I2X	163	Médio
Fêmea II	NEO 810 I2X	162	Médio
Fêmea II	HO AMANBAY	160	Médio
Média	-	163,4	-
Fêmea III	FIBRA IPRO	156	Baixo
Fêmea III	NEXUS I2X	154	Baixo
Fêmea III	ST 631 I2X	148	Baixo
Fêmea III	CZ 58B23 I2X	147	Baixo
Fêmea III	POTENT I2X	132	Baixo
Média	-	147,4	-

Fonte: Do autor (2024)

3.3 Condução do bloco de cruzamentos

O bloco de cruzamentos foi conduzido em vasos, em casa de vegetação. Para cada material genético foram realizadas quatro épocas de semeadura, de modo a evitar a perda de sincronismo de florescimento entre os genitores no momento dos cruzamentos, uma vez que as cultivares utilizadas pertenciam a grupos de maturação distintos.

Os cruzamentos foram realizados a partir de flores recém-abertas coletadas do genitor masculino, as quais foram acondicionadas em recipientes contendo sílica, cada genitor em recipiente separado, a fim de preservar as estruturas florais e manter a viabilidade do pólen até a hibridação. Em seguida, as flores foram levadas até os vasos contendo os genitores femininos.

A seleção do botão floral da planta feminina priorizou botões próximos à antese, aproximadamente um a dois dias antes da abertura da flor. Para a realização do cruzamento, o botão foi submetido à emasculação: com auxílio de pinça, removeram-se cuidadosamente as sépalas, pétalas e anteras, preservando-se o estigma e o pistilo.

Após a emasculação, as anteras do genitor masculino foram postas em contato com o estigma da flor feminina, realizando-se a polinização manual. Cada cruzamento foi identificado por meio de etiqueta contendo a data de realização e os genitores envolvidos, assegurando a rastreabilidade do processo.

Após a formação das vagens, procedeu-se a uma vistoria visual para confirmação do cruzamento, sendo a ausência de sépalas utilizada como indicativo de que a vagem originou-se de uma flor emasculada, confirmando sua origem em cruzamento artificial. A colheita foi realizada individualmente para cada cruzamento, sendo que cada planta feminina recebeu pólen de apenas um genitor masculino por vez, podendo esse pólen ser proveniente de diferentes plantas, desde que pertencentes ao mesmo genitor.

3.4 Obtenção e condução da geração F₁

Após a colheita, quantificou-se o número de sementes F₁ obtidas em cada cruzamento. O plantio da geração F₁ foi realizado em bandejas, com uma semente por célula, permanecendo as bandejas em casa de vegetação por 10 dias. Decorrido esse período, as plântulas foram transplantadas para o campo, em covas.

Cada cova recebeu uma plântula sendo identificada com etiqueta contendo a sequência de identificação e os dados do cruzamento de origem. O plantio seguiu ordem sequencial, com a alocação completa das covas de um cruzamento antecedendo o início do plantio das covas do cruzamento seguinte. A condução dessa geração foi em campo, em área sob irrigação por pivô central, adotando-se os tratos culturais padrão até a colheita.

Durante o período de florescimento foi feita a avaliação da cor da flor e cor da pubescência para verificação de possíveis autofecundações.

Após a colheita das plantas F₁, a trilha foi realizada em trilhadora de planta individual, mantendo-se cada planta individualizada a fim de evitar contaminações decorrentes de autofecundações ou erros de plantio.

3.4.1 Condução e confirmação da geração F₂

Com base no número de plantas obtidas em cada cruzamento, elaborou-se o caderno de plantio da geração F₂, no qual cada planta recebeu identificação única de parcela. O plantio foi realizado diretamente no campo, com auxílio de semeadora mecanizada com kit de plantio de

parcelas experimentais, cujas câmaras de espera e de plantio são acionadas por pistões a ar. As parcelas foram constituídas por duas linhas de dois metros de comprimento.

Após o florescimento, a confirmação dos cruzamentos foi realizada por meio da observação da segregação de caracteres qualitativos como: cor da flor e cor da pubescência. Nessa etapa também é possível observar a presença de outros tipos de segregação (altura da planta, maturação e tipo de crescimento), indicando origem híbrida da parcela, ao passo que sua ausência, mesmo havendo contraste entre os genitores para esses caracteres, sugeria a possibilidade de autofecundação. Nos casos em que os genitores compartilhavam a mesma cor de flor, pubescência e maturação, realizou-se amostragem da parcela para confirmação do cruzamento por meio de análise molecular.

Confirmadas, as parcelas foram conduzidas até a colheita, sendo então trilhadas em bulk por cruzamento, com as sementes de uma mesma origem misturadas para formar amostra homogênea e representativa da população.

3.4.2 Condução e avaliação da geração F₃

O plantio da geração F₃ foi realizado em área irrigada, no mês de julho, com auxílio da mesma semeadora utilizada na geração anterior. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), com parcelas constituídas por quatro linhas de cinco metros de comprimento e quatro repetições por população, utilizando-se os genitores de cada cruzamento como testemunhas.

Durante o desenvolvimento vegetativo não foram realizadas avaliações qualitativas. Próximo à colheita, três plantas por parcela foram coletadas nas linhas laterais para a avaliação das seguintes variáveis:

- Número médio de vagens por planta (NVP): contagem total de vagens viáveis por planta;
- Número médio de grãos por vagem (NGV): obtido pela relação entre o número total de grãos e o número total de vagens.

A colheita foi realizada com o auxílio de roçadora costal motorizada a partir das duas linhas centrais de cada parcela, seguida de trilha com o auxílio de trilhadora de parcelas. Os materiais com umidade superior a 14% foram encaminhados ao secador até atingirem a

umidade adequada para armazenamento. Em seguida, avaliou-se a produtividade de grãos, em kg ha^{-1} (PRO), a partir da pesagem e determinação da umidade final dos grãos.

Com os grãos em umidade padronizada, estimou-se o peso de mil grãos (PMG) por meio da contagem e pesagem de 1.000 grãos por amostra. Dessa forma, foram obtidas quatro variáveis-resposta: número médio de vagens por planta, número médio de grãos por vagem, produtividade de grãos e peso de mil grãos.

3.5 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos para as quatro variáveis-resposta (PMG, PRO, NVP e NGV) foram submetidos à análise de variância (ANOVA), de acordo com o delineamento em blocos casualizados (DBC) adotado na geração F3, considerando os efeitos de população/cruzamento e de bloco (repetição), tendo os genitores de cada cruzamento sido incluídos como testemunhas comuns às análises. As análises estatísticas foram realizadas em ambiente estatístico R, adotando-se nível de significância de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

Para a comparação entre as médias dos diferentes tipos de cruzamento (alto $\times$ alto, alto $\times$ médio e alto $\times$ baixo) e destes com as testemunhas, foi aplicado o teste t de Student, realizado par a par entre os grupos, considerando os respectivos graus de liberdade e o nível de significância de 5%.

Os componentes de variância foram estimados com base nos quadrados médios esperados da análise de variância, obtendo-se a variância genética entre populações (σ_g^2) e a variância residual (σ_e^2). Por se tratar de famílias segregantes derivadas de plantas F2 (gerações F2:3), a variância genética aditiva (σ_A^2) foi estimada por $\sigma_A^2 = 4 \cdot \sigma_g^2$, conforme metodologia usual para a genética quantitativa de caracteres poligênicos em espécies autógamas (Ramalho *et al.*, 2012). Com base nesses componentes, foram calculadas a herdabilidade no sentido amplo ($H^2 = \sigma_g^2/\sigma_f^2$) e a herdabilidade no sentido restrito ($h^2 = \sigma_A^2/\sigma_f^2$), sendo σ_f^2 a variância fenotípica média das parcelas, além do coeficiente de variação experimental (CV%), obtido pela razão entre o desvio-padrão residual e a média geral de cada caráter.

A associação entre os caracteres PMG, PRO, NVP e NGV foi avaliada por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson (r), tendo a significância de cada estimativa sido testada pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade.

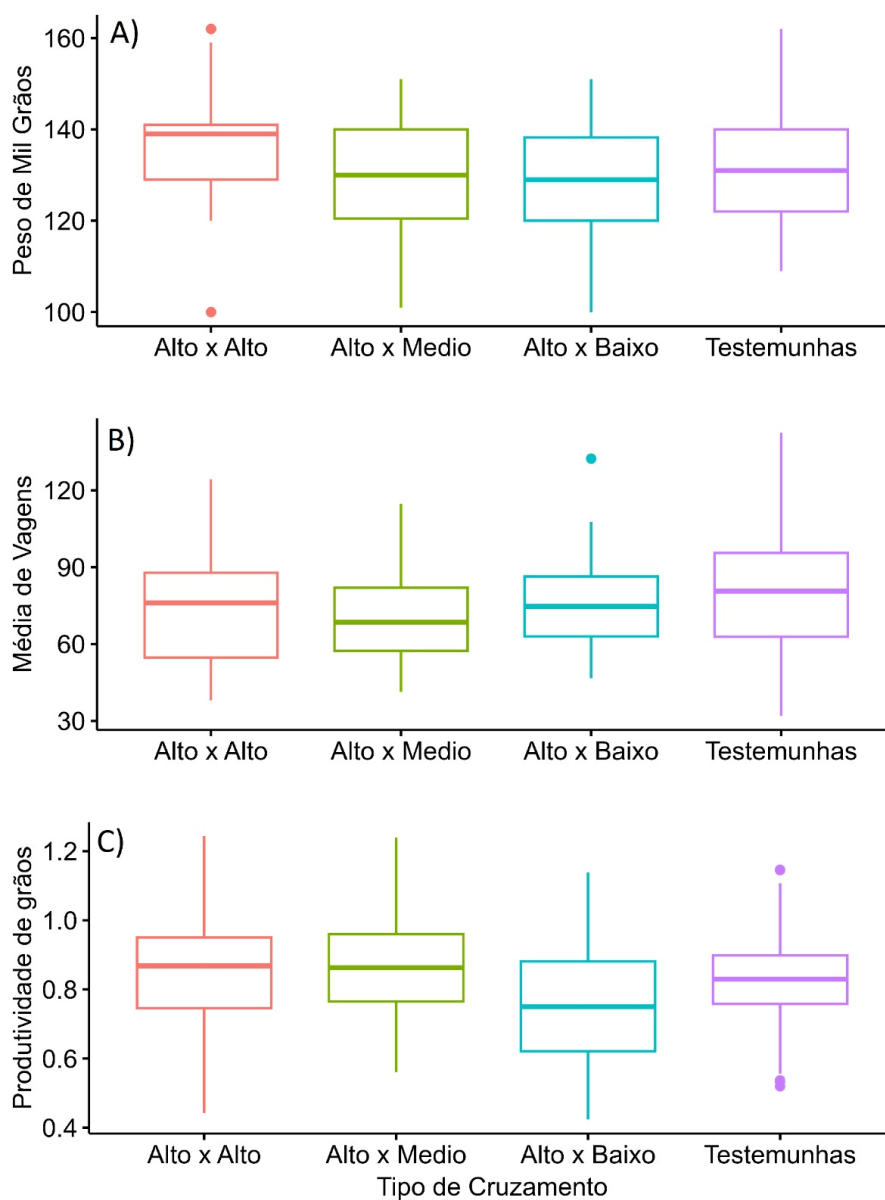
Complementarmente, foi realizada uma análise geométrica proposta por Grafius (1964) da contribuição relativa dos componentes do rendimento (PMG, NVP e NGV) para cada

genótipo avaliado. Os valores de cada componente foram padronizados em proporção relativa, de modo que a soma das contribuições dos três componentes totalizasse 100% para cada genótipo, sendo os resultados representados em gráfico de coordenadas ternárias. Essa representação permitiu avaliar, entre os genótipos de melhor desempenho produtivo, o grau de equilíbrio ou de predominância entre os componentes do rendimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o tipo de cruzamento exerceu influência nas médias de PMG (Figura 1 A), NVP (Figura 1 B), e PRO (Figura 1 C) das populações segregantes. De modo geral, observou-se um padrão consistente entre as combinações parentais alto x alto para peso de mil grãos, média de vagens por planta e produtividade de grãos. Esse comportamento indica um gradiente fenotípico associado ao valor médio dos genitores utilizados nos cruzamentos.

Figura 1 – Valores médios de peso de mil grãos, média de vagens e peso.



Fonte: Do autor (2026).

Para o caráter PMG, observou-se diferença significativa entre os grupos de cruzamento alto x alto e alto x médio, bem como entre alto x alto e alto x baixo, indicando que a redução do valor médio dos genitores utilizados nos cruzamentos resultou em diminuição significativa do peso médio dos grãos nas populações avaliadas (Tabela 5). Além disso, também foi observada diferença significativa entre os cruzamentos alto × médio e alto × baixo, reforçando a existência de um comportamento gradativo entre os tipos de combinação parental.

Tabela 5 – Comparação entre grupos para as variáveis PMG e Produtividade de grãos.

Variável	Grupo	Média Grupo	Comparação	Media Comparação	Diferença	t.test	GL	p-valor
PMG	Alto x Alto	136,22	Testemunhas	133,44	2,77	1,915	64	0,060
PMG	Alto x Médio	131,80	Testemunhas	133,44	-1,64	-1,198	70	0,235
PMG	Alto x Baixo	127,89	Testemunhas	133,44	-5,56	-3,900	69	0,000
PMG	Alto x Alto	136,22	Alto x Médio	131,80	4,41	-3,219	70	0,002
PMG	Alto x Alto	136,22	Alto x Baixo	127,89	8,33	-5,844	69	0,000
PMG	Alto x Médio	131,80	Alto x Baixo	127,89	3,92	-2,7481	69	0,008
PROD	Alto x Alto	0,85	Testemunhas	0,83	0,02	0,842	58	0,403
PROD	Alto x Médio	0,87	Testemunhas	0,83	0,04	2,060	64	0,043
PROD	Alto x Baixo	0,76	Testemunhas	0,83	-0,08	-3,818	65	0,000
PROD	Alto x Alto	0,85	Alto x Médio	0,87	-0,02	1,160	64	0,250
PROD	Alto x Alto	0,85	Alto x Baixo	0,76	0,09	-4,668	65	0,000
PROD	Alto x Médio	0,87	Alto x Baixo	0,76	0,11	-5,764	65	0,000

Fonte: Do autor (2026).

Muito embora o desempenho médio das populações tenha a tendência de refletir parcialmente o valor dos genitores utilizados nos cruzamentos, os resultados da Tabela 6 indicam que PMG apresentou baixa herdabilidade, com predominância da variância ambiental sobre a genética. Esse fator pode se dar devido à época de plantio do experimento que foi conduzido no mês de julho, fora das condições consideradas ideais para a região.

Plantios realizados a partir de janeiro no estado do Tocantins, podem ser altamente afetados pelo fotoperíodo e altas temperaturas, reduzindo o ciclo da cultura e consequentemente podendo afetar diretamente o enchimento de grãos, padrão sugere que, apesar da influência dos parentais, a expressão fenotípica do PMG é fortemente modulada por fatores ambientais. Os resultados indicam ainda, que ganhos genéticos menores são esperados, devido à menor influência genética dessa característica na variação fenotípica total (Silva *et al.*, 2022).

Tabela 6 – Componentes de variância e herdabilidade.

FV	σ_g^2	σ_e^2	σ_A^2	h^2	H^2	CV %
PMG	9,262	138,521	4,631	0,106	0,211	9,204
Produtividade de grãos	0,011	0,013	0,006	0,385	0,771	19,630
Média vargem	204,760	150,055	102,380	0,423	0,845	25,668
Média grão	1585,921	644,044	792,960	0,454	0,908	26,433

Fonte: Do autor (2026).

Nota: FV; fonte de variação. σ_g^2 ; variância genética. σ_e^2 ; variância residual. σ_A^2 ; variância genética aditiva. h^2 ; herdabilidade no sentido restrito. H^2 ; herdabilidade no sentido amplo. CV%; coeficiente de variação.

Por outro lado, os componentes número de vagens e número de grãos apresentaram elevadas herdabilidades, indicando maior controle genético e maior potencial de resposta à seleção. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que descreve a produtividade e seus componentes como caracteres quantitativos complexos, influenciados tanto por fatores genéticos quanto ambientais (Tayade *et al.*, 2023). Silva *et al.* (2022) ao avaliarem progênies ($F_{3:4}$ e $F_{3:5}$) de soja obtiveram resultado similar de herdabilidade para produtividade de grãos (50,14%). Gastl Filho *et al.* (2022) obteve herdabilidade de 59,67% para mesma característica ao avaliar 52 progênies ($F_{3:4}$), indicando que os resultados de herdabilidade ($h^2= 38,5\%$ e $H^2=77,1\%$) encontrados neste estudo estão semelhantes a literatura.

As estimativas de H^2 para produtividade de grão, média de vargem e média de grãos foram altas, o que pode indicar baixa variância ambiental. As herdabilidade em sentido restrito (h^2), foram menores que as estimativas no sentido amplo (H^2), o que é esperado devido à perda das contribuições da variância de dominância e epistática. Isso indica que essas características são complexas, com múltiplas interações gênicas e interação com o ambiente (Van Der Laan *et al.*, 2025).

Do ponto de vista molecular, diferentes genes e regiões genômicas têm sido associados ao controle do peso dos grãos em soja. Entre eles, destaca-se o fator de transcrição GmPLATZ, que atua na regulação do desenvolvimento e pode influenciar diretamente o acúmulo de biomassa durante o enchimento de grãos. Alterações na expressão de genes reguladores podem provocar aumentos expressivos, com incrementos relatados de até 49% no peso de mil grãos em estudos experimentais (Hu *et al.*, 2023). A presença de múltiplos QTLs (*Quantitative Trait Loci*) associados ao peso reforça a natureza quantitativa desse caráter e evidencia a participação de diferentes regiões genômicas em sua regulação.

A superioridade observada nos cruzamentos envolvendo genitores com alto PMG sugere maior frequência de alelos favoráveis para esse caráter nesses parentais. De acordo com

Rocha *et al.* (2018), estimativas de capacidade geral de combinação refletem a concentração de alelos favoráveis presentes nos genitores, constituindo um importante indicador do potencial dos pais em gerar descendentes superiores.

A presença desse padrão gradativo entre os tipos de cruzamento também indica que a escolha dos genitores pode direcionar de forma eficiente o ganho genético para o caráter (Van Der Laan *et al.*, 2025). Assim, programas de melhoramento podem priorizar combinações entre genótipos com maior potencial para aumento do tamanho ou peso dos grãos, maximizando a probabilidade de obtenção de progênes superiores para o caráter (Chen *et al.*, 2023).

Além disso, a diferença observada entre os grupos de cruzamento demonstra que a utilização de genitores com valores contrastantes de PMG resulta em populações com desempenho intermediário, evidenciando que a combinação entre genótipos com diferentes níveis do caráter pode reduzir o potencial máximo de ganho genético. Esse comportamento é esperado, uma vez que a média fenotípica das populações segregantes tende a ser influenciada diretamente pela média genética dos genitores envolvidos no cruzamento. O aumento na frequência de alelos positivos contribui para o aumento do tamanho das sementes na soja cultivada (Chen *et al.*, 2023).

Outro aspecto importante a ser considerado é que o potencial de um cruzamento não depende apenas da média fenotípica das progênes, mas também da variabilidade genética presente dentro da população. Populações com maior variância genética apresentam maior probabilidade de gerar indivíduos superiores e, consequentemente, maior potencial de resposta à seleção em gerações posteriores (Ramalho *et al.* 2012). A variabilidade genética observada nas populações pode ser atribuída à contribuição de diferentes componentes da variância genética, incluindo efeitos aditivos, dominantes e epistáticos, que interagem na determinação dos caracteres quantitativos.

De forma geral, os resultados indicam que o tipo de cruzamento constitui um fator determinante na expressão do PMG nas populações avaliadas. Assim, cruzamentos entre genitores com elevado peso de sementes tendem a maximizar o potencial de ganho genético para essa característica, contribuindo para a obtenção de materiais superiores dentro dos programas de melhoramento.

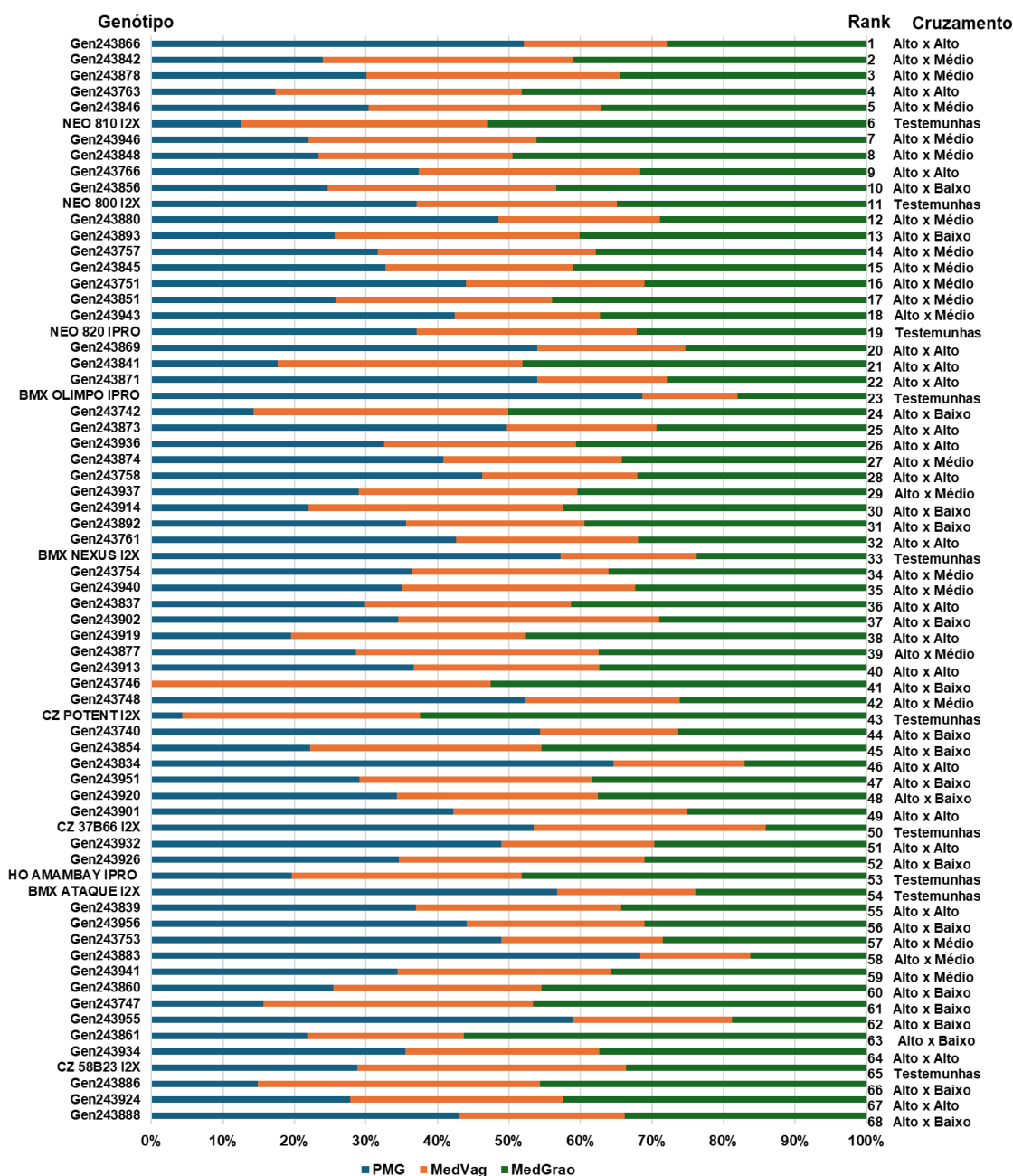
Estudos conduzidos em programas de melhoramento de soja demonstram que a escolha adequada dos genitores constitui uma das etapas mais importantes no planejamento de cruzamentos. Decisões relacionadas à escolha dos parentais geralmente são baseadas em informações como pedigree, diversidade genética, produtividade e características agronômicas

relevantes (Maia *et al.*, 2006). A seleção inadequada de combinações parentais pode resultar em populações com baixo potencial de ganho genético, consumindo recursos do programa de melhoramento por vários anos sem resultar em cultivares superiores (Bernardo, 2002).

Outro ponto importante a ser considerado é que a produtividade de grãos é um caráter quantitativo controlado por múltiplos genes e fortemente influenciado por diferentes componentes do rendimento. Dessa forma, alterações em um componente específico, como o peso médio dos grãos, nem sempre resultam em diferenças significativas na produtividade final, uma vez que outros componentes, como número de vagens e número de grãos por planta, podem compensar variações nesse caráter (Wei; Molin, 2020).

Nesse contexto, os resultados apresentados na Figura 2 corroboram esse comportamento, evidenciando que os genótipos com melhor desempenho produtivo não são aqueles com maior contribuição isolada de um único componente, mas sim aqueles que apresentam uma distribuição mais equilibrada entre PMG, número de vagens e número de grãos.

Figura 2 – Análise geométrica da proporção relativa dos componentes do rendimento peso de mil grãos (PMG), número médio de vagens (MedVag), número médio de grãos (MedGrao), para os genótipos avaliados; os genótipos estão na ordem do rank.



Fonte: Do autor (2026)

Observa-se que, entre os genótipos superiores, há predominância de valores intermediários para esses componentes, sem dominância acentuada, indicando que diferentes combinações entre eles podem resultar em elevado desempenho. Além disso, verifica-se que genótipos com maior participação relativa de PMG não necessariamente ocupam as primeiras posições no ranking, sendo frequentemente compensados por materiais com maior contribuição

do número de grãos ou de vagens (Tayade, *et al.*, 2023). Esses resultados reforçam a natureza complexa da produtividade de grãos e evidenciam a atuação de mecanismos compensatórios entre os componentes do rendimento, conforme descrito por Wei e Molin (2020).

A análise de correlação entre os componentes do rendimento (Tabela 8) evidencia a complexidade da produtividade de grãos e a interdependência entre seus determinantes. A relação entre PMG e a produtividade não é consistente, apresentando valores contrastantes, o que indica que esse componente, isoladamente, não é um bom preditor do rendimento. Observa-se uma correlação negativa ($r = -0,023$), associada a um p-valor não significativo ($p = 0,752$), indicando ausência de relação linear entre essas variáveis no conjunto de dados avaliado. Resultados semelhantes foram reportados por Wei e Molin (2020), que observaram baixa associação entre componentes do rendimento e o peso de grãos em soja.

Tabela 7 – Estimativa da correlação de Pearson entre as variáveis resposta na diagonal Inferior. Na diagonal superior o p-valor do teste

Variável	PMG	Produtividade de grãos	Média Vagens	Média Grãos
PMG	--	0,752	0,049	0,062
Produtividade de grãos	-0,023	--	0,132	0,421
Média Vagens	-0,165	0,132	--	0,000
Média Grãos	-0,167	0,075	0,913	--

Fonte: Do autor (2026).

Por outro lado, a produtividade apresenta associação mais expressiva com o número de grãos, sugerindo maior contribuição desse componente para o desempenho final. Destaca-se ainda a forte correlação positiva entre número de vagens e número de grãos, indicando que esses caracteres estão estruturalmente relacionados. Em contraste, as correlações negativas entre PMG e os demais componentes evidenciam a ocorrência de mecanismos de compensação, nos quais aumentos no número de grãos ou vagens tendem a ser acompanhados por reduções no peso individual dos grãos.

Esses resultados reforçam que a produtividade é um caráter quantitativo complexo, resultante do balanço entre componentes frequentemente antagônicos. Estudos moleculares, genéticos e genômicos do desenvolvimento de grãos de soja, bem como de características relacionadas, são essenciais para a compreensão dos processos biológicos subjacentes e para o desenvolvimento de estratégias que aumentem a produtividade de grãos (Tayade, *et al.*, 2023).

Os cruzamentos envolvendo genitores com alto PMG influenciaram positivamente a média desse caráter nas populações. No entanto, a baixa herdabilidade observada para o PMG

e sua correlação não significativa com a produtividade indicam que esse caráter apresenta limitações para a seleção indireta. Em média, o uso isolado do PMG como critério de seleção não resultou em ganhos consistentes em produtividade, embora o genótipo 243866 se destacou por apresentar a maior produtividade de grãos do experimento sendo o PMG o componente de maior expressão.

5 CONCLUSÕES

A produtividade de grãos em soja é determinada mais pelo equilíbrio entre componentes do que pela maximização de um único caráter.

Dentre as dez primeiras populações mais produtivas, seis são oriundas de cruzamentos de genitores de alto PMG com médio PMG.

Os resultados contribuem para o entendimento da arquitetura do rendimento e auxiliam na definição de estratégias mais eficientes em programas de melhoramento genético de soja.

6 PROJETO TÉCNICO ATRELADO

A avaliação de populações oriundas de cruzamentos entre genitores com diferentes níveis de PMG permitiu compreender a influência desses parentais na expressão dos componentes do rendimento e na produtividade final. Os resultados evidenciaram que, embora o PMG seja influenciado pelos genitores, sua baixa herdabilidade limita a eficiência da seleção direta para esse caráter.

O tamanho do projeto visando aumentar a produtividade de grãos e o PMG dependerá do tamanho do programa de melhoramento e do aporte financeiro. Em virtude disso, indicamos a seguinte estratégia:

Bloco de cruzamentos: Utilização de genitores elite com alto PMG visando obter ganho desse caráter, cruzados com genitores de médio PMG, buscando um equilíbrio entre o número de vagens e número de grãos por vagem observados nesses genótipos. Além disso, a disponibilidade de genótipos elite nessa combinação de cruzamentos será maior quando comparada a cruzamentos somente entre genótipos de alto x alto. Ressalta-se que esse trabalho evidenciou que cruzamentos incluindo genótipos de baixo PMG não propiciaram alta produtividade de grãos.

Geração F2: Utilização do método de condução seleção massal, separando as variações de ciclo dentro da mesma população.

Geração F3: Avaliação da produtividade de grãos das populações, e seleção das mais produtivas, considerando como referência as testemunhas. Num segundo momento será aferido o PMG dessas populações selecionados para realização do descarte dos genótipos de baixo PMG.

Geração F4: Seleção de plantas individuais com foco nas populações com maior produtividade de grãos associada a alto PMG.

Progênie: Avaliação da produtividade de grãos, e seleção das mais produtivas, considerando como referência as testemunhas. Posteriormente será aferido o PMG das progênie selecionadas por produtividade, resultando genótipos que associem altos valores para ambos os caracteres.

VCU: Avaliação de produtividade de grãos e PMG em diferentes locais. Desse modo, a escolha dos genitores, a seleção para PMG e produtividade de grãos realizados nas três fases indicadas do programa de melhoramento (F3, Progênie e VCU), possibilitará o lançamento de cultivares elite associando alta produtividade de grãos e elevado PMG.

Em qualquer fase de avaliação do programa de melhoramento há a possibilidade de seleção de genótipos superiores e inserção desses genótipos no bloco de cruzamentos. Dessa forma a seleção recorrente auxiliara no acúmulo de alelos favoráveis para os caracteres de produtividade e PMG.

REFERÊNCIAS

- AEGRO. **Cálculo de semeadura da soja**: 5 passos para a população de plantas ideal no seu sistema. 2019. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/calculo-de-semeadura-soja/#:~:text=Existem%20varia%C3%A7%C3%B5es%20nos%20pesos%20de,cada%201000%20gr%C3%A3os%20de%20soja>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- GRAFIUS, J. E. A geometry for plant breeding. **Crop Science**, v. 4, n. 3, p. 241-246, 1964. DOI: 10.2135/cropsci1964.0011183X000400030001x
- ALI, T.; ZHOU, B.; CLEARY, D.; XIE, W. The Impact of Climate Change on China and Brazil's Soybean Trade. **Land**, v. 11, n. 12, p. 2286, 2022. DOI: 10.3390/land11122286
- BERHANU, H.; LULE, D.; TESSO, B. Genetic Variability and Heritability of Medium Maturity Group's Soybean (*Glycine max* (L.)) Genotypes at Oromia, Ethiopia. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 22, p. 668-673, 2023. DOI: 10.9734/ijpss/2023/v35i224176
- BERNARDO, R. Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something BLUE. **Heredity**, v. 125, n. 6, p. 375-385, 2020. DOI:10.1038/s41437-020-0312-1
- BERNARDO, Rex. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury, MN: Stemma press, 2002.
- BILYEY, K.; RATNAPARKHE, M. B.; KOLE, CHITTARANJAN. **Genetics, genomics and breeding of soybean**. 1. ed. United States of America: CRC Press, 2010.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. 8.ed. São Paulo: Oficina de texto, 2021.
- CÂMARA, G.M. DE S. **Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção**. Visão Agrícola, v. 3, n. 5, p. 63-66, 2006. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va05-planta-e-ambiente01.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- CAMOZZATO, V. A.; PESKE, S. T.; POSSENTI, J. C.; MENDES, A, S. Desempenho de cultivares de soja em função do tamanho das sementes. **Revista brasileira de sementes**, v. 31, p. 288-292, 2009. DOI: 10.1590/S0101-31222009000100032
- CARNEIRO, A. R. T. **Parâmetros genéticos, análise de trilha e estratégias de seleção em populações segregantes de soja**. 2020. Tese (doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31696/1/ParamatrosGeneticosAnalise.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.
- CHEN, X. *et al.* Differential SW16. 1 allelic effects and genetic backgrounds contributed to increased seed weight after soybean domestication. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 65, n. 7, p. 1734-1752, 2023. DOI: 10.1111/jipb.13480.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, 20254. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja>. Acesso em: 20 jul. 2026.

DUAN, Z.; LI, D.; WANG, H.; HE, X.; ZHANG, M. Genetic regulatory networks of soybean seed size, oil and protein contents. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1160418, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1160418/full. Acesso em: 22 jul. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Características da soja**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja>. Acesso em: 22 jul. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Ecofisiologia da soja**. Circular técnica, 48. Londrina, PR: Embrapa, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/470308/ecofisiologia-da-soja>. Acesso em: 22 jul. 2024.

GASPAR, Adam P. *et al.* Dry matter and nitrogen uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. **Crop Science**, v. 57, n. 4, p. 2170-2182, 2017. DOI: 10.2135/cropsci2016.05.0322.

GASTL FILHO, Josef *et al.* Genetic parameters and selection strategies for soybean progenies aiming at precocity and grain productivity. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, p. e004322, 2022. DOI: 10.1590/1413-7054202246004322

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1093166/a-saga-da-soja-de-1050-ac-a-2050-dc>. Acesso em: 22 jul. 2024.

HU, Yang *et al.* Regulation of seed traits in soybean. **Abiotech**, v. 4, n. 4, p. 372-385, 2023. DOI: 10.1007/s42994-023-00122-8

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KALER, A. S.; PURCELL, L. C.; BEISSINGER, T. GILLMAN, J. D. Genomic prediction models for traits differing in heritability for soybean, rice, and maize. **BMC plant biology**, v. 22, n. 1, p. 87, 2022. DOI: 10.1186/s12870-022-03479-y. Acesso em: 29 jul. 2024.

MAIA, Maria Clideana Cabral *et al.* Adaptabilidade e estabilidade de linhagens experimentais de soja selecionadas para caracteres agronômicos através de método uni-multivariado. **Bragantia**, v. 65, p. 215-226, 2006. DOI: 10.1590/S0006-87052006000200004

MAPHOSA, M.; TALWANA H.; GIBSON P.; TUKAMUHABWA P. Combining ability for resistance to soybean rust in F2 and F3 soybean populations. **Field Crops Research**, v. 130, p. 1-7, 2012. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.02.004

NUVUNGA, J. J. **Análise de fatores para ensaios multiambientes sob diferentes níveis de desbalanceamento usando modelos mistos**. 2014. Dissertação (Mestrado em m Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, 2014.

Diponível em: <https://repositorio.ufla.br/server/api/core/bitstreams/bf3f0f2a-6eb1-4246-8e7e-0a340b0df5ea/content>. Acesso em: 24 de jul. 2026

PATTERSON, H. D. THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when blok sizes are unequal. **Biometrika**, v.58, p. 545-554, 1971. DOI: 10.2307/2334389

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. DOI: 10.1007/s10681-007-9449-8. Acesso em: 29 jul. 2024.

RAMALHO, M.A.P *et al.* **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Ed UFLA, 2021

RAMALHO, M. A. P *et al.* **Genética na agropecuária**. 5. Ed. Lavras: Ed UFLA, 2012.

RESENDE, M. D. V. E. A *et al.* Selection index with parentes, population, progenies and generations effects in autogamous plant breeding. **Crop Science**, v. 56, n. 2, p. 530-546, 2016. DOI: 10.2135/cropsci2015.05.0303

ROSMAYATI, N. R.; ASTARI, R. P. Normal distribution of agronomic characters and plant heritability of soybean F2 population hybridization between salt resistance genotype and Anjasmoro variety. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 012154. DOI: 10.1088/1755-1315/260/1/012154/meta.

ROSSMANN, H. **Estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos de uma população de soja avaliada em quatro anos**. 2001. Dissertação (mestrado em Agronomia/Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11137/tde-29072002-153415/publico/heiko.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SANTOS, J. V. DOS S *et al.* Genetic relationships and genome selection signatures between soybean cultivars from Brazil and United States after decades of breeding. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 10663, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-15022-y

SCHEEREN, B. R.; PESKE, S. T.; SCHUCH, L. O. B.; BARROS, A. C. A. Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, p. 35-41, 2010. DOI: 10.1590/S0101-31222010000300004

SILVA, Eric Vinicius Vieira *et al.* Genotypic and phenotypic parameters associated with early maturity in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. e02545, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02545

SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CÂMARA, G. **Soja: do plantio à colheita**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

TAYADE, Rupesh *et al.* Molecular, genetic, and genomic basis of seed size and yield characteristics in soybean. **Frontiers in plant science**, v. 14, p. 1195210, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1195210

TEJO, D. P.; FERNANDES, C.H. DOD S.; BURATTO, J. S. Soja: fenologia, morfologia e fatores que interferem na produtividade. **Revista científica eletrônica de Agronomia da**

FAEF, v. 35, n. 1, p. 1-9, 2019. Disponível em: https://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/hw9EU5Lusw7rZZH_2019-6-19-14-11-1.pdf. Acesso em: 20 jul. 2024.

USDA – United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service, 2026. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 14 de mar. 2026.

VAN DER LAAN, Liza *et al.* Genomic and phenomic prediction for soybean seed yield, protein, and oil. **The plant genome**, v. 18, n. 1, p. e70002, 2025. DOI: 10.1002/tpg2.70002.

WEI, Marcelo Chan Fu; MOLIN, José Paulo. Soybean yield estimation and its components: A linear regression approach. **Agriculture**, v. 10, n. 8, p. 348, 2020. DOI: 10.3390/agriculture10080348