

MELHORAMENTO DE PRECISÃO

*Aplicações e perspectivas
na genética de plantas*

**RAFAEL TASSINARI RESENDE
CLAUDIO BRONDANI**

Editores Técnicos



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura e Pecuária*

Melhoramento de Precisão

Aplicações e perspectivas na genética de plantas

Rafael Tassinari Resende
Claudio Brondani

Editores Técnicos

*Embrapa
Brasília, DF
2023*

Rafael Tassinari Resende, Claudio Brondani,
Lazaro José Chaves

Introdução

Agricultura moderna enfrenta desafios constantes, como a necessidade de aumentar a produção de insumos para uma população em contínuo crescimento, buscando por soluções sustentáveis para garantir as demandas por alimentos, bioenergias, fibras, medicamentos, forragens, entre outras. Nesse cenário, o Melhoramento Genético de plantas desempenha relevante papel, sempre buscando desenvolver cultivares com características desejáveis, como maior produtividade, resistência a insetos-pragas e doenças e adaptabilidade a diferentes condições ambientais (Hickey et al., 2019; Ramalho et al., 2021).

No decorrer da história, de forma análoga às “Eras da Revolução Industrial”, o Melhoramento Genético de plantas também evoluiu em diferentes fases, refletindo avanços tecnológicos e científicos. Pode-se dizer que o Melhoramento Genético 1.0, associado à domesticação promovida de paisagens, marcou o início das interações humanas com as plantas, em que a seleção de plantas úteis e a eliminação das competidoras ocorriam de forma rudimentar. Essa primeira era seguiu até o surgimento da agricultura (entre 10.000 a.C. e 8.000 a.C.), havendo mudanças significativas, como a seleção intencional por características desejáveis e a adaptação de plantas ao cultivo humano (Wallace et al., 2018). Em seguida, o Melhoramento Genético 2.0 combinou a genética mendeliana e a biometria, permitindo a previsão dos resultados da seleção e o desenvolvimento de métodos mais sistemáticos de melhoramento.

Tal como com o avanço da tecnologia na Revolução Industrial 3.0, o Melhoramento Genético 3.0 também incorporou técnicas novas, no caso, moleculares e genômicas, como a identificação de marcadores moleculares e a análise de dados genômicos

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

de alto rendimento. Essas abordagens aceleraram o processo de melhoramento, possibilitando a identificação de múltiplos efeitos gênicos relacionados à expressão dos fenótipos desejáveis e o desenvolvimento de cultivares com maior rigor. Agora, na era do Melhoramento de Precisão, o Melhoramento Genético 4.0 está em grande expansão, impulsionado pela convergência de tecnologias avançadas, como a genotipagem em larga escala, Inteligência Artificial (IA), Sistemas de Informações Geográficas (SIG), drones, sensoriamento remoto e análise de dados multiômicos (Crossa et al., 2021; Resende et al., 2021; Varshney et al., 2021).

A qualquer momento estaremos entrando no Melhoramento Genético 5.0. Aliás, quem sabe já não estejamos vivendo esta era? Essa fase do aprimoramento de plantas promete uma revolução na forma como se desenvolvem cultivares. Com a automação total dos processos e o avanço da robótica, espera-se que o melhoramento genético seja conduzido por meio de sistemas inteligentes e robôs especializados (Pearson et al., 2022; Najafabadi et al., 2023). Essas tecnologias, quando implementada nas rotinas de melhoramento, permitirão uma coleta eficiente de dados fenotípicos de altíssimo rendimento, acelerando a identificação e a mensuração dos fenótipos-alvo das plantas. Além disso, a análise de dados se beneficiará de algoritmos avançados e inteligência artificial, proporcionando uma tomada de decisão mais precisa no processo de seleção genética.

Neste primeiro capítulo, vamos explorar a interseção entre o Melhoramento Genético de plantas e a Agricultura de Precisão, apresentando técnicas e conceitos fundamentais. Abordaremos a história do melhoramento genético de plantas, culminando na era atual, que será explorada nos capítulos subsequentes deste livro. Faremos uma analogia à Equação do Melhorista, relacionando-a com questões contemporâneas do Melhoramento de Precisão. Além disso, apresentaremos os resultados de uma pesquisa realizada com profissionais da área, investigando suas perspectivas em relação ao Melhoramento de Precisão. Demonstraremos como a combinação dessas abordagens está transformando a agricultura, impulsionando a sustentabilidade, produtividade e adaptabilidade das plantas cultivadas. Nosso objetivo com este livro é auxiliar os melhoristas a otimizarem o processo de seleção, reduzindo o tempo necessário e maximizando os ganhos obtidos.

Histórico do Melhoramento Genético

A interferência das populações humanas sobre as plantas e seu habitat antecedem a origem da agricultura, quando a composição de plantas de uma comunidade vegetal

era alterada pela interferência humana, favorecendo a ocorrência de plantas úteis e eliminando ou desfavorecendo as plantas competidoras. Esse processo é conhecido como domesticação promovida de paisagens (Clement, 2001) e a alteração genética decorrente nas plantas foi, presumivelmente, de baixo impacto imediato, uma vez que as plantas continuaram a depender de seu sistema natural de dispersão de sementes ou outras estruturas de propagação para a manutenção das populações naturais.

A origem da agricultura, cujos mais antigos registros fósseis datam de aproximadamente 12 mil anos, trouxe uma mudança radical na relação dos humanos com as plantas cultivadas, do ponto de vista evolutivo. Se antes as populações de plantas silvestres dependiam de seus eficientes mecanismos de dispersão de sementes para sobreviverem, as populações cultivadas passaram a ter os humanos, no início mulheres provavelmente, como únicos dispersores. Com isso, a seleção, automática e não intencional, passou a favorecer genótipos com menor poder de dispersão de sementes, sementes com germinação mais rápida e com maior vigor. Esse fato, por si só, acarretou uma série de mudanças morfofisiológicas nas populações cultivadas, como a retenção de sementes, maior uniformidade de maturação, aumento do tamanho das sementes, perda de dormência e estruturas de proteção de sementes. Esse conjunto de mudanças, que ocorreram em diferentes espécies e em diferentes centros de domesticação, ficaram conhecidas como síndrome da domesticação. Dentre essas características decorrentes da domesticação, algumas como dormência de sementes possuem controle genético mais simples e ocorreram em relativamente curto espaço de tempo, algumas centenas de anos, enquanto outras, como retenção de sementes, de controle genético mais complexo, deram-se em um período mais longo de tempo.

Com o avanço da agricultura como atividade humana, as plantas cultivadas foram levadas para regiões distantes do seu centro de origem e foram submetidas a diferentes pressões de seleção para adaptação às condições de solo, variáveis climáticas e modos de cultivo. Adicionalmente, a seleção intencional pelos agricultores passou a favorecer certos tipos de variantes que chamavam a atenção por algum atributo de interesse. Esse processo, que se expandiu por milhares de anos, pelas diferentes regiões da terra a partir dos centros de domesticação, levou a uma enorme variabilidade morfológica nas espécies cultivadas em comparação com seus ancestrais silvestres. Esse processo de expansão da variabilidade fenotípica e genotípica ganhou novo impulso com as navegações a partir do século XVI, com intenso intercâmbio de espécies domesticadas entre os continentes e adaptação a novos ambientes de cultivo. Essa evolução sob cultivo em múltiplos ambientes, com diferentes técnicas de cultivo e para atender aos interesses particulares de cada agrupamento humano, resultou em milhares de variedades locais ou crioulas, para as diferentes espécies

■ Melhoramento de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

cultivadas. A importância dessa enorme diversidade de plantas para a sustentabilidade da agricultura só foi amplamente reconhecida a partir dos trabalhos de N. I. Vavilov, na primeira metade do século XX (Hummer; Hancock, 2015), o que impulsionou uma política global de conservação de recursos genéticos vegetais. A diversidade genética, hoje armazenada em bancos de germoplasma ao redor do mundo, constitui a matéria-prima para o melhoramento de plantas, mesmo na era do melhoramento de precisão. Adicionalmente, técnicas de genética molecular e genômica são cada vez mais empregadas na caracterização e utilização das coleções de germoplasma, como importante ferramenta auxiliar do melhoramento genético.

Apesar da enorme diversidade fenotípica decorrente da domesticação e expansão, a origem das populações cultivadas se deu a partir de populações locais silvestres, geneticamente uniformes, e representando uma estreita base genética original. Estudos genômicos têm identificado genes responsáveis por várias das mudanças decorrentes da domesticação, em diferentes espécies cultivadas. Isto possibilita a proposta de domesticação *de novo* ou redomesticação (Fernie; Yan, 2019), como forma de ampliar a base genética de populações cultivadas a partir de seus ancestrais selvagens, utilizando ferramentas genômicas atuais, como a edição gênica.

O procedimento para a seleção intencional de plantas que prevaleceu durante o longo período de domesticação foi, provavelmente, a escolha de indivíduos com características de interesse para coleta de sementes ou outros propágulos, o que se conhece como seleção massal. Atribui-se o marco de surgimento dos métodos sistematizados de melhoramento aos trabalhos de Louis de Vilmorin na França, em meados do século XIX. O método, empregado para selecionar beterrabas com maior teor de açúcar, consistia no plantio de progênies em fileiras individuais, sendo parte das plantas utilizadas para avaliar o teor de açúcar, e posterior coleta de sementes das outras plantas das fileiras superiores. Esse método, conhecido como Princípio do Isolamento de Vilmorin, foi posteriormente empregado para seleção de teores de óleo e proteína em milho a partir de 1896, sendo denominado método espiga-por-fileira. Aprimorado com o uso de delineamentos experimentais, o método é hoje denominado seleção entre e dentro de famílias de meios-irmãos e continua sendo muito utilizado no melhoramento de plantas alógamas.

Os diferentes métodos de melhoramento de plantas utilizados atualmente surgiram no início do século XX, após a redescoberta das leis de Mendel. O surgimento da genética como ciência trouxe melhor compreensão dos mecanismos de herança dos caracteres e a possibilidade de previsão dos resultados da seleção a partir de populações variáveis ou de cruzamentos dirigidos. A junção da genética mendeliana

com a biometria, que vinha sendo aprimorada desde meados do século XIX, deu origem à genética quantitativa ou genética biométrica, principal ciência de base para o melhoramento de plantas. A adoção do melhoramento de precisão pode trazer vantagens competitivas quando adotado, como aumento da eficiência e velocidade no desenvolvimento de novas cultivares e maior precisão na seleção de caracteres de interesse, resultando em materiais genéticos superiores em termos de eficiência e rentabilidade.

Na era da agricultura de precisão, o melhoramento genético de plantas continua tendo o papel principal na busca por cultivares mais produtivas, resistentes a doenças e com alto desempenho em diferentes condições ambientais. Com o auxílio de avanços tecnológicos, como Sistemas de Informações Geográficas, fenotipagem em larga escala e genômica, os programas de melhoramento têm a oportunidade de alcançar ganhos de seleção surpreendentes. Combinações estratégicas de inteligência artificial, computação, sensoriamento remoto e automação de processos têm acelerado o ritmo das descobertas e impulsionado a eficiência dos ciclos de seleção (Bernardo, 2020). Nesse contexto, os agricultores e pesquisadores têm à sua disposição um vasto arsenal de ferramentas que permitem a identificação de características desejáveis em plantas, conjuntamente com a análise genômica em larga escala e a tomada de decisões baseada em dados precisos. A convergência dessas tecnologias está abrindo novas perspectivas para o melhoramento genético, permitindo o desenvolvimento de cultivares cada vez mais adaptadas, sustentáveis e produtivas, capazes de enfrentar os desafios crescentes da agricultura moderna.

Embora o melhoramento de precisão seja uma abordagem promissora e complementar ao melhoramento clássico, é improvável que substitua completamente essa forma tradicional de melhoramento de plantas. Ambas as abordagens têm seus pontos fortes e são úteis em diferentes contextos. O melhoramento clássico, também conhecido como melhoramento convencional, tem sido usado há muito tempo para desenvolver novas cultivares de plantas, e envolve a seleção e o cruzamento de genótipos com características desejáveis para melhorar suas qualidades agrônômicas, com um histórico comprovado de sucesso. O melhoramento de precisão pode acelerar o processo de melhoramento e facilitar a seleção de plantas com características desejáveis, enquanto o melhoramento clássico continua sendo uma valiosa ferramenta para desenvolver novas cultivares e combinar características complexas e, portanto, por serem complementares, podem ser usados em conjunto.

A Equação do Melhorista

Neste livro, não se pretende desvalorizar as técnicas e práticas de melhoramento genético clássico, rotulando-as como arcaicas ou obsoletas. Muito pelo contrário, o propósito é reconhecer e apreciar sua importância, ao mesmo tempo em que se incorpora novas possibilidades de coleta e análise de dados. A contraposição do melhoramento clássico ou convencional com o melhoramento moderno constitui uma falsa controvérsia. A criação de novas cultivares se dá pelos métodos clássicos de melhoramento. A efetividade desses métodos tem sido continuamente incrementada com novas técnicas e procedimentos, desde ajustes experimentais até as técnicas do melhoramento de precisão.

O objetivo final do melhoramento de plantas é obter populações de alto desempenho para serem utilizadas diretamente como cultivares ou como populações base para extração de linhagens ou clones. A média de um caráter na população melhorada será, por definição, a média da população original acrescida do ganho por seleção. Uma população base ideal será aquela com média favorável e com potencial para gerar maiores ganhos genéticos adicionais. Para fins de seleção recorrente, geralmente são utilizados compostos ou sintéticos como população base. A escolha de parentais utilizando métodos de predição é uma forma eficiente de assegurar a obtenção de populações com propriedades adequadas. No caso de seleção de linhas puras ou clones a partir de cruzamentos dirigidos, a qualidade da população de seleção também vai depender da escolha apropriada de parentais.

A equação para predição de ganho por seleção, denominada equação do melhorista (*breeder's equation*), é considerada a principal aplicação da genética quantitativa no melhoramento genético de plantas e animais (Cobb et al., 2019). A equação tem origem no conceito de regressão para a média de Francis Galton, em seus estudos relacionando caracteres de plantas, animais e humanos, entre gerações, na segunda metade do século XIX. O conceito de Galton recebeu tratamento matemático apropriado por Karl Pearson, gerando os coeficientes de regressão e de correlação (Stanton, 2001). Na sua forma mais simples, a equação do ganho por ciclo de seleção pode ser descrita por $\Delta G = ds \times h^2$, em que ds é o diferencial de seleção, ou seja, a diferença entre a média dos indivíduos ou progênies selecionados e a média geral da população, e h^2 é o coeficiente de herdabilidade específico para cada população, caráter e método de melhoramento. O coeficiente de herdabilidade é, por natureza, um coeficiente de regressão dos valores do caráter medidos nas unidades da população melhorada em relação aos valores do mesmo caráter nas unidades aparentadas na geração de seleção. Se denotarmos por X_i os valores na geração de seleção

e por X'_i os valores correspondentes na população melhorada, o coeficiente de herdabilidade corresponde a $h^2 = \frac{Cov_{xx'}}{\sigma_{Fx}^2}$. A covariância de X com X' é uma medida da semelhança entre parentes na geração de seleção e na população melhorada, sendo uma função de componentes da variância genética da população de referência, para o caráter em questão (Carena et al., 2010). Para os métodos mais usuais de seleção intrapopulacional, a covariância corresponde à variância genética aditiva disponível entre as unidades de seleção, indivíduos ou progênies, com seleção em ambos os sexos. O denominador da equação refere-se à variância fenotípica entre as unidades de seleção. O diferencial de seleção pode ser expresso em unidades de desvio padrão fenotípico fazendo $i = \frac{ds}{\sigma_{F_x}}$. Supondo seleção truncada e distribuição normal dos dados, o valor de i pode ser obtido a partir da proporção de unidades selecionadas. Para a comparação entre métodos e procedimentos de seleção, a equação pode ser adaptada para acomodar o tempo gasto em cada ciclo e possível endogamia na população melhorada. Com isso, a equação do melhorista pode ser reescrita por $\Delta G = (i \times r \times \sigma_g)/L - dF$. Essa equação encapsula os principais elementos que influenciam o ganho genético no processo de melhoramento de plantas. ΔG representa o objetivo final de todo esforço, o ganho genético alcançado ao longo do tempo. A intensidade de seleção (i) reflete a proporção de indivíduos selecionados, enquanto a acurácia da seleção (r) destaca a confiabilidade das predições. O desvio padrão genético (σ_g) mede a diversidade genética disponível para seleção de acordo com o método empregado. O tempo gasto por ciclo de seleção (L) pondera a rapidez do processo de melhoramento e a depressão por endogamia (dF) considera os efeitos negativos da reprodução entre parentais geneticamente relacionados. Compreender e otimizar esses termos é essencial para maximizar os ganhos genéticos, acelerar o processo de melhoramento e desenvolver variedades superiores e adaptadas às demandas atuais.

Pesquisa Realizada com Melhoristas Brasileiros sobre o Melhoramento de Precisão

Sinopse dos dados coletados

A fim de ilustrar o cenário do Melhoramento de Precisão no Brasil, foi realizada uma pesquisa via formulário Google, amplamente divulgada em universidades, instituições de pesquisa e algumas empresas dedicadas ao melhoramento genético de plantas. Neste formulário, obteve-se 238 respostas entre os dias 14 de fevereiro a 14 de maio

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

de 2023, e os resultados foram reunidos, sumarizados no decorrer do presente texto e ilustrados a partir do pacote ggplot2 do R (Wickham, 2016). Ao todo foram quinze perguntas, iniciando com o cargo/profissão/atividade do profissional. As possibilidades de resposta incluíam: estudante de pós-graduação em melhoramento de plantas ou área correlata, técnico ou especialista, docente/professor, pesquisador, consultor, cientista/analista de dados, empresário, líder/chefe de pesquisa ou setor, e em busca de recolocação. Solicitou-se aos participantes que selecionassem apenas sua ocupação principal, e, no caso de aposentados, que marcassem a ocupação antes da aposentadoria. Como se obteve apenas duas respostas de empresários, as análises feitas para esse público foram desconsideradas para evitar viés no resultado. Também se perguntou as idades, em intervalos etários de 5 em 5 anos ({21-25, 26-30, ..., 71-75}). Porém, como foram poucos os respondentes com mais de 60 anos (isto é, nas classes 61-65, 66-70 e 71-75), eles foram agrupados como “>60” anos (Figura 1A).

Adicionalmente foi perguntado sobre a formação dos entrevistados (Figura 1B). Outra pergunta foi sobre as instituições e segmentos que os profissionais atuavam, ou seja, se nos setores públicos ou privados, e se eram de instituições ou áreas de pesquisa ou ensino, ou se o profissional atuava como autônomo(a). Na primeira pergunta, sobre o tipo de instituição, as respostas foram: “instituição pública”, com 62,2% dos participantes selecionando essa opção; “instituição privada” foi selecionada por 31,5% dos respondentes; “Não se aplica” foi a opção de 4,6% dos participantes; e “Autônomo”, escolhido por apenas 1,7% dos respondentes. Na segunda pergunta, as possibilidades de resposta ficaram assim distribuídas: setor (ou instituição) de Pesquisa foi selecionada por 54,6% dos participantes; Ensino/pesquisa/extensão (ou Universidades) foi escolhida por 31,5% dos respondentes; Setor Produtivo (como empresas, companhias ou indústrias) foi a opção para 8% dos participantes; e “Outros”, escolhido por 5,9% dos respondentes.

Profissionais que responderam à pesquisa lidam com diversas culturas agrícolas, e na Figura 2 é mostrada a distribuição desses profissionais. Note-se que um profissional poderá trabalhar com mais de uma cultura e, por esse motivo, o somatório das porcentagens do gráfico é superior a 100. São exemplos dessas espécies, as autógamias anuais: soja, arroz, trigo, feijão, centeio, cevada; alógamas anuais: milho, girassol e algumas hortaliças; alógamas perenes: coco, eucalipto, dendê, teca e mogno; espécies de propagação vegetativa: batata, morango, mandioca, banana, cana-de-açúcar; espécies de propagação mista: cacau, abacate, limão, manga; e autógamias perenes: pêssego e café arábica.

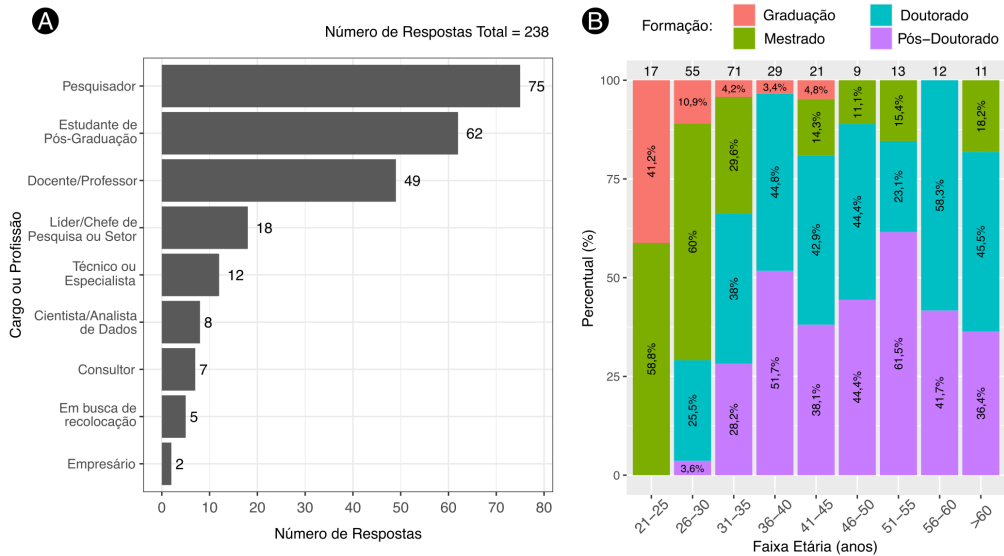


Figura 1. Distribuição das 238 respostas. Na parte A estão as diferentes Profissões (Cargos ou Posições) dos que responderam à pesquisa. Na parte B estão as distribuições das faixas etárias (em anos) e a formação do profissional (última titulação obtida: graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado). Observação: mesmo que “pós-doutorado” não seja considerado como um grau de titulação, incluiu-se na pesquisa a título de informação, bastando somar as quantidades de Doutorado + Pós-Doutorado para um resultado mais condizente com as titulações.

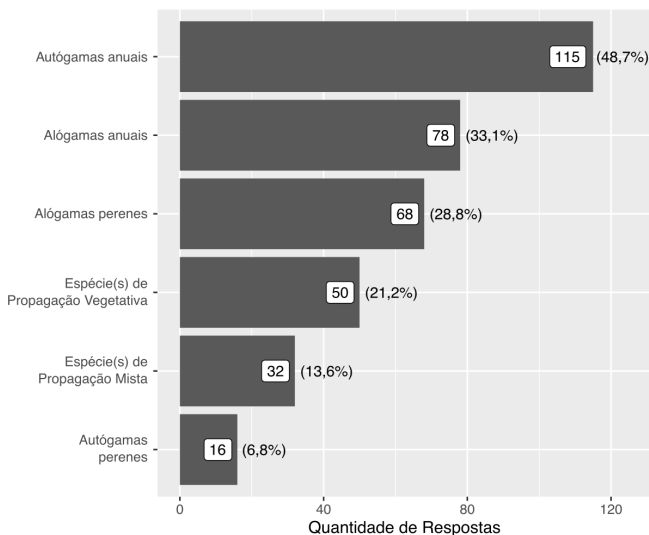


Figura 2. Distribuição das respostas por cultivo agrícola de atuação do profissional. Observação: um determinado profissional pode trabalhar com mais de uma espécie ao mesmo tempo.

Inovação e Empreendedorismo no Melhoramento de Precisão

O desenvolvimento tecnológico e a inovação têm um papel fundamental na otimização da equação do melhorista. Novas tecnologias podem ser aplicadas para aprimorar a coleta de dados, melhorar a precisão das medições fenotípicas e genotípicas, e acelerar o processo de melhoramento. Além disso, a inovação em métodos de análise e interpretação de dados genômicos e fenotípicos pode fornecer *insights* para identificar marcadores genéticos relevantes e entender as interações entre genes e características de interesse. Na Tabela 1 é revelado um panorama sobre o conhecimento dos entrevistados em relação às startups relacionadas ao melhoramento de plantas. Alguns entrevistados afirmam fazer parte ou serem proprietários de startups nesse campo, o que sugere participação ativa no setor. Além disso, uma parcela dos entrevistados demonstrou ter conhecimento específico sobre startups voltadas para o melhoramento de plantas, indicando familiaridade com o tema. No entanto, a grande maioria dos entrevistados (quase 58%) afirmou não conhecer nenhuma startup nesse âmbito. Esse resultado ressalta a necessidade de aumentar a divulgação e conscientização sobre as startups que atuam no melhoramento genético de plantas, a fim de promover maior compreensão e envolvimento dos profissionais nessa área de inovação.

Tabela 1. Resposta dos participantes à pergunta: “Você conhece Startups (ie., uma empresa emergente e inovadora que busca desenvolver um modelo de negócios aplicado) voltadas para o Melhoramento Genético de Plantas?”.

Respostas	Frequência
Sim, inclusive faço parte de uma (ou sou proprietário)	5 (2,10%)
Sim, conheço uma ou mais Startups específicas para o Melhoramento	46 (19,33%)
Sim, conheço uma ou mais Startups com aptidão para o Melhoramento	49 (20,59%)
Não. Sei que existem Startups, mas não conheço nenhuma voltada para o Melhoramento de Plantas	138 (57,98%)
	238 (100%)

Os profissionais que responderam conhecer ou pertencer a startups mencionaram que essas estão envolvidas em uma ampla variedade de áreas relacionadas ao melhoramento genético de plantas, e atuam desde a avaliação de ensaios de valor de cultivo e uso, prestação de serviços de sequenciamento de DNA e mapeamento

genético, análises estatísticas e desenvolvimento de variedades, transgenia, soluções de fenotipagem, análise de dados, edição genômica e produção de sementes. Além disso, também foram mencionadas startups que atuam em áreas específicas, como reflorestamento, polinização via drones, cultivo em ambientes controlados, e várias outras atividades diretamente ou indiretamente relacionadas ao melhoramento de plantas.

Habilidades Tecnológicas Pertencentes ao Pipeline do Melhoramento de Precisão

A rotina de trabalho do melhorista vegetal moderno é marcada pela utilização de diversas tecnologias de coleta e obtenção de dados, tais como fenotipagem automatizada, bioinformática, genotipagem via milhares de marcadores do tipo SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*), caracterização ambiental, simulação de dados e integração com a “Internet das Coisas” (IoT – Internet of Things). Além disso, é importante dominar linguagens de programação como R, Python, C, C++ ou C#, bem como utilizar plataformas de hospedagem de código e gerenciamento de bancos de dados. Os procedimentos de análise de dados incluem estatísticas descritivas, testes de médias, estatística multivariada, modelos lineares e não lineares, métodos bayesianos e técnicas de inteligência artificial. Essas abordagens são fundamentais para o avanço do melhoramento genético de plantas e permitem uma análise mais precisa e eficiente dos dados coletados (Figura 3).

Foi perguntado quais tecnologias de coleta/obtenção de dados fazem parte da rotina de trabalho dos profissionais do melhoramento, e as possibilidades de resposta foram: fenotipagem em larga escala/automatizada com sensores embarcados em drones, robôs terrestres ou plataformas fixas. Além disso, a genotipagem via SNP usando *Next Generation Sequencing* (NGS) com Chips ou *Arrays* e a bioinformática com atividades como alinhamento de sequências, identificação de SNPs e anotação de genomas também foram mencionadas. Outras opções foram a caracterização ambiental com estações meteorológicas e dados de satélites orbitais; a simulação de dados usando técnicas como *Monte Carlo*, *Bootstrap* e Redes Bayesianas; bem como sistemas integrados com IoT. Para essa pergunta, foi possível selecionar mais de uma resposta (Figura 3-A).

Foi perguntado sobre o domínio de linguagens de programação e o uso de plataformas de hospedagem de código e de gerenciamento de banco de dados. As possíveis respostas incluíram o conhecimento avançado ou básico nas seguintes linguagens: R, Python, C, C++ ou C#. Também foi possível selecionar se utilizavam

■ Melhoramento de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

plataformas de hospedagem e compartilhamento de códigos (por exemplo, *GitHub*), plataformas de gerenciamento de dados (por exemplo, SQL), ou se o profissional não utilizava ou desconhecia as opções mencionadas. Era permitido marcar mais de uma alternativa. Os participantes da pesquisa puderam incluir outras linguagens de programação que porventura utilizassem em suas rotinas de trabalho (Figura 3-B).

Na sequência, foi perguntado quais procedimentos de análise de dados são utilizados. As possibilidades de respostas incluíram desde análises clássicas e essenciais, como estatísticas descritivas e análises gráficas, ANOVA juntamente com testes de médias (como os testes Tukey e Scott-Knott), estatística multivariada (como Análise de Componentes Principais – PCA, Análise Fatorial – FA e análises de agrupamento), modelos lineares (como análise de regressão simples, quadrática e cúbica), modelos não lineares (como Sigmoidal Logístico, Gompertz e Weibull), modelos mistos (lineares e não lineares), até métodos bayesianos e técnicas de inteligência artificial (tais como aprendizado de máquina, redes neurais, lógica *Fuzzy* e *Random Forest*). Foi possível marcar mais de uma alternativa (Figura 3-C).

Com base nos dados coletados com os participantes da pesquisa, é possível discutir algumas tendências relacionadas às tecnologias de coleta de dados (Figura 3-A). É interessante notar que a genotipagem em larga escala (via SNP) é amplamente utilizada, apesar de seu alto custo quando avaliados centenas a milhares de marcadores. Isso pode ser atribuído ao seu potencial para fornecer informações importantes sobre a composição genética de indivíduos e populações. Por outro lado, a subutilização da ambientipagem via sensores orbitais, que muitas vezes é gratuita, pode ser devido à falta de conhecimento em SIG ou infraestrutura adequada para acessar, processar e interpretar esses dados (Resende et al., 2021). A bioinformática, embora tenha a necessidade de alta especialização, é uma área bem explorada, destacando sua importância como ferramenta para análise de dados genéticos e genômicos. Quanto à fenotipagem, a preferência pelo uso de drones em comparação com plataformas terrestres pode ser atribuída à sua capacidade de fornecer uma visão abrangente e detalhada das características fenotípicas, permitindo cobertura eficiente de grandes áreas, além de ainda serem mais acessíveis em termos de custo (Reynolds et al., 2019). No entanto, é possível especular que a adoção de plataformas terrestres pode aumentar à medida que novas tecnologias e abordagens sejam desenvolvidas e se popularizem, possibilitando maior diversidade e precisão na coleta de dados fenotípicos.

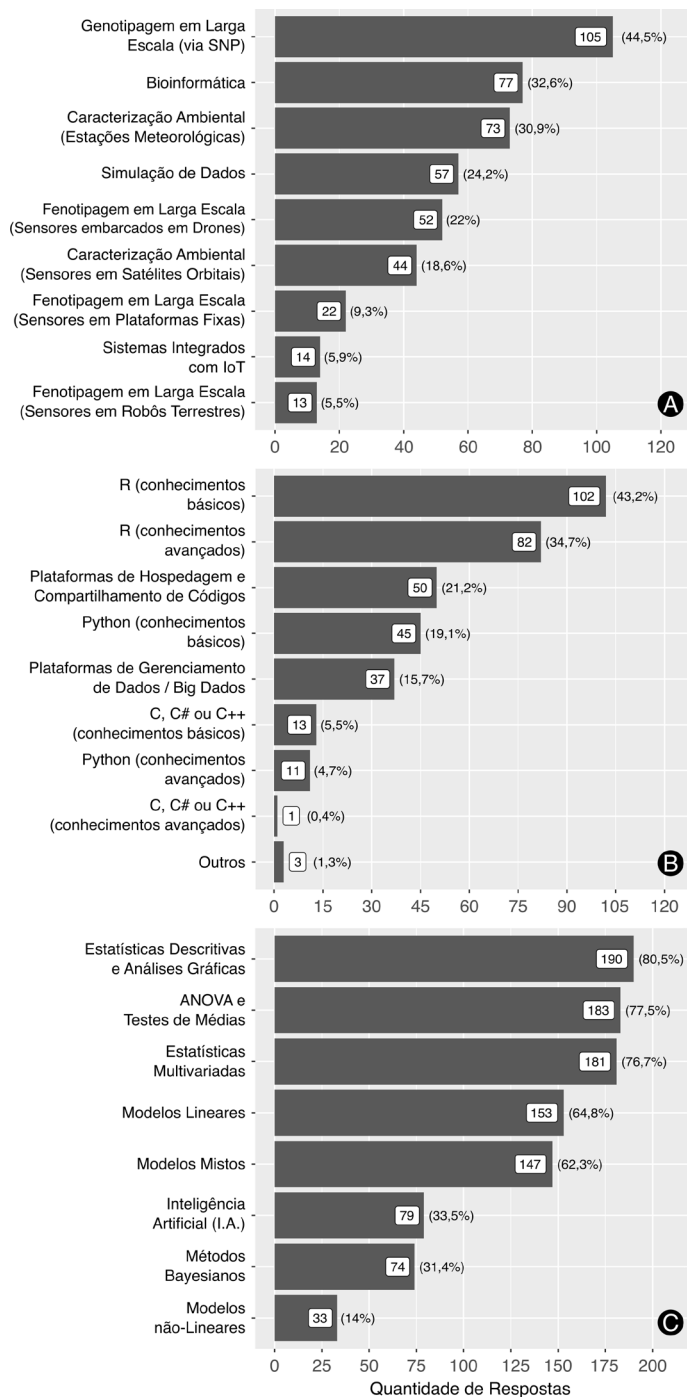


Figura 3. Resposta sobre quais ferramentas tecnológicas são utilizadas por profissionais do melhoramento genético de plantas. **Parte A**, respostas sobre conhecimento e utilização de ferramentas de aquisição de dados. **Parte B**, respostas sobre conhecimento e utilização de ferramentas computacionais de programação, manejo e gerenciamento de dados. **Parte C**, respostas sobre conhecimento e utilização de ferramentas de manipulação e análise dos dados.

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

Com base nas respostas obtidas sobre domínios de linguagens computacionais (Figura 3-B), é evidente o predomínio do uso da linguagem R. No entanto, há pouca adesão a outras facilidades, como plataformas de hospedagem e gerenciamento de códigos, bem como plataformas de gerenciamento de dados e *big data*. Além disso, a baixa utilização de linguagens de nível básico, como C, C# ou C++, pode ser atribuída à sua complexidade e necessidade de habilidades especializadas. Surpreendentemente, embora o Python seja atualmente uma unanimidade no mercado de trabalho mundial (Afzal et al., 2020), profissionais brasileiros do melhoramento de plantas exploram pouco essa linguagem, talvez devido à falta de conscientização sobre suas capacidades ou à preferência por ferramentas mais difundidas, o R. No entanto, com a crescente demanda global por habilidades em Python, é possível que sua adoção aumente no contexto do melhoramento de plantas no futuro, à medida que suas vantagens e aplicabilidades forem mais reconhecidas e exploradas.

Com base nas respostas observadas sobre o uso de ferramentas de análise de dados na pesquisa realizada (Figura 3-C), é interessante notar que a maioria dos profissionais emprega análises básicas, como estatísticas descritivas, análises gráficas e a ANOVA. No entanto, alguns profissionais afirmaram usar ferramentas robustas, como estatística Bayesiana e Inteligência Artificial, mas curiosamente não fazem uso das ferramentas básicas, que deveriam ser fundamentais para qualquer estudo. Esse fenômeno pode indicar a falta de compreensão da importância das análises básicas para esse grupo. Além disso, é surpreendente constatar que, embora se esperasse que os Métodos Bayesianos estivessem recebendo atenção equivalente à adoção dos Modelos Mistos, quase o dobro de profissionais ainda preferem os clássicos Modelos Mistos em comparação aos métodos baseados no teorema de Bayes, resultado esse também observado anteriormente por Van Eeuwijk et al. (2016). Isso pode refletir a preferência por abordagens estatísticas tradicionais e uma possível resistência à adoção de métodos estatísticos mais especializados/avançados. No entanto, é importante que os programas de pós-graduação em genética e melhoramento de plantas promovam a utilização e a compreensão das ferramentas básicas e robustas de análise de dados, incentivando a aplicação adequada dessas técnicas para obter resultados mais precisos e confiáveis.

A mineração, o manejo de dados e o uso de *big data* também desempenham importante papel na otimização da equação do melhorista. Com o aumento da disponibilidade de dados genéticos e fenotípicos em larga escala, é possível utilizar técnicas avançadas de análise de dados para identificar padrões, correlações e relações complexas entre caracteres. Isso permite a seleção mais precisa e eficiente de plantas superiores, levando a um ganho genético mais significativo.

Os conceitos da Pesquisa Operacional (PO) e a otimização matemática de processos podem contribuir para otimizar a equação do melhorista ao aplicar técnicas matemáticas e algoritmos avançados para encontrar a melhor combinação de variáveis e parâmetros no processo de seleção de plantas. Por meio da modelagem matemática e da simulação é possível explorar diferentes cenários e identificar estratégias ótimas que maximizem o ganho genético. Pela Figura 4, observa-se que Técnicos e Especialistas e, em especial, Cientistas/Analistas de Dados, são os profissionais que mais têm contato e utilizam a Pesquisa Operacional. No entanto, pouco ainda é explorado nessa área de conhecimento, que é muito utilizada por profissionais da área de engenharia de processos. O capítulo 6 deste livro é dedicado a PO e possui exemplos que podem ajudar no *pipeline* de atividades do melhorista de plantas.

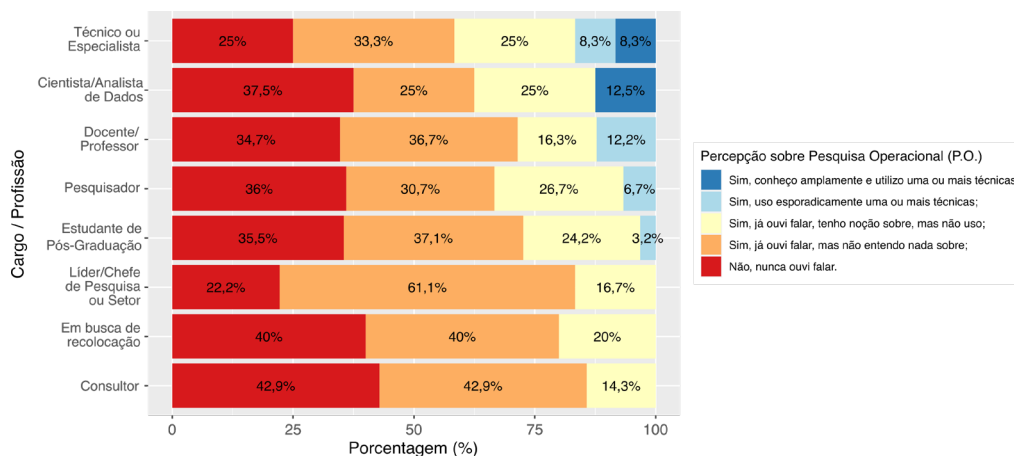


Figura 4. Percepção ou entendimento dos profissionais sobre a Pesquisa Operacional (PO). As respostas foram subdivididas entre possíveis cargos ou profissões dos entrevistados.

A Internet das Coisas (IoT), apresentada no capítulo 7, desempenha um papel fundamental no aprimoramento da rotina do melhorista de plantas, proporcionando vantagens significativas na coleta e monitoramento de dados. Ao possibilitar a obtenção de informações em tempo real sobre as plantas, em diferentes ambientes e condições, a IoT viabiliza o monitoramento contínuo e em larga escala das características fenotípicas de interesse. Esse acesso em tempo real a dados precisos e atualizados é de extrema importância para a análise fenômica, permitindo uma compreensão mais abrangente e detalhada do desempenho das plantas em resposta a diversos estímulos. Além disso, essas informações em tempo real fornecem *insights* valiosos para o ajuste de estratégias de seleção genética, possibilitando uma abordagem

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

mais precisa e adaptável ao processo de melhoramento genético. Dessa forma, a IoT também potencializa a equação do melhorista, elevando a precisão das decisões tomadas e impulsionando o desenvolvimento de variedades de plantas superiores em termos de produtividade, resistência a insetos-pragas e doenças, e adaptação a diferentes condições climáticas.

Procedimentos de Inteligência Artificial e *Machine Learning* (aprendizado de máquina), temas apresentados no capítulo 5, podem ser empregados para melhorar a acurácia da seleção, a previsão de características desejáveis e a tomada de decisões no processo de melhoramento. Algoritmos de aprendizado de máquina podem aprender a partir dos dados históricos e identificar padrões complexos, permitindo a identificação de genótipos promissores e a realização de seleção assistida por computador de forma mais precisa e eficiente. Essas tecnologias permitem analisar grandes volumes de dados genéticos e fenotípicos, identificar padrões complexos e fazer previsões precisas sobre o desempenho das plantas. Por meio do treinamento de algoritmos, a IA e o *Machine Learning* podem auxiliar na classificação de plantas com base em características desejáveis, na detecção de doenças ou estresses ambientais e na identificação de cruzamentos promissores. Isso agiliza o processo de seleção, tornando-o mais eficiente e permitindo a identificação de combinações genéticas com alto potencial de sucesso. Além disso, a IA e o *Machine Learning* também possibilitam a automação de tarefas rotineiras, como a análise de dados e a geração de relatórios, liberando tempo e recursos para os melhoristas se concentrarem em atividades estratégicas e de tomada de decisão.

As métricas fenotípicas e a análise fenômica, apresentadas no capítulo 9, desempenham um papel cada vez mais relevante na otimização da equação do melhorista, pois fornecem informações detalhadas e abrangentes sobre as características expressas pelas plantas. Para obter informações ainda mais detalhadas sobre as plantas, os melhoristas modernos recorrem ao uso de drones e sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto por meio de drones permite a captura de dados precisos e em alta resolução, tanto em nível macro (em perspectiva geográfica) quanto micro (em perspectivas de parcelas experimentais ou de organismo), ao monitorar de perto as plantas e seu ambiente. Essa abordagem proporciona uma visão abrangente das características fenotípicas, incluindo aspectos como altura, densidade de folhas, vigor e tolerância ao déficit hídrico. Também é possível identificar não apenas características visíveis, mas também variações relacionadas ao metabolismo, fisiologia e respostas relacionadas com a interação ambiental. Essas informações detalhadas são relevantes para compreender as relações entre o fenótipo e o genótipo, permitindo uma seleção mais precisa e embasada nas características desejadas. Além disso,

a análise fenômica possibilita a identificação de marcadores fenotípicos associados a características de interesse, acelerando o processo de seleção e melhorando a eficiência do melhoramento genético de plantas.

O Speed Breeding (SB) ou melhoramento acelerado, apresentado no capítulo 11, é uma abordagem inovadora no processo de melhoramento, combinando condições controladas de crescimento, indutores químicos e climatização ambiental para acelerar o florescimento e desenvolvimento das plantas. Isso permite obter múltiplas gerações em curto prazo, facilitando a seleção precoce de características desejáveis e reduzindo o tempo necessário para seleções sucessivas. O SB aumenta a eficiência do processo de melhoramento, impulsionando o desenvolvimento de variedades agrícolas superiores adaptadas a diferentes condições e necessidades. Na Figura 5 é mostrado o resultado da resposta dos participantes da enquete ao serem questionados sobre SB, estratificando-se por diferentes posições ocupacionais. Note-se que Líderes de Pesquisa, em especial de empresas privadas, têm maior conhecimento e experiência na aplicação dessas técnicas.

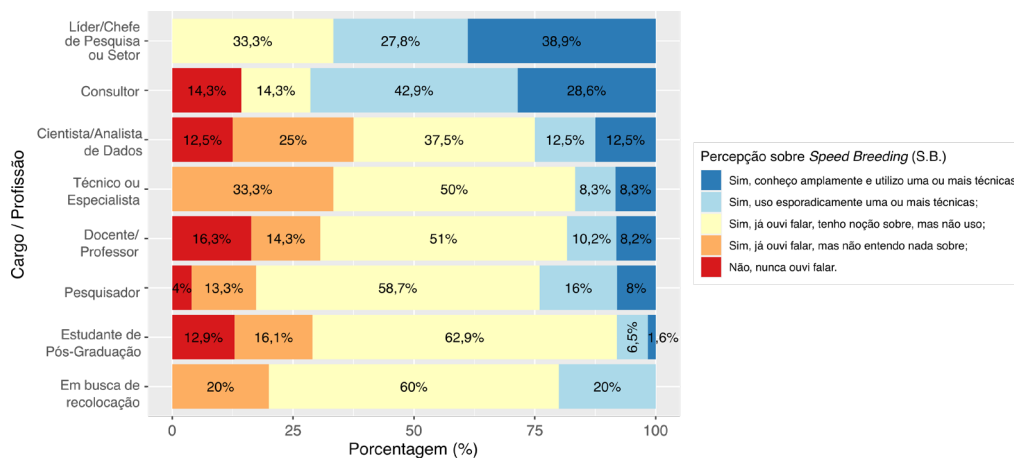


Figura 5. Percepção ou entendimento dos profissionais sobre Speed Breeding (SB). As respostas foram subdivididas entre possíveis cargos ou profissões dos entrevistados.

A bioinformática desempenha um papel importante na análise e interpretação dos dados genômicos, permitindo a identificação de locos candidatos e a compreensão de suas funções biológicas, ademais, auxilia diretamente no desenvolvimento de tecnologias de genotipagem, que hoje já fazem parte da rotina de melhoramento das instituições de sucesso no melhoramento vegetal. Essas informações genéticas e

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

genômicas, tema apresentado no capítulo 10, contribuem para aprimorar a seleção de plantas superiores e otimizar a equação do melhorista. Este livro abordará tanto o desenvolvimento de marcadores modernos via genotipagem de larga-escala, como a aplicação desses marcadores em complexos e eficientes modelos de seleção genômica ampla.

A edição gênica (capítulo 12), como parte da engenharia genética de precisão, juntamente com as novas tecnologias de melhoramento genético, apresenta um potencial revolucionário para otimizar a equação do melhorista. Por meio de técnicas avançadas, como CRISPR-Cas9, é possível realizar modificações precisas no genoma das plantas, permitindo alterar características específicas de maneira mais rápida e direta. Essas tecnologias têm o poder de acelerar significativamente o processo de melhoramento, possibilitando a geração mais eficiente de plantas com características desejáveis. No entanto, poucos entrevistados disseram fazer uso dessas ferramentas em sua rotina de trabalho (Figura 6), provavelmente devido a uma combinação de fatores, como restrições regulatórias, e limitações de acesso a recursos e tecnologias avançadas, e, eventualmente, restrições pessoais ao uso de organismos geneticamente editados. É importante promover discussões e buscar soluções para que as ferramentas de edição gênica possam ser mais amplamente adotadas no melhoramento genético de plantas, impulsionando assim a inovação e o avanço na agricultura.

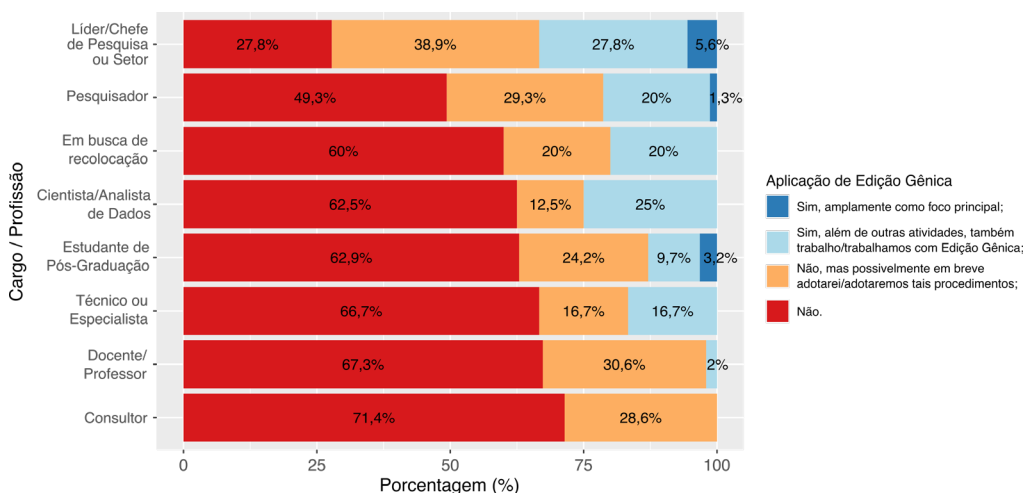


Figura 6. Aplicação de técnicas de Edição Gênica (engenharia genética de precisão) pelos profissionais de melhoramento genético de plantas. As respostas foram subdivididas entre possíveis cargos ou profissões dos entrevistados.

A integração de Sistemas de Informações Geográficas e técnicas de geoprocessamento também apresentam grande potencial na otimização da equação do melhorista, permitindo uma abordagem avançada conhecida como geoinformática. Por meio da análise de dados ambientais e da aplicação de modelos espaciais, é possível compreender a interação de genótipos com ambientes ($G \times A$) e identificar regiões ou ambientes específicos onde certos genótipos são mais adaptados. A análise ambientômica, apresentada no capítulo 8, combinada com a identificação de marcadores genéticos associados à adaptabilidade, oferece uma base sólida para a seleção de plantas com desempenho otimizado em diferentes condições ambientais (Resende et al., 2021). Dessa forma, o uso de técnicas de SIG potencializa a capacidade dos melhoristas em direcionar seus esforços de seleção, maximizando assim o ganho genético em ambientes variados e contribuindo para o desenvolvimento de variedades vegetais mais resilientes e adaptadas às demandas regionais.

Concatenando todas as áreas de conhecimento anteriores, tem-se uma gestão otimizada do programa de melhoramento genético, sendo fundamental para maximizar o potencial da equação do melhorista. Isso envolve a definição de objetivos claros, o planejamento estratégico das atividades de seleção e cruzamento, a alocação eficiente de recursos financeiros e a utilização adequada das ferramentas tecnológicas disponíveis. Uma gestão eficiente e otimizada garante que todas as etapas do processo de melhoramento sejam integradas de forma sinérgica, potencializando o ganho genético obtido.

Habilidades Tecnológicas analisadas conjuntamente

A partir das respostas dos profissionais a respeito da utilização das tecnologias incluídas no questionário, foi elaborado o índice de habilidades tecnológicas, obtido a partir da soma, por indivíduo, das tecnologias utilizadas considerando ferramentas tecnológicas (drones, técnicas de ambientipagem, *Next-Generation Sequencing* - NGS, Inteligência Artificial, CRISPR, Pesquisa Operacional, R, Python, Estatística Bayesiana, etc.). Os índices foram agrupados por Faixa Etária e Cargo ou Profissão (Figura 7) e por Tipo e segmento institucional (Figura 8).

O índice mostrou que profissionais com idades entre 31 e 45 anos apresentaram maior conhecimento e habilidades com as novas tecnologias apresentadas, e é um reflexo do contexto atual em que essas tecnologias estão se tornando cada vez mais integradas à rotina de trabalho no campo do melhoramento genético de plantas (Figura 7-A). Essa faixa etária pode ter sido exposta a essas tecnologias durante sua formação acadêmica ou posteriormente, permitindo-lhes adquirir habilidades e conhecimentos atualizados. É

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

importante ressaltar que isso não significa que profissionais mais jovens (21-30 anos) ou mais experientes (acima de 46 anos) não possuam habilidades relevantes ou estejam excluídos do uso dessas tecnologias. No entanto, é possível que profissionais mais jovens estejam em um estágio inicial de suas carreiras, ainda adquirindo experiência e aprofundando seus conhecimentos nessas áreas específicas, ou mesmo devido a currículos defasados de algumas universidades. Por outro lado, profissionais mais antigos podem ter tido menos exposição às tecnologias mais recentes por estarem em um estágio na carreira em que tal conhecimento não é exigido ou necessário. É possível ainda, verificar uma variação muito grande dentro de cada classe, mostrando que a faixa etária é apenas um dos fatores que influenciam nas habilidades tecnológicas.

Diante disso, é importante que seja oportunizado aos profissionais a educação continuada e o compartilhamento de conhecimentos entre profissionais de diferentes faixas etárias. A colaboração entre gerações pode enriquecer a aplicação dessas tecnologias no melhoramento genético de plantas, combinando a experiência e conhecimento dos profissionais mais experientes com a familiaridade e afinidade dos profissionais mais jovens com as tecnologias emergentes. Essa troca de conhecimentos e experiências contribui para a evolução e inovação contínuas no agronegócio, capacitando as equipes de melhoramento genético a aproveitarem todo o potencial dessas ferramentas para impulsionar os avanços na agricultura e atender às demandas crescentes por alimentos e demais insumos vegetais.

Os resultados da pesquisa também indicam que profissionais das ciências de dados (tema apresentado no capítulo 4) e líderes de pesquisa apresentaram maiores afinidades com as novas tecnologias apresentadas no questionário, o que é coerente com a natureza de suas atribuições profissionais e o contexto em que atuam (Figura 7-B). Profissionais das ciências de dados, por estarem diretamente envolvidos na análise e interpretação de informações complexas, estão mais familiarizados com a utilização de tecnologias avançadas, incluindo aquelas relacionadas ao melhoramento genético de plantas. Líderes de grupos de pesquisa também são frequentemente responsáveis por supervisionar projetos de pesquisa e desenvolvimento, o que exige conhecimento e compreensão das tecnologias mais recentes disponíveis. Além disso, eles têm um papel importante na promoção da inovação e adoção de novas abordagens em suas equipes de trabalho.

Por outro lado, docentes/professores, estudantes de pós-graduação, consultores e profissionais em busca de recolocação podem não ter a mesma exposição diária a essas tecnologias ou a mesma demanda em seus respectivos papéis. Docentes/professores podem estar mais focados na transmissão de conhecimentos gerais e fundamentos teóricos, enquanto estudantes de pós-graduação estão em um estágio

de aprendizado e aprofundamento de conceitos básicos, antes de se especializarem em áreas mais específicas. Consultores e profissionais em busca de colocação profissional podem não estar diretamente envolvidos em projetos de pesquisa ativos ou não terem acesso às mesmas oportunidades de atualização de habilidades. Ter conhecimento em melhoramento de precisão pode aumentar a chance de conseguir posições mais importantes e de maior responsabilidade, pois o gerenciamento nessa área requer um entendimento sólido dos princípios genéticos e moleculares subjacentes. Gerenciar um programa de melhoramento de precisão envolve liderar equipes de profissionais com especialidades distintas e complementares, e, portanto, é fundamental ter conhecimento para coordenar os esforços, estabelecer metas claras e garantir a execução eficiente das atividades do programa. Por fim, gerenciar um programa de melhoramento de precisão envolve ter uma visão estratégica para identificar oportunidades de melhoria de processos e inovação, bem como antecipar tendências e desafios futuros na área. A capacidade de desenvolver e implementar estratégias inovadoras para o melhoramento de precisão pode ser um grande diferencial de mercado e, com isso, abrir portas para empregos mais importantes e desafiadores.

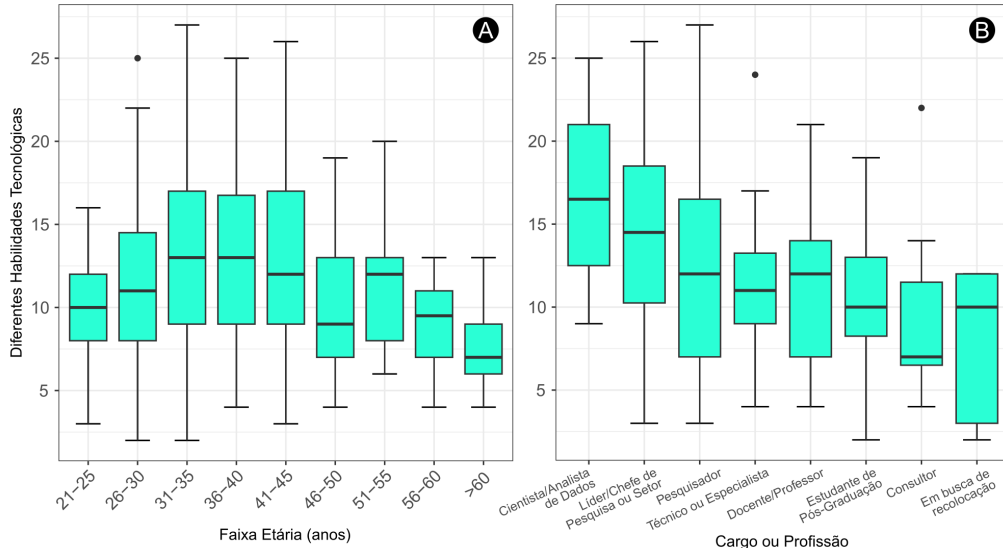


Figura 7. Boxplots mostrando a distribuição dos índices de Habilidades Tecnológicas (eixo y) entre diferentes atributos da pesquisa. Na parte **A** é mostrada a aptidão para diferentes habilidades tecnológicas de acordo com as diferentes idades dos respondentes da pesquisa. Na parte **B** é mostrada a aptidão para diferentes habilidades tecnológicas de acordo com as profissões (ou cargo ou posição) dos respondentes da pesquisa.

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

Integrações e parcerias entre universidades e empresas privadas foram abordadas, solicitando-se a percepção ou opinião dos participantes (Tabela 2). As respostas permitiam marcar até duas opções, incluindo: 1) parcerias para pesquisas de base sem ganhos operacionais diretos para as empresas; 2) parcerias com ganhos significativos para a(s) empresa(s); 3) parcerias sem contrapartida financeira ou com contrapartida mínima; 4) incentivo a muitas colaborações dessa natureza; 5) desaprovação devido ao alto custo e resultados insatisfatórios; 6) preferência pela realização exclusiva de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) pela empresa; e 7) avaliação cautelosa e imposição de restrições quando necessário.

Tabela 2. Percepção dos entrevistados sobre integrações/parcerias entre universidades com empresas privadas.

Percepção	Respostas	
Deveriam ser muito incentivadas. Há espaço/campo para muitas parcerias dessa natureza	197	82,77%
Deveriam ser feitas. Mesmo que apenas para pesquisas de base (sem ganhos operacionais diretos para as empresas)	91	38,24%
Estas parcerias devem ser avaliadas com muito cuidado, impondo-se restrições sempre que necessário	20	8,40%
Deveriam ser feitas. Porém, apenas se houver ganhos significativos para a(s) Empresa(s)	18	7,56%
Deveriam ser feitas. Porém, sem contrapartida financeira por parte da empresa, ou com contrapartida mínima	9	3,78%
Não deveriam ser feitas. Em geral, gasta-se muito dinheiro e raramente há resultados relevantes para ambas as partes	0	0,00%
Não deveriam ser feitas. Os profissionais/pesquisadores do quadro de funcionários da empresa devem atender toda demanda de P&D	0	0,00%

Com base nos resultados da pesquisa, observou-se que profissionais de instituições privadas demonstraram maior afinidade e proximidade com as novas tecnologias discutidas aqui, em comparação com profissionais de instituições públicas e profissionais autônomos (Figura 8-A). Essa diferença pode ser atribuída a diversos fatores, como o acesso a recursos e investimentos em tecnologia, a cultura organizacional voltada para a inovação e a ênfase na competitividade do mercado. Além disso, um paralelo interessante pode ser feito em relação aos setores de pesquisa, especialmente dentro dessas instituições privadas (Figura 8-B). É provável que esses setores estejam mais

envolvidos e tenham rotinas mais intensas com atividades tecnológicas devido à natureza de sua função, que requer constantes avanços científicos e tecnológicos para se manterem competitivos e atenderem às demandas do mercado.

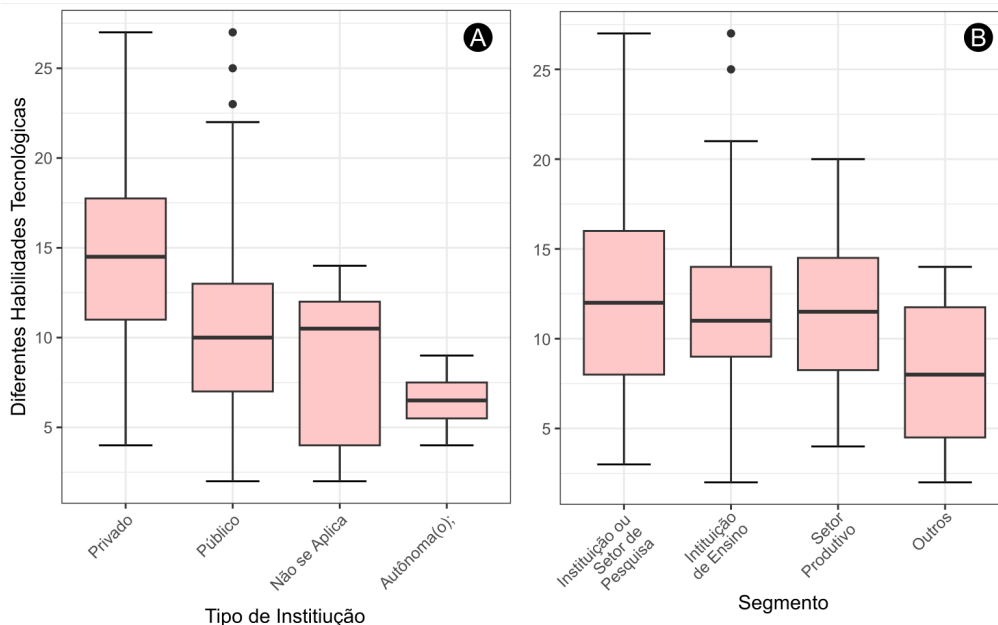


Figura 8. Boxplots mostrando a distribuição dos índices de Habilidades Tecnológicas (eixo y) entre diferentes atributos da pesquisa. Na parte A é mostrada a aptidão para diferentes habilidades tecnológicas de acordo com os diferentes tipos de instituição dos respondentes da pesquisa. Na parte B é mostrada a aptidão para diferentes habilidades tecnológicas de acordo com os segmentos institucionais dos respondentes da pesquisa.

No entanto, é importante ressaltar que essas observações são baseadas nos resultados específicos dessa pesquisa, e outras variáveis podem influenciar a relação entre o setor de atuação e a proximidade com as novas tecnologias. Mais estudos são necessários para aprofundar essa compreensão e considerar outros fatores que podem estar em jogo, como o nível de investimento em pesquisa e desenvolvimento, as políticas governamentais e o acesso a recursos tecnológicos.

Com base nos resultados, a maioria dos participantes (quase 83%) apoia fortemente as parcerias entre universidades e empresas privadas, reconhecendo seu potencial e importância. Cerca de 38,3% concordam que as parcerias podem ser feitas para pesquisas de base, mesmo sem benefícios operacionais diretos. Uma minoria (7,6%)

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

destaca a necessidade de ganhos significativos para as empresas, enquanto outros (8,4%) enfatizam a importância da avaliação cuidadosa e da imposição de restrições, quando apropriado. Não houve participantes que se opuseram às parcerias ou acreditassem que a empresa deveria assumir toda a responsabilidade por P&D, o que sugere um amplo apoio à colaboração entre universidades e empresas privadas para impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento.

As universidades brasileiras têm o potencial para formar profissionais aptos para o melhoramento de precisão, por fornecer conhecimentos teóricos e práticos em áreas relevantes, como genética, biologia molecular, estatística, dentre outras. Contudo, é importante ressaltar que as habilidades específicas em melhoramento de precisão, como o uso de técnicas moleculares avançadas e ferramentas de genômica, geralmente requerem um treinamento adicional e prática diária. Nesse sentido, instituições como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e outros centros de pesquisa e desenvolvimento no Brasil desempenham um papel importante na formação de profissionais em diversas áreas, incluindo melhoramento de precisão. Por meio de programas de treinamento, workshops, cursos e colaborações, a Embrapa e outras instituições de pesquisa podem fornecer aos profissionais a oportunidade de adquirir habilidades práticas e conhecimentos especializados em melhoramento de precisão. Por fim, é importante destacar que o aprendizado contínuo e o acompanhamento dos avanços tecnológicos e científicos são essenciais para se manter atualizado em melhoramento de precisão, uma vez que técnicas e ferramentas estão em constante evolução.

O Brasil tem presença significativa e reconhecida na área de melhoramento de plantas, e possui instituições de pesquisa e universidades renomadas em ciências agrícolas, as quais contribuem para os avanços científicos e tecnológicos nessa área. No Brasil, existem professores e pesquisadores qualificados e experientes em melhoramento genético, alguns já com trabalhos em melhoramento de precisão, e, desse modo, o Brasil já possui expertise para ampliar e disseminar o conhecimento na área. No entanto, é importante observar que, dependendo do nível de especialização e das necessidades específicas, alguns pesquisadores brasileiros podem buscar oportunidades de treinamento e colaborações internacionais para aprimorar suas habilidades em melhoramento de precisão.

Considerações Finais

Os avanços tecnológicos e as novas ferramentas estão revolucionando o campo do melhoramento genético de plantas. Como foi observado ao longo da discussão

baseada nos resultados do questionário, ficou evidente o potencial transformador dessas tecnologias na otimização da equação do melhorista. A partir da integração de técnicas, como a edição gênica, sistemas de informações geográficas, bioinformática e o uso de *big data*, os profissionais em melhoramento genético vegetal têm acesso a uma gama cada vez maior de informações genéticas e fenotípicas. Isso possibilita a identificação precisa de características-chave, a compreensão de suas relações com o genótipo e a seleção mais eficiente de plantas superiores. Além disso, a incorporação de novas abordagens, como o Speed Breeding, o uso de drones e o sensoriamento remoto, proporciona a coleta de dados em tempo real sobre as plantas em diferentes ambientes e condições. Isso amplia o conhecimento sobre as características fenotípicas relevantes e permite o ajuste de estratégias de seleção, resultando em um ganho genético mais significativo. No entanto, é importante ressaltar que a adoção dessas tecnologias não se limita apenas à atualização do conhecimento. A capacitação e a formação contínua dos profissionais são fundamentais para aproveitar ao máximo essas ferramentas e promover um melhoramento genético de sucesso.

Apesar dos progressos, é necessário um cuidado na interpretação dos resultados da pesquisa, pois existem variáveis adicionais que podem influenciá-los, como a demanda do mercado de trabalho e a competitividade geral do setor. Portanto, mais estudos são necessários para uma compreensão abrangente e precisa das relações entre as novas tecnologias e as diferentes categorias de profissionais. Em conclusão, as inovações tecnológicas discutidas neste capítulo têm o potencial de impulsionar o campo do melhoramento genético de plantas, permitindo a seleção mais precisa, eficiente e adaptada às necessidades específicas. A atualização constante e a incorporação dessas ferramentas prometem avanços significativos no desenvolvimento de cultivares superiores, contribuindo para a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola, diante de um cenário de aumento de risco devido às mudanças climáticas atuais e futuras.

Este livro apresenta doze capítulos que, no nosso entendimento, fazem parte do que consideramos atualmente “melhoramento de precisão”. Esta obra foi pensada para alcançar interessados com nível de formação variado, desde estudantes de graduação até profissionais atuantes em melhoramento. Para facilitar a compreensão e entendimento, esta obra foi elaborada em língua portuguesa, fornecendo um panorama geral das áreas abordadas, e informações que permitem que quem quiser se aprofundar no tema de interesse, terá condições de fazê-lo. Esperamos com isso contribuir para que os profissionais possam conhecer e trazer esse conhecimento para o seu dia a dia, e melhorar o resultado de seu trabalho. Para atuar em melhoramento de precisão, o profissional deve adquirir conhecimentos e habilidades adicionais relacionados a

■ Melhoria de precisão: aplicações e perspectivas na genética...

técnicas moleculares, análise de dados obtidos pelas ômicas, e dominar ferramentas avançadas de melhoria genética. Em adição, estudantes de graduação, ao tomarem conhecimento de áreas de estudo até então desconhecidas para eles, poderão eventualmente vir a se especializar naquelas que despertaram curiosidade e afinidade, dando início a uma nova geração de profissionais que irão promover o desenvolvimento do nosso país. Tenham todos uma ótima leitura e resultados!

Referências

- AFZAL, H.; KAMRAN, A.; NOREEN, A. Survival analysis of Python and R within the job market trend. **Journal of Information Technology and Computing**, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48185/jitc.v1i1.94>.
- BERNARDO, R. Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something BLUE. **Heredity**, v. 125, n. 6, p. 375-385, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0312-1>.
- CARENA, M. J.; HALLAUER, A. R.; MIRANDA-FILHO, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. 664 p.
- CLEMENT, C. R. Melhoria de espécies nativas. In: NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (ed.). **Recursos genéticos e melhoria- plantas**. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. p. 423-441.
- COBB, J. N.; JUMA, R. U.; BISWAS, P. S.; ARBELAEZ, J. D.; RUTKOSKI, J.; ATLIN, G.; HAGEN, T.; QUINN, M.; NG, E. H. Enhancing the rate of genetic gain in public-sector plant breeding programs: lessons from the breeder's equation. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 132, p. 627-645, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03317-0>.
- CROSSA, J.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MONTESINOS-LOPEZ, O. A.; COSTA-NETO, G.; DREISIGACKER, S.; MONTESINOS-LOPEZ, A.; BENTLEY, A. R. The modern plant breeding triangle: optimizing the use of genomics, phenomics, and enviromics data. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 651480, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.651480>.
- FERNIE, A. R.; YAN, J. *De novo* domestication: an alternative route toward new crops for the future. **Molecular Plant**, v. 12, n. 5/6, p. 615-631, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2019.03.016>.
- HICKEY, L. T.; HAFEEZ, A. N.; ROBINSON, H.; JACKSON, S. A.; LEAL-BERTIOLI, S. C. M.; TESTER, M.; GAO, C.; GODWIN, I. D.; HAYES, B. J.; WULFF, B. B. H. Breeding crops to feed 10 billion. **Nature Biotechnology**, v. 37, p. 744-754, July 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0152-9>.
- HUMMER, K. E.; HANCOCK, J. F. Vavilovian centers of plant diversity: implications and impacts. **HortScience**, v. 50, n. 6, p. 780-783, Jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.6.780>.
- NAJAFABADI, M. Y.; HESAMI, M.; ESKANDARI, M. Machine learning-assisted approaches in modernized plant breeding programs. **Genes**, v. 14, 777, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes14040777>.
- PEARSON, S.; CAMACHO-VILLA, T. C.; VALLURU, R.; GAJU, O.; RAI, M. C.; GOULD, I.; BREWER, S.; SKLAR, E. Robotics and autonomous systems for net zero agriculture. **Current Robotics Reports**, v. 3, n. 2, p. 57-64, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00077-6>.
- RAMALHO, M. A. P.; MARQUES, T. L.; LEMOS, R. C. Plant breeding in Brazil: retrospective of the past 50 years. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, e383021S3, May/June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21Sa16>.

RESENDE, R. T.; PIEPHO, H.-P.; ROSA, G. J. M.; SILVA-JUNIOR, O. B.; SILVA, F. F.; RESENDE, M. D. V.; GRATTAPAGLIA, D. Enviromics in breeding: applications and perspectives on envirotypic-assisted selection. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, p. 95-112, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03684-z>.

REYNOLDS, D.; BARET, F.; WELCKER, C.; BOSTROM, A.; BALL, J.; CELLINI, F.; LORENCE, A.; CHAWADE, A.; KHAFIF, M.; NOSHITA, K.; MUELLER-LINOW, M.; ZHOU, J.; TARDIEU, F. What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. **Plant Science**, v. 282, p. 14-22, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.015>.

STANTON J. M. Galton, Pearson, and the Peas: a brief history of linear regression for statistics instructors. **Journal of Statistics Education**, v. 9, n. 3, p. 1-13, Jan. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1080/10691898.2001.11910537>.

VAN EEUWIJK, F. A.; BUSTOS-KORTS, D. V.; MALOSETTI, M. What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype× environment interactions? **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2119-2140, Sept./Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0375>.

VARSHNEY, R. K.; BOHRA, A.; YU, J.; GRANER, A.; ZHANG, Q.; SORRELLS, M. E. Designing future crops: genomics-assisted breeding comes of age. **Trends in Plant Science**, v. 26, n. 6, p. 631-649, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.010>.

WALLACE, J. G.; RODGERS-MELNICK, E.; BUCKLER, E. S. On the road to breeding 4.0: unraveling the good, the bad, and the boring of crop quantitative genomics. **Annual Review of Genetics**, v. 52, p. 421-444, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120116-024846>.

WICKHAM, H. **Ggplot2**: elegant graphics for data analysis. 2nd ed. New York: Springer, 2016. p. 241-253.