



CURSO DE BACHAREL EM AGRONOMIA

A CULTURA DO SORGO (*SORGHUM BICOLOR L. MOENCH*): UMA REVISÃO SOBRE BOTÂNICA, MELHORAMENTO GENÉTICO E PRÁTICAS AGRONÔMICAS

José Wellington Gomes Cavalcante Mota

Rio Verde – GO

2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE.
BACHAREL EM AGRONOMIA**

**A CULTURA DO SORGO (*SORGHUM BICOLOR L. MOENCH*):
UMA REVISÃO SOBRE BOTÂNICA, MELHORAMENTO GENÉTICO
E PRÁTICAS AGRONÔMICAS**

JOSÉ WELLINGTON GOMES CAVALCANTE MOTA

Trabalho de Curso Apresentado ao Instituto
Federal Goiano – Campus Rio Verde, como
requisito parcial para a obtenção do Grau de
Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Higino de Lima

Rio verde – GO

2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

G633 Gomes Cavalcante Mota, José Wellington
 A cultura da sorgo (*Sorgum bicolor* L. Moencher): uma revisão
 sobre bôtanica, melhoramento genético e práticas agrônomicas /
 José Wellington Gomes Cavalcante Mota. Rio Verde 2026.

 35f. il.

 Orientador: Prof. Dr. Fernando Higino de Lima.
 Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
 Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
 Verde).
 1. Densidade de plantas. 2. manejo agrônômico. 3. melhoramento
 genético. 4. sorghum bicolor. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local

/ /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos vinte dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis, às 16 horas e 30 minutos, reuniu-se, via Google Meet, a Banca Examinadora composta por: Prof. Fernando Higino de Lima e Silva (orientador e presidente da banca), Prof. Wilker Alves Moraes (membro interno) e a Dra. Jakeline Fernandes Cabral (membra externa - Sementes Goiás), para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado "A CULTURA DO SORGO (*Sorghum Bicolor* L. MOENCH): UMA REVISÃO SOBRE BOTÂNICA, MELHORAMENTO GENÉTICO E PRÁTICAS AGRONÔMICAS", de José Wellington Gomes Cavalcante Mota, estudante do curso de Bacharelado em Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob matrícula nº 2020102200240355. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 20 de fevereiro de 2026.

Fernando Higino de Lima e Silva (Orientador)

Presidente da Banca Examinadora

Wilker Alves Moraes

Membro da Banca Examinadora

Jakeline Fernandes Cabral

Membra da Banca Examinadora

Pablo da Costa Gontijo

Mediador de TC

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fernando Higino de Lima e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 24/02/2026 04:48:47.
- **Jakeline Fernandes Cabral**, 2021102200240610 - Discente, em 24/02/2026 08:02:21.
- **Wilker Alves Moraes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 24/02/2026 21:09:27.
- **Pablo da Costa Gontijo**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 25/02/2026 10:21:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/02/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 790865

Código de Autenticação: 3f3b818a90



AGRADECIMENTOS

Venho, primeiramente, agradecer a Deus pelas infinitas oportunidades concedidas diariamente e pelos ensinamentos constantes que fortaleceram minha fé, minha perseverança e minha caminhada ao longo desta trajetória acadêmica. Reconheço que cada desafio enfrentado foi também uma oportunidade de crescimento, amadurecimento e superação.

Agradeço à minha família, base sólida da minha formação humana e profissional e, de maneira muito especial, à minha noiva, Ludimila, minha maior incentivadora e companheira de todas as horas. Seu apoio, compreensão e incentivo foram fundamentais para que eu persistisse nos momentos difíceis. Sem ela, muitas das minhas conquistas não teriam o mesmo significado nem o mesmo valor.

Expresso minha sincera e eterna gratidão ao Professor Fernando Higino pela orientação dedicada, pela confiança depositada em mim e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho. Agradeço também aos membros da banca examinadora, Professor Wilker e Jakeline Fernandes, pela disponibilidade, contribuições técnicas e considerações que enriqueceram significativamente esta pesquisa.

De forma ampla, agradeço a todos que fizeram parte desta jornada de formação. Cada pessoa que cruzou meu caminho contribuiu com ensinamentos, valores e diferentes perspectivas, demonstrando que a amplitude de visão e o aprendizado contínuo são essenciais para que possamos galgar degraus cada vez maiores, tanto na vida acadêmica quanto na vida pessoal.

Encerrando esta etapa com humildade e gratidão, reafirmo minha fé nas palavras que sempre me sustentaram nos momentos de dúvida e incerteza, conforme está escrito no Salmo 121:1-2:

*" Elevo os meus olhos para os montes; de onde me virá o socorro?
O meu socorro vem do Senhor, que fez o céu e a terra."*

RESUMO

Mota, José Wellington Gomes Cavalcante. **A cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L. moench): uma revisão sobre botânica, melhoramento genético e práticas agronômicas**. 2026. 35p Monografia (Curso Bacharelado em Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) destaca-se como cultura de elevada importância agrônômica em regiões tropicais e subtropicais, em virtude de sua tolerância ao déficit hídrico e ao estresse térmico. No Brasil, consolidou-se como alternativa estratégica ao milho na segunda safra, especialmente no Cerrado, devido à sua maior estabilidade produtiva em condições de restrição hídrica. Além de sua relevância para a produção de grãos, forragem e bioenergia, o sorgo desempenha papel fundamental no abastecimento das cadeias de ração animal, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão de literatura científica sobre a cultura do sorgo, abordando sua origem, aspectos botânicos, morfofisiológicos e fenológicos, bem como os avanços no melhoramento genético e a relevância do manejo agrônômico. A metodologia consistiu em pesquisa qualitativa, fundamentada na análise de artigos científicos e documentos técnicos nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam que a evolução dos métodos de melhoramento, com a consolidação da produção de híbridos e a incorporação de ferramentas como seleção assistida por marcadores, seleção genômica e edição gênica, tem promovido ganhos expressivos em produtividade, adaptabilidade e resistência a estresses bióticos e abióticos. Observou-se ainda que o manejo adequado da densidade populacional e do espaçamento entre plantas influencia diretamente a interceptação de radiação solar, a competição intraespecífica e a expressão do potencial produtivo. Conclui-se que a integração entre melhoramento genético e práticas agronômicas baseadas em evidências científicas é essencial para a expansão sustentável da cultura do sorgo nos sistemas agrícolas brasileiros.

Palavras-chave: Densidade de plantas; manejo agrônômico; melhoramento genético; *sorghum bicolor*.

ABSTRACT

Mota, José Wellington Gomes Cavalcante **Sorghum (*Sorghum bicolor* L. moench): a review of botany, genetic improvement, and agronomic practices**. 2026. 35p Monografia (Curso Bacharelado em Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) stands out as a crop of high agronomic importance in tropical and subtropical regions due to its tolerance to water deficit and heat stress. In Brazil, it has been consolidated as a strategic alternative to maize in the second growing season, especially in the Cerrado region, owing to its greater yield stability under limited water availability. In addition to its relevance for grain, forage, and bioenergy production, sorghum plays a key role in supplying the animal feed industry, contributing to the sustainability of agricultural systems. This study aimed to conduct a scientific literature review on sorghum, addressing its origin, botanical, morphophysiological, and phenological aspects, as well as advances in genetic improvement and the importance of agronomic management. The methodology consisted of a qualitative research approach based on the analysis of national and international scientific articles and technical documents. The results indicate that the evolution of breeding methods, including the consolidation of hybrid development and the incorporation of tools such as marker-assisted selection, genomic selection, and gene editing, has led to significant gains in productivity, adaptability, and resistance to biotic and abiotic stresses. Furthermore, appropriate management of plant density and row spacing directly influences solar radiation interception, intraspecific competition, and the expression of yield potential. It is concluded that the integration of genetic improvement and evidence-based agronomic practices is essential for the sustainable expansion of sorghum cultivation in Brazilian agricultural systems.

Keywords: Plant density; agronomic management; genetic improvement; *Sorghum bicolor*.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Características morfológicas da cultura do sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	11
FIGURA 2 - Ciclo da cultura do sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	12
FIGURA 3 - Sugestões para regulação de equipamentos de plantio de acordo com diferentes tipos comerciais de sorgo, seus usos e seus espaçamentos recomendados.....	23
FIGURA 4 - Estrutura do dossel de sorgo sob condições de alta densidade populacional, evidenciando maior fechamento do dossel, maior competição por luz e redução do espaço Inter planta.....	24
FIGURA 5 - Comparação entre espaçamentos reduzidos e convencionais na cultura do sorgo, destacando diferenças no arranjo espacial, no fechamento do dossel e na distribuição da radiação fotossintética ativa.....	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Métodos de melhoramento genético do sorgo e suas principais características.....	18
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	Botânica, morfologia e fenologia do sorgo.....	13
3.	MELHORAMENTO GENÉTICO DO SORGO.....	16
3.1	Seleção massal.....	16
3.2	Seleção pedigree.....	17
3.3	Seleção recorrente.....	18
3.4	Cruzamento dialético.....	19
3.5	Macho - esterelidade citoplásmica (CMs).....	19
3.6	Linhagem A, B e R.....	20
3.7	Emasculação manual.....	20
4.	TÉCNICAS MODERNAS E BIOTECNOLÓGICAS DE MELHORAMENTO.....	21
4.1	Seleção assistida por marcadores.....	21
4.2	Seleção genômica.....	21
4.3	Edição gênica (CRISPR/Cas.....	22
4.4	Tabela comparativa dos métodos de melhoramento.....	23
5.	METODOLOGIA.....	24
6.	HÍBRIDOS DE SORGO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	24
7.	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA EM CAMPO: DENSIDADE, ESPAÇAMENTO E ARRANJO DE PLANTAS NO SORGO.....	26
8.	IMAGENS REPRESENTATIVAS DO MANEJO DE DENSIDADE EM SORGO.....	28
9.	CONCLUSÃO.....	30
10.	REFERÊNCIAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é considerado o quinto cereal mais importante do mundo, amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais pela sua elevada tolerância a estresses bióticos e abióticos, notadamente à seca e altas temperaturas (MURPHY et al., 2024). Essa rusticidade confere ao sorgo um papel estratégico em sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em cenários de mudanças climáticas, nos quais culturas tradicionais como milho e trigo têm apresentado maiores vulnerabilidades (SINGH et al., 2023). Além de ser base alimentar em diversos países da África e Ásia, sua versatilidade permite a utilização tanto para ração animal quanto para bioenergia, consolidando-o como um cultivo de múltipla finalidade (GAO et al., 2022).

No contexto brasileiro, a cultura do *Sorghum bicolor* tem ampliado sua relevância estratégica, especialmente como alternativa viável na segunda safra nas regiões do Cerrado. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025), na safra 2024/25 o Brasil registrou produção próxima a 5 milhões de toneladas, representando incremento de aproximadamente 11% em relação ao ciclo anterior. Esse crescimento reflete tanto a estabilidade produtiva da cultura quanto sua inserção consolidada em sistemas agrícolas de sucessão, particularmente após a colheita da soja.

Ainda segundo a CONAB (2025), a área cultivada na referida safra superou 1,1 milhão de hectares, com produtividade média nacional próxima de 3.000 kg ha⁻¹, variando conforme condições edafoclimáticas e nível tecnológico empregado. Nesse cenário, o estado de Goiás consolidou-se como principal produtor nacional, sendo responsável por cerca de 30% da produção brasileira, seguido por Minas Gerais, com aproximadamente 24%.

Esses indicadores evidenciam a importância econômica do sorgo para o abastecimento do mercado interno, especialmente como insumo estratégico na formulação de rações para aves e suínos, cadeias produtivas que sustentam parcela significativa do agronegócio brasileiro (CONAB, 2025).

A expansão do sorgo no Cerrado está diretamente associada à sua maior tolerância ao déficit hídrico quando comparado ao milho safrinha. Enquanto o milho apresenta elevada sensibilidade à restrição hídrica durante os estádios de florescimento e enchimento de grãos, o sorgo demonstra maior eficiência no uso da água, com necessidade hídrica total variando entre 350 e 600 mm ao longo do ciclo (SINGH et al., 2023; ZHANG et al., 2024). Essa característica confere maior estabilidade produtiva em semeaduras realizadas entre fevereiro e março, período marcado pela redução progressiva da precipitação no Cerrado brasileiro.

A crescente expansão da cultura também se relaciona à sua adaptabilidade frente às mudanças climáticas. Modelos recentes de simulação sugerem que, embora o sorgo seja mais tolerante do que outras gramíneas cultivadas, o aquecimento global poderá reduzir sua produtividade em até 15% nas próximas décadas, caso estratégias de manejo e melhoramento genético não sejam intensificadas (ZHANG et al., 2024). A superioridade do sorgo em ambientes áridos e quentes, como o Cerrado brasileiro, é amplamente confirmada por pesquisas recentes, destacando-se não apenas pela economia hídrica, mas pela robusta tolerância térmica e capacidade de manter a estabilidade metabólica sob estresse, conforme estudos indicados (PRASAD et al., 2025).

Nos últimos anos, o melhoramento genético do sorgo tem desempenhado um papel central na ampliação de sua importância econômica e agrônômica. A utilização de híbridos de alta performance possibilitou ganhos consistentes em rendimento, qualidade nutricional e resistência a estresses bióticos e abióticos (ARUNA et al., 2021). Atualmente, programas de melhoramento têm incorporado ferramentas modernas, como a seleção assistida por marcadores moleculares (MAS), a seleção genômica (GS) e a edição gênica por CRISPR/Cas9, visando acelerar o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições adversas, como seca prolongada e baixa fertilidade dos solos (LIANG et al., 2024). Além disso, estratégias de biofortificação vêm sendo aplicadas com foco na melhoria da digestibilidade das proteínas e no aumento da biodisponibilidade de micronutrientes essenciais, como ferro e zinco (ZHANG et al., 2023).

Esses avanços tornam o sorgo uma cultura promissora não apenas para o agronegócio, mas também para a segurança alimentar global, especialmente em regiões vulneráveis às mudanças climáticas. A combinação entre práticas agrônômicas otimizadas e inovações biotecnológicas no melhoramento contribui para que a cultura continue expandindo sua participação tanto no mercado interno quanto no cenário internacional (BALOCH et al., 2023).

O avanço do melhoramento genético refletiu-se também na diversificação de cultivares disponíveis no mercado, especialmente na forma de híbridos adaptados a diferentes ambientes e finalidades de uso. No Brasil, programas públicos e privados têm disponibilizado híbridos graníferos, forrageiros e de duplo propósito, atendendo tanto à demanda da pecuária leiteira e de corte quanto à produção de grãos para ração e bioenergia (PEREIRA FILHO et al., 2021). Entre as cultivares graníferas, destacam-se híbridos com alto potencial produtivo, resistência ao acamamento e tolerância a pragas, fatores determinantes para regiões de Cerrado (CONAB, 2025).

Já os híbridos forrageiros e de silagem apresentam maior teor de biomassa e digestibilidade, sendo amplamente utilizados na alimentação de ruminantes em sistemas intensivos (FERREIRA et al., 2023). No mercado internacional, empresas de sementes vêm investindo em híbridos biofortificados e resistentes a doenças como o míldio e o carvão-do-sorgo, além de materiais adaptados ao cultivo em sistemas de baixo aporte de insumos (BALOCH et al., 2023). Essa diversidade de cultivares demonstra a capacidade do sorgo em atender múltiplos segmentos produtivos, reforçando sua posição como cultura estratégica para a agricultura moderna.

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão de literatura científica sobre a cultura do sorgo, abordando sua origem, aspectos botânicos, morfofisiológicos e fenológicos, bem como os avanços no melhoramento genético e a relevância do manejo agrônomo.

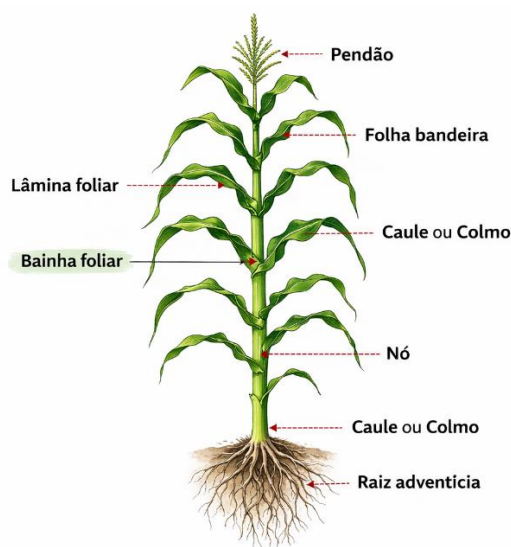
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Botânica, morfologia e fenologia do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), pertencente à família Poaceae, é uma gramínea de grande importância econômica e científica, caracterizada por sua elevada rusticidade e capacidade de adaptação a diferentes ambientes edafoclimáticos. Sua domesticação remonta a aproximadamente 5.000 anos no nordeste da África, de onde se dispersou para a Ásia, Europa e Américas (MURPHY et al., 2024). Trata-se de uma espécie de ciclo anual, predominantemente cultivada para produção de grãos, forragem e bioenergia, mas que também apresenta variedades perenes utilizadas em regiões tropicais (SINGH et al., 2023).

Morfológicamente, o sorgo é uma planta herbácea ereta, com altura variando entre 0,5 e 5,0 metros, dependendo do genótipo e das condições ambientais (PEREIRA FILHO et al., 2021). O caule, geralmente sólido, pode apresentar diâmetro entre 1 e 5 cm e elevado teor de açúcares em cultivares de sorgo sacarino, sendo esse atributo na produção de etanol (FERREIRA et al., 2023). Suas folhas são largas, lanceoladas, com comprimento médio de 30 a 135 cm, e exibem nervura central bem-marcada, semelhante ao milho, porém com maior capacidade de enrolamento em resposta à seca, um mecanismo fisiológico de adaptação (GAO et al., 2022).

Figura 1: Características morfológicas da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.).



Fonte: Elaborado por Inteligência Artificial (2026).

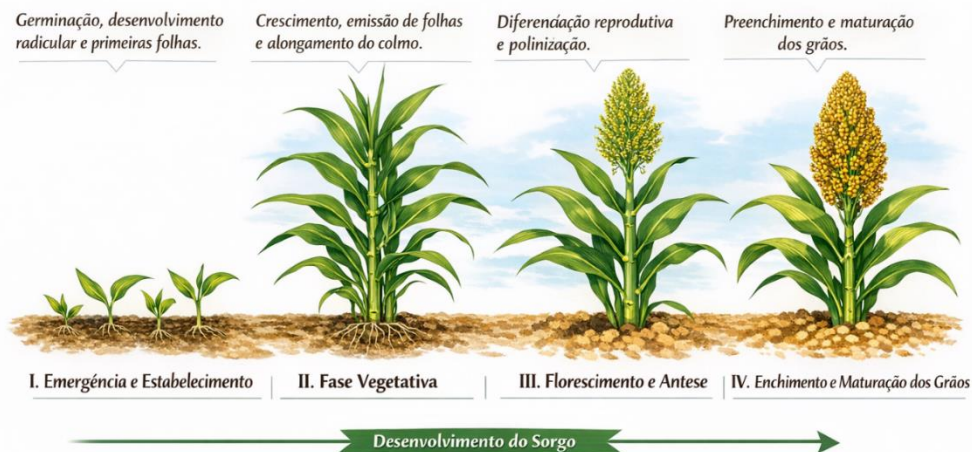
O sistema radicular do sorgo é considerado profundo e vigoroso, podendo atingir até 2 metros de profundidade em solos bem estruturados, o que confere maior eficiência na exploração de água e nutrientes, tornando-o mais tolerante a estresses hídricos quando comparado a outras gramíneas (ZHANG et al., 2024). Além disso, essa característica favorece a ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas de baixa fertilidade, sendo uma das razões para sua adoção crescente em áreas de Cerrado no Brasil (CONAB, 2025).

A inflorescência do sorgo é uma panícula terminal que pode variar de compacta a aberta, dependendo do tipo de cultivar. Cada panícula pode conter de 1.000 a 4.000 grãos, pequenos (2 a 4 mm), esféricos a ovais, com coloração que varia entre branco, vermelho, marrom e arroxado, de acordo com o genótipo e a presença de taninos (BALOCH et al., 2023). Essa variação genética influencia diretamente tanto a qualidade nutricional quanto a aceitabilidade do grão para consumo humano e animal.

No que se refere à fenologia, o ciclo do sorgo é classificado como curto a médio, variando de 90 a 150 dias entre a emergência e a maturação fisiológica, dependendo do híbrido e do ambiente (MURPHY et al., 2024). O desenvolvimento da cultura é fortemente influenciado pela fotoperiodicidade, embora os materiais comerciais disponíveis atualmente sejam majoritariamente de dias neutros, permitindo maior flexibilidade de cultivo em diferentes regiões (ARUNA et al., 2021). Em geral, o ciclo fenológico do sorgo é dividido em quatro estádios principais: emergência e estabelecimento, fase vegetativa, florescimento, e enchimento e maturação dos grãos (ZHANG et al., 2023).

Figura 2: Ciclo da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

Ciclo Fenológico do Sorgo



Fonte: Canva (2026).

3. MELHORAMENTO GENÉTICO DO SORGO

O melhoramento genético do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) passou por uma evolução expressiva ao longo do último século, partindo de práticas empíricas e avançando para abordagens complexas baseadas em genética quantitativa, biotecnologia e genômica. Os primeiros estudos sistematizados de diversidade, origem e classificação racial do sorgo foram desenvolvidos por Harlan e De Wet (1972), que reconheceram a África como centro primário de domesticação e destacaram a importância da variabilidade genética para programas de melhoramento. Esses trabalhos iniciais forneceram os fundamentos conceituais para a domesticação dirigida, introdução de germoplasma e estabelecimento das bases para o melhoramento moderno. Dentre as várias técnicas e métodos utilizados para o processo de melhoramento do sorgo, apresentam-se a seguir os que apresentam maior expressividade dentro da cultura, além de trazer técnicas novas contribuem para o melhor condicionamento e melhoramento dos materiais.

3.1. Seleção massal

A seleção massal (SM) constitui o método mais antigo empregado no melhoramento do sorgo e demais plantas, e foi amplamente utilizada antes da consolidação da genética mendeliana. Nesse método, plantas fenotipicamente superiores são escolhidas dentro de

populações heterogêneas, e seu conjunto de sementes é utilizado para formar a geração subsequente. Essa estratégia foi fundamental nos primeiros anos de expansão da cultura, especialmente em sistemas tradicionais de cultivo, nos quais agricultores selecionavam, de forma empírica, plantas com maior produtividade ou melhor adaptação às condições locais. A natureza autógama do sorgo facilitou consideravelmente a eficácia inicial dessa abordagem.

No entanto, com o avanço da agronomia e da genética quantitativa, tornou-se evidente que a seleção massal apresentava limitações importantes. Características de baixa herdabilidade, como produtividade e tolerância à seca, não respondiam eficientemente ao processo, pois dependem de múltiplos genes e sofrem intensa influência ambiental. Assim, a seleção massal tornou-se mais útil como ferramenta de pré-melhoramento ou para conservação de germoplasma do que como estratégia principal de ganho genético.

Apesar dessas limitações, a seleção massal desempenhou papel essencial na formação das primeiras variedades melhoradas e permitiu a adaptação inicial da cultura em novas regiões, incluindo o Cerrado brasileiro. Em países da África e da Ásia, esse método foi amplamente utilizado para selecionar plantas com maior produtividade em ambientes de sequeiro, resistência ao acamamento e ciclo precoce, resultando na formação de variedades como os tipos *Caudatum* e *Durra*, amplamente cultivados em ambientes semiáridos.

Na Índia, cultivares tradicionais de sorgo granífero foram estabilizadas através de seleção massal repetida, aprimorando tolerância ao estresse hídrico e uniformidade de colheita. Embora simples, esse método forneceu a base genética inicial para programas formais de melhoramento que surgiram décadas depois, servindo como ponto de partida para desenvolvimento de linhagens em instituições como ICRISAT. De modo geral, estudos como os de Harlan e De Wet (1972) mostram que populações tradicionais melhoradas por esse método foram a base para programas modernos de linhagens e híbridos.

3.2. Seleção pedigree

A seleção pedigree representa um avanço significativo em relação à seleção massal, pois permite controle genético mais apurado do processo de melhoramento. O método consiste na realização de cruzamentos intencionais entre genitores superiores, seguida da seleção de progênie ao longo de gerações segregantes, com registro detalhado da genealogia. Esse controle genealógico torna possível a identificação precisa de linhagens promissoras, destinadas ao desenvolvimento de híbridos ou à formação de novos parentais.

No sorgo, a seleção pedigree demonstrou elevado potencial para a fixação de características complexas, como tolerância ao alumínio, resistência à seca e melhor qualidade de grãos. Isso foi possível especialmente após o aprofundamento da genética da cultura, como demonstrado por Magalhães et al. (2007), ao identificarem o gene SbMATE, responsável pela tolerância ao alumínio utilizado principalmente em cultivares adaptadas ao Cerrado. Além disso, programas de pedigree deram origem às primeiras linhagens com tolerância aprimorada à seca, explorando fenótipos como *stay-green* e estrutura de folhas mais eretas. Híbridos amplamente utilizados no Brasil, como BRS 330 e BRS 373, foram desenvolvidos a partir de ciclos rigorosos de pedigree que permitiram combinar tolerância a estresses abióticos com alto potencial produtivo. Programas modernos seguem utilizando o pedigree como base para o desenvolvimento de linhagens A, B e R, essenciais para o sistema CMS. Embora eficiente, o método exige dedicação e tempo consideráveis.

Cada ciclo de seleção demanda múltiplas gerações, que podem totalizar de seis a dez anos de trabalho. No entanto, sua eficácia e precisão genética justificam sua manutenção como uma das ferramentas centrais do melhoramento genético do sorgo.

3.3. Seleção recorrente

A seleção recorrente busca aumentar a frequência de alelos favoráveis por meio de ciclos repetidos de seleção, recombinação e reconstituição populacional. No sorgo, esse método tem sido especialmente útil para melhorar características quantitativas, como produtividade em condições de estresse hídrico e eficiência no uso de nutrientes. A seleção recorrente permite reorganizar a variabilidade genética de modo contínuo, oferecendo uma população de base mais robusta para extração de linhagens.

Estudos fisiológicos, como os de Fracasso, Tramontini e Fuggi (2016), demonstram que a seleção recorrente é eficaz para caracteres como o **stay-green**, associado à tolerância à seca e à manutenção da fotossíntese no enchimento de grãos. A recombinação sucessiva acumula alelos favoráveis que, de outra forma, seriam difíceis de fixar por seleção fenotípica simples. No Brasil, populações melhoradas por recorrência foram utilizadas para gerar genitores de híbridos forrageiros, combinando teor de sólidos solúveis e elevada digestibilidade.

Embora seja um método mais demorado, dada a necessidade de múltiplos ciclos, sua contribuição é significativa. Ele alimenta programas de linhagens e híbridos com variabilidade genética enriquecida, servindo como base estratégica para melhorar respostas ao estresse e adaptar cultivares a diferentes condições ambientais.

3.4. Cruzamento dialélicos

Os cruzamentos dialélicos são essenciais para determinar o valor genético das linhagens e identificar combinações híbridas de alto potencial. Com base nesses cruzamentos, estima-se a capacidade geral de combinação (CGC), que reflete o desempenho médio da linhagem em vários cruzamentos, e a capacidade específica de combinação (CEC), que reflete seu desempenho em combinações específicas.

Em sorgo, diversos estudos confirmam que a CGC responde pela maior parte da variação em características como produtividade e qualidade nutricional. No Cerrado, dialelos realizados por Oliveira et al. (2019) revelaram genitores com elevada CGC sob estresse hídrico, permitindo a criação de híbridos como BRS 330, que mantém produtividade mesmo sob irregularidade pluviométrica. Por outro lado, a capacidade específica de combinação (CEC) permitiu identificar híbridos específicos com vigor extraordinário em ambientes favoráveis, como alguns materiais sacarinos utilizados para etanol de segunda geração. Por outro lado, a CEC é indispensável para identificar combinações excepcionais que expressam heterose máxima.

Esse método também auxilia na seleção de linhagens restauradoras da fertilidade (R) em sistemas CMS, por meio de testes de combinação envolvendo linhagens A e B. Sua precisão estatística consolidou os cruzamentos dialélicos como base metodológica para programas de hibridação em sorgo.

3.5. Macho-esterilidade citoplasmática (CMS)

A introdução da CMS transformou radicalmente o melhoramento do sorgo, permitindo a produção em larga escala de híbridos. Antes da CMS, a emasculação manual era o método predominante para impedir a autofecundação, o que tornava impossível a produção comercial de híbridos. Stephens e Holland (1954) foram os primeiros a demonstrar a viabilidade da esterilidade citoplasmática para produção de sementes híbridas.

A consolidação posterior dos sistemas A, B e R, por Schertz e Ritche (1978), permitiu a adoção comercial da CMS. As linhagens A são estéreis, as linhagens B mantêm a esterilidade e as linhagens R restauram a fertilidade. Esse sistema é diretamente responsável pela criação de híbridos forrageiros e graníferos de alto desempenho, como os híbridos utilizados em sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. Além disso, o uso da CMS permitiu explorar características como maior resistência ao acamamento, maior uniformidade de

maturação e maior resposta ao manejo nutricional, tornando o sorgo uma alternativa competitiva ao milho em ambientes restritivos.

Atualmente, praticamente todos os híbridos comerciais utilizam algum sistema CMS. A adoção da CMS permitiu o desenvolvimento de híbridos graníferos, forrageiros, sacarinos e de biomassa, consolidando o sorgo como cultura versátil e economicamente importante.

3.6. Linhagens A B e R

As linhagens A, B e R sustentam operacionalmente o sistema CMS. As linhagens A carregam citoplasma estéril e são usadas como parentais femininas. As linhagens B possuem citoplasma fértil, mas o mesmo genótipo nuclear das linhagens A, servindo como mantenedoras. Já as linhagens R possuem genes restauradores de fertilidade.

A construção dessas linhagens envolve longo processo de pedigree, seleção recorrente e testes de combinação. Kenga, Tarpaga e Alabi (2004) destacaram que a capacidade combinatória dessas linhagens é determinante para o desempenho final dos híbridos comerciais. Esse processo exige rigor extremo para evitar contaminação genética, já que qualquer falha pode comprometer o sistema CMS.

O desenvolvimento das linhagens parentais representa uma das etapas mais críticas e longas do melhoramento do sorgo. A robustez do sistema CMS atual depende da consistência e estabilidade dessas linhagens.

3.7. Emasculação manual

A emasculação manual constitui um dos métodos clássicos de controle da polinização em programas de melhoramento genético de espécies alógamas, incluindo o *Sorghum bicolor*. Embora o sistema de macho-esterilidade citoplasmática (CMS) tenha se consolidado como principal ferramenta para produção comercial de híbridos, a emasculação manual permanece estratégica em fases iniciais de pré-melhoramento, introgressão gênica e desenvolvimento de novas linhagens (RANGEL; SCHAFFERT; BORÉM, 2011).

O procedimento consiste na remoção cuidadosa das anteras antes da deiscência e liberação do pólen, geralmente no estágio pré-antese, assegurando a fecundação exclusivamente pelo genitor masculino desejado. Em sorgo, devido ao tamanho reduzido das flores e à organização em panícula terminal, a operação exige elevada precisão técnica e sincronização com o estágio fenológico da planta (HOUSE, 1985; SMITH; FREDERIKSEN, 2000).

Apesar de demandar intensa mão de obra e apresentar baixa viabilidade para produção em larga escala, a emasculação manual oferece controle absoluto dos cruzamentos, sendo insubstituível em estudos genéticos, validação de genes restauradores de fertilidade (Rf), construção de populações segregantes (F₂, retrocruzamentos) e avaliação de variabilidade quantitativa (BORÉM; MIRANDA, 2013).

No contexto brasileiro, essa técnica foi amplamente utilizada nos programas conduzidos pela Embrapa para o desenvolvimento de linhagens precursoras de híbridos adaptados às condições tropicais, incluindo materiais que deram origem aos híbridos BRS 310 e BRS 330.

Assim, mesmo diante da predominância do sistema CMS na produção comercial de sementes híbridas, a emasculação manual permanece como ferramenta essencial na base científica do melhoramento, viabilizando avanços genéticos que posteriormente são incorporados aos sistemas industriais de produção.

4. TÉCNICAS MODERNAS E BIOTECNOLÓGICAS DE MELHORAMENTO

4.1. Seleção assistida por marcadores

A MAS permitiu acelerar significativamente o melhoramento ao identificar genótipos favoráveis antes da manifestação do fenótipo. No sorgo, um dos maiores avanços foi a identificação de Quantitative Trait Loci (QTLs) relacionados à resistência ao pulgão-verde (*Schizaphis graminum*) por Agrama et al. (2002). Essas descobertas reduziram a dependência de inseticidas e aumentaram a precisão da seleção.

Outro marco da MAS foi a identificação do gene SbMATE, responsável pela tolerância ao alumínio em solos ácidos, descrito por Magalhães et al. (2007) e aprofundado por Melo et al. (2013 e 2019). Esses trabalhos possibilitaram selecionar linhagens adaptadas ao Cerrado de forma muito mais eficiente que pela seleção fenotípica. Atualmente a MAS é integrada como ferramenta complementar aos métodos tradicionais, especialmente útil para características de difícil mensuração, como tolerância ao estresse abiótico.

4.2. Seleção genômica

A seleção genômica (GS) utiliza milhares de marcadores moleculares distribuídos ao longo do genoma para prever o valor genético de indivíduos, permitindo estimativas mais robustas para características quantitativas complexas. Diferentemente da seleção assistida por marcadores (MAS), que depende da identificação prévia de QTLs específicos de grande efeito,

a GS considera simultaneamente efeitos de todo o genoma, capturando variações de pequeno efeito associadas a caracteres poligênicos (MEUWISSEN; HAYES; GODDARD, 2001).

Em espécies como o *Sorghum bicolor*, essa abordagem tem sido aplicada para prever produtividade sob estresse hídrico, teor de açúcares em sorgo sacarino e parâmetros de qualidade nutricional em sorgo forrageiro (YU et al., 2016; ZHAO et al., 2011). Programas internacionais, especialmente nos Estados Unidos e na África Subsaariana, demonstraram que modelos genômicos aumentam significativamente a acurácia da seleção para características de baixa herdabilidade e fortemente influenciadas pelo ambiente (CROSSA et al., 2017; BERNARDO, 2016).

Estudos recentes indicam que a GS reduz o intervalo entre gerações, acelera ciclos de recombinação e otimiza o ganho genético anual, tornando o processo mais eficiente quando comparado aos métodos fenotípicos tradicionais (VEYRAT et al., 2022). A possibilidade de prever o valor genético ainda no estágio de plântula representa uma mudança paradigmática nos programas de melhoramento, permitindo decisões precoces e maior intensidade de seleção.

Com a consolidação de plataformas de genotipagem de alta densidade e redução de custos de sequenciamento, a seleção genômica tende a substituir parcialmente etapas convencionais de pré-melhoramento em culturas estratégicas, consolidando-se como ferramenta central na modernização do melhoramento de sorgo em ambientes tropicais e semiáridos.

4.3. Edição gênica (CRISPR/Cas9)

A edição gênica representa a fronteira mais avançada do melhoramento moderno. A ferramenta CRISPR/Cas9 permite modificar genes específicos de interesse, sem necessidade de transgenia tradicional. Em sorgo, estudos recentes demonstram seu potencial para modificar características relacionadas à digestibilidade da fibra, biossíntese de taninos e tolerância ao estresse térmico.

Embora ainda em fase experimental para a maioria das características agronômicas, a edição gênica é vista como ferramenta estratégica para enfrentar desafios climáticos globais. Revisões como Zhang et al. (2023) apontam que CRISPR poderá, nos próximos anos, acelerar enormemente a criação de cultivares adaptadas a cenários extremos.

No campo da biotecnologia, a edição gênica via CRISPR/Cas9 tem sido direcionada para a sustentabilidade do cultivo. Estudos de Mukherjee et al. (2025) revelaram que a modificação de genes transportadores de aminoácidos nas raízes pode elevar em até 30% a

eficiência no uso de Nitrogênio (NUE). Esse avanço é estratégico para a agricultura de baixo carbono, pois permite reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados sem comprometer o teto produtivo da cultura.

4.4. Tabela comparativa dos métodos de melhoramento

Comparação entre os principais métodos utilizados no melhoramento genético do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), destacando suas vantagens, limitações e aplicações atuais em programas de desenvolvimento de cultivares. Conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Métodos de melhoramento genético do sorgo e suas principais características.

Método	Vantagens	Limitações	Aplicações Atuais
Seleção massal	Simples, barata	Baixa precisão	Pré-melhoramento
Pedigree	Alta precisão	Longo tempo	Linhagens elite
Recorrente	Melhora caracteres quantitativos	Demorado	<i>Stay-green</i> , produtividade
Dialelo	Identifica híbridos superiores	Exige infraestrutura	Híbridos comerciais
CMS	Produção massiva de híbridos	Requer linhagens A/B/R	Granífero, forragem, biomassa
MAS	Acelera seleção	Depende de QTLs	Al, seca, pragas
GS	Alta acurácia	Custo de genotipagem	Todos os programas modernos
CRISPR	Precisão máxima	Regulamentação	Biofortificação e clima

O melhoramento genético do sorgo evoluiu de práticas empíricas para uma ciência altamente integrada, apoiada em genética, fisiologia, estatística e biotecnologia. O futuro da cultura depende da combinação de métodos tradicionais com ferramentas moleculares e genômicas avançadas, permitindo ganhos rápidos e sustentáveis (BERNARDO, 2020).

No Brasil, a integração entre CMS, MAS, GS e CRISPR coloca o sorgo como candidato estratégico para enfrentar desafios climáticos e atender múltiplas cadeias produtivas, reforçando seu papel como cultura-chave para agricultura tropical.

5. METODOLOGIA

As buscas pelo banco foram realizadas entre os meses de setembro a dezembro de 2025 em bases de dados como: *Web of Science*, *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, e *Google Scholar*, além de relatórios técnicos da *Food and Agriculture Organization* (FAO), *United States Department of Agriculture* (USDA) e Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).

A análise e a síntese das informações foram realizadas de forma descritiva, buscando identificar tendências de pesquisa, avanços tecnológicos e lacunas do conhecimento relacionadas à cultura do sorgo. A organização dos resultados foi estruturada em quatro eixos principais: aspectos botânicos, morfológicos e fenológicos da planta, importância e inovações no melhoramento genético; diversidade de cultivares disponíveis no mercado; e relevância da pesquisa em campo sobre densidade populacional e espaçamento entre plantas.

Foram priorizados artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, bem como revisões de literatura e documentos técnicos de instituições reconhecidas, como Embrapa e CONAB. Os critérios de inclusão consideraram estudos relacionados à cultura do sorgo, publicados majoritariamente nos últimos anos, em língua portuguesa e inglesa. Trabalhos duplicados, resumos simples e publicações sem relevância direta para os objetivos da revisão foram excluídos.

6. HÍBRIDOS DE SORGO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

A consolidação dos híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) como base tecnológica da cultura representa um dos avanços mais estruturantes do melhoramento genético de cereais em ambientes tropicais e subtropicais. A incorporação sistemática da hibridação permitiu a exploração do vigor híbrido de forma recorrente e previsível, promovendo ganhos simultâneos em produtividade, uniformidade fenotípica, estabilidade interanual e amplitude de adaptação ambiental. Segundo Rooney et al. (2017), esse conjunto de atributos reposicionou o sorgo de uma cultura secundária para um componente estratégico de sistemas agrícolas resilientes, particularmente sob cenários de intensificação do estresse hídrico e térmico. No Brasil, tal reposicionamento assume relevância singular, uma vez que, conforme argumentado por Pereira Filho et al. (2021), o sorgo passou a ocupar nichos produtivos no Cerrado nos quais outras culturas apresentam elevada instabilidade produtiva.

Do ponto de vista funcional, a classificação dos híbridos de sorgo em graníferos, forrageiros, sacarinos e de biomassa reflete trajetórias distintas de seleção genética, orientadas

pela modulação do crescimento, da alocação de carbono e da composição bioquímica dos tecidos vegetais. De acordo com Murphy et al. (2014), essas diferenças decorrem de ajustes coordenados em atributos como duração do ciclo fenológico, arquitetura da planta, eficiência de interceptação luminosa, capacidade fotossintética e partição de assimilados entre órgãos vegetativos e reprodutivos. Assim, cada grupo de híbridos expressa um conjunto particular de *trade-offs* fisiológicos que condicionam sua aptidão agrônômica e industrial.

Os híbridos graníferos são resultantes de estratégias de melhoramento que priorizam a eficiência reprodutiva, expressa pelo elevado rendimento de grãos, associado a ciclo precoce a médio e elevada resistência ao acamamento. Conforme relatado por Baloch et al. (2023), esses materiais apresentam arquitetura de planta mais compacta, colmos estruturalmente robustos e panículas densas, características que favorecem maior eficiência no enchimento de grãos e redução de perdas na colheita mecanizada. Ademais, a redução do teor de taninos constitui um objetivo recorrente nesses programas, uma vez que esses compostos fenólicos podem comprometer a digestibilidade e o valor nutricional dos grãos. Apesar da pressão do melhoramento para a redução de taninos visando a nutrição animal, a pesquisa de Wang et al. (2024) ressalta a importância defensiva desses compostos. Os autores observaram que genótipos com teores moderados de taninos apresentam maior resistência natural à colonização por fungos de grão, como o *Fusarium* spp., especialmente em safras marcadas por alta umidade na fase de pré-colheita, garantindo a integridade sanitária do lote.

Rooney et al. (2017) destacam que avanços recentes permitiram incorporar, de forma simultânea, mecanismos de tolerância ao déficit hídrico e ao estresse térmico, ampliando a estabilidade produtiva desses híbridos em ambientes caracterizados por elevada variabilidade climática.

Os híbridos forrageiros emergem de estratégias de seleção orientadas à maximização da produção de biomassa aérea e à qualidade bromatológica do material vegetal. Esses híbridos caracterizam-se por maior estatura, elevada relação folha/colmo e maior suculência dos colmos, atributos diretamente associados à digestibilidade da fibra e ao desempenho animal. Segundo Murphy et al. (2014), a elevada capacidade de rebrota e a plasticidade fenotípica desses materiais ampliam sua versatilidade em sistemas de produção animal. Evidências experimentais indicam que a resposta dos híbridos forrageiros a variações na densidade de semeadura e no espaçamento entre linhas reflete uma elevada capacidade de ajuste morfofisiológico, permitindo sua integração eficiente em sistemas de integração lavoura-pecuária. (FERREIRA et al., 2023).

Os híbridos sacarinos distinguem-se por um padrão singular de partição de assimilados, caracterizado pelo acúmulo expressivo de açúcares solúveis no colmo, particularmente sacarose, glicose e frutose. Ratnavathi et al. (2016), descreve que esse acúmulo confere elevado potencial para a produção de etanol e outros bioprodutos de base renovável, posicionando o sorgo sacarino como alternativa complementar à cana-de-açúcar. No entanto, essa estratégia metabólica implica, em geral, menor investimento reprodutivo, resultando em menor rendimento de grãos. Liang et al. (2024) destacam, que os programas contemporâneos de melhoramento têm buscado mitigar esse trade-off por meio do desenvolvimento de genótipos com maior estabilidade do teor de açúcares, menor suscetibilidade ao acamamento e maior tolerância a estresses abióticos, especialmente déficit hídrico e altas temperaturas, fatores críticos para a viabilidade agrônômica desses híbridos.

Os híbridos destinados à produção de biomassa resultam de estratégias de seleção voltadas à maximização do acúmulo de matéria seca total, priorizando crescimento vegetativo vigoroso, ciclo mais longo e elevada eficiência na interceptação da radiação solar. Segundo Murphy et al. (2014), esses híbridos apresentam elevado potencial para aplicações em bioenergia de segunda geração, incluindo produção de pellets e geração de energia térmica. Em função do porte elevado e da expressiva produção de biomassa, Rooney et al. (2017) ressaltam que o manejo agrônômico desses materiais exige ajustes específicos, especialmente quanto ao espaçamento entre plantas, manejo nutricional e controle do acamamento, sobretudo em ambientes de alta fertilidade e elevada disponibilidade hídrica.

No contexto brasileiro, a disponibilização de híbridos adaptados às condições edafoclimáticas do Cerrado reflete avanços significativos de programas públicos e privados de melhoramento genético. Pereira Filho et al. (2021), observou que há predominância de híbridos graníferos de ciclo precoce e médio para cultivo na segunda safra, em função de sua maior estabilidade produtiva e menor exigência hídrica. Assim, a definição do híbrido mais adequado deve ser orientada por uma abordagem sistêmica, que considere a finalidade de uso, o ambiente de produção, a disponibilidade hídrica e o nível tecnológico do sistema de manejo, reconhecendo-se que a interação genótipo × ambiente exerce influência decisiva sobre o desempenho agrônômico e a sustentabilidade produtiva da cultura do sorgo.

7. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA EM CAMPO: DENSIDADE, ESPAÇAMENTO E ARRANJO DE PLANTAS NO SORGO

A definição adequada da densidade populacional e do espaçamento entre linhas constitui um dos pilares do manejo agrônomo da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), influenciando diretamente processos fisiológicos, competitivos e estruturais da cultura. A pesquisa em campo tem demonstrado que esses fatores determinam a interceptação da radiação solar, a eficiência do uso da água, a acumulação de biomassa e a expressão dos componentes de rendimento (VANDERLIP, 1993; DOGETT, 1988). A resposta da cultura a esses parâmetros é condicionada pelo genótipo, pelas características ambientais e pela fertilidade do solo, reforçando a importância de estudos regionais que permitam adequar recomendações às condições específicas de cultivo.

A densidade de plantas influencia sobre o crescimento e o desenvolvimento do dossel. Trabalhos clássicos demonstram que o aumento da população favorece maior interceptação luminosa no início do ciclo, resultando em maior área foliar e maior potencial de acúmulo de biomassa, sobretudo em cultivares de arquitetura foliar ereta (HOUSE, 1985; BLUM, 1996). Entretanto, densidades excessivas podem intensificar a competição intraespecífica por água e nutrientes, prolongar a elongação do colmo e aumentar a suscetibilidade ao acamamento, especialmente em ambientes de sequeiro. Como consequência, a escolha da densidade ideal depende da disponibilidade hídrica, do tipo de híbrido e do objetivo da produção (grãos, forragem ou biomassa).

O espaçamento entre linhas representa outro fator decisivo no manejo da cultura. Estudos conduzidos desde a década de 1980 indicam que espaçamentos reduzidos favorecem o fechamento rápido do dossel e reduzem o estabelecimento de plantas daninhas, resultando em maior eficiência na captura da radiação (HOUSE, 1985; MILLER & OTTO, 1980). No entanto, espaçamentos amplos podem ser vantajosos para cultivares forrageiras ou para condições de baixa disponibilidade hídrica, uma vez que promovem menor competição entre plantas e melhor acesso à água e nutrientes no perfil do solo (BLUM, 1996).

O arranjo espacial das plantas, resultado da combinação entre densidade e espaçamento, influencia diretamente o crescimento radicular, a partição de fotoassimilados e a duração do período de enchimento de grãos. Pesquisas clássicas descrevem que arranjos mais uniformes aumentam a eficiência na utilização dos recursos ambientais e reduzem variações na produção entre plantas, contribuindo para maior estabilidade dos rendimentos (VANDERLIP & REEVES, 1972). Além disso, a configuração espacial adequada favorece a redução de perdas por acamamento e melhora a resposta a práticas nutricionais, especialmente ao nitrogênio.

No contexto brasileiro, recomendações históricas desenvolvidas pela Embrapa e por universidades indicam que híbridos graníferos apresentam melhor desempenho em densidades entre 140.000 e 170.000 plantas ha⁻¹ e espaçamentos entre 50 e 70 cm, enquanto sorgos forrageiros e de biomassa toleram populações mais altas devido ao maior porte e maior demanda por interceptação de luz (MAGALHÃES et al., 2000; DURÃES et al., 1993). A tabela abaixo mostra a forma de regulação, levando em conta o tipo de sorgo, o espaçamento e a população de plantas finais desejada (MANTOVANI; RIBAS, 2015).

Figura 3 - Sugestões para regulação de equipamentos de plantio de acordo com diferentes tipos comerciais de sorgo, seus usos e seus espaçamentos recomendados.

Tipo comercial de sorgo	Espaçamento entre linhas (m)	Nº sementes por metro (80% germ.)	Consumo de sementes (kg/ha)	População na colheita (mil plantas/ha)
Granífero	0,50 a 0,70	15 a 18	6 a 8	140 a 170
Duplo propósito	0,70 a 0,80	18 a 20	6 a 8	140 a 170
Silagem	0,80 a 0,90	13 a 15	5 a 7	90 a 110
Corte verde*	0,30 a 0,60	20 a 22	10 a 12	200 a 300
Pastejo / fenação / cobertura morta (em linha)	0,30	20 a 25	15 a 20	400 a 500
Pastejo / fenação / cobertura morta (a lanço)	A lanço	—	20 a 30	600

8. IMAGENS REPRESENTATIVAS DO MANEJO DE DENSIDADE EM SORGO

As figuras têm a função de complementar a descrição textual e facilitar a compreensão dos fenômenos agrônômicos. No caso do sorgo, variáveis como densidade, espaçamento e arquitetura do dossel influenciam diretamente processos fisiológicos, competitivos e produtivos. Assim, as imagens a seguir ilustram de forma clara os efeitos desses fatores no desenvolvimento da cultura (Figura 3 e 4).

Figura 3: Estrutura do dossel de sorgo sob alta densidade.



Fonte: Adaptado de Gao et al. (2022).

Figura 4: Estrutura do dossel de sorgo sob condições de alta densidade populacional, evidenciando maior fechamento do dossel, maior competição por luz e redução do espaço Inter planta.



Fonte: Sementes Santa Fé (2026).

Essas figuras ilustram o comportamento fisiológico e estrutural da cultura quando submetida a populações mais elevadas, fenômeno frequentemente associado a alterações na interceptação luminosa, maior alongamento do colmo e possíveis impactos sobre o peso de mil grãos, conforme descrito por Gao et al. (2022) e Zhang et al. (2024).

Figura 5 – Comparação entre espaçamentos reduzidos e convencionais na cultura do sorgo, destacando diferenças no arranjo espacial, no fechamento do dossel e na distribuição da radiação fotossintética ativa.



A imagem evidencia como a redução no espaçamento entre linhas pode favorecer um fechamento mais rápido do dossel, reduzindo infestação de plantas daninhas e aumentando a eficiência do uso da luz, especialmente em híbridos de arquitetura ereta, como apontado por Murphy et al. (2024).

9. CONCLUSÃO

Conclui-se que o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) constitui uma cultura estratégica para sistemas agrícolas tropicais e subtropicais, especialmente em ambientes caracterizados por restrições hídricas, elevadas temperaturas e maior variabilidade climática. Seus atributos morfofisiológicos, como sistema radicular profundo, plasticidade fenológica e eficiência no uso da água, conferem maior estabilidade produtiva quando comparado a outras gramíneas cultivadas, justificando sua crescente adoção no Brasil, com destaque para regiões do Cerrado e para o cultivo em segunda safra conhecida como safrinha.

A análise dos aspectos botânicos, morfológicos e fenológicos evidenciou que o desempenho agrônomo do sorgo depende do adequado sincronismo entre os estádios de desenvolvimento da cultura e as condições ambientais, sendo os períodos de florescimento, antese e enchimento de grãos os mais sensíveis a estresses abióticos. Dessa forma, o manejo agrônomo fundamentado no conhecimento do ciclo fenológico é determinante para a maximização da produtividade e da eficiência no uso de recursos.

No âmbito do melhoramento genético, a evolução dos métodos clássicos, associada à consolidação da produção de híbridos via macho-esterilidade citoplasmática e à incorporação de ferramentas modernas, como seleção assistida por marcadores, seleção genômica e edição gênica, permitiu expressivos avanços em produtividade, adaptabilidade e estabilidade. Esses progressos viabilizaram a diversificação de híbridos graníferos, forrageiros, sacarinos e de biomassa, ampliando a versatilidade e a inserção do sorgo em diferentes cadeias produtivas.

Adicionalmente, a literatura revisada demonstra que a definição adequada da densidade, do espaçamento e do arranjo de plantas exerce influência direta sobre a interceptação da radiação solar, a competição intraespecífica e a eficiência no uso de água e nutrientes, sendo fatores decisivos para a expressão do potencial genético dos híbridos. Assim, a consolidação do sorgo como cultura-chave para sistemas agrícolas resilientes depende da integração entre melhoramento genético, manejo agrônômico baseado em evidências e inovação tecnológica, contribuindo para a sustentabilidade, a segurança alimentar e a eficiência produtiva da agricultura brasileira.

10. REFERÊNCIAS

- AGRAMA, H. A. et al. Genetic mapping of QTLs associated with greenbug resistance and tolerance in *Sorghum bicolor*. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 104, n. 8, p. 1371–1378, 2002.
- ARUNA, C. et al. Breeding sorghum for resistance to grain mold: achievements and prospects. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 687332, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.687332>.
- BALOGH, F. S. et al. Advances in sorghum improvement: integrating genomics, physiology, and breeding. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2785, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12142785>.
- BERNARDO, R. Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something BLUE. **Heredity**, v. 125, p. 375–385, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0312-1>.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa: UFV, 2013.
- BROWNFIELD. Sorghum production up on higher acreage. **Brownfield Ag News**, 2025. Disponível em: <https://www.brownfieldagnews.com/news/sorghum-production-up-on-higher-acreage/>. Acesso em: 19 fev. 2026.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira – grãos: safra 2024/25. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 19 fev. 2026.
- CROSSA, J. et al. Genomic selection in plant breeding: methods, models, and perspectives. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 11, p. 961–975, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011>.
- DE WET, J. M. J.; HUCKABEE, J. F. The origin of sorghum. **Economic Botany**, v. 21, n. 3, p. 227–243, 1967.

FERREIRA, R. L. et al. Forage potential of sorghum hybrids under different cutting regimes. **Grass and Forage Science**, v. 78, n. 1, p. 59–71, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gfs.12661>.

FRACASSO, A.; TRAMONTINI, S.; FUGGI, A. Physiological and molecular aspects of drought tolerance in sorghum. **Plant Science**, v. 242, p. 327–338, 2016.

GAO, F. et al. Genotype, planting density, and sowing date regulate sorghum yield and adaptability. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1008198, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1008198>.

HARLAN, J. R.; DE WET, J. M. J. A simplified classification of cultivated sorghum. **Crop Science**, v. 12, n. 2, p. 172–176, 1972.

HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. 2. ed. Patancheru: ICRISAT, 1985.

KENGA, R.; TARPAGA, V.; ALABI, S. O. Combining ability of sorghum lines for grain yield and other agronomic traits. **African Crop Science Journal**, v. 12, n. 1, p. 23–33, 2004.

LIANG, S. V. K. et al. Genomic tools and functional advances in sorghum breeding. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 7, p. 1550–1562, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.05.012>.

MAGALHÃES, J. V. et al. A gene in the MATE family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, v. 39, p. 1156–1161, 2007.

MANTOVANI, E. C.; RIBAS, P. M. Plantio. In: RODRIGUES, J. A. S. (ed.). *Cultivo do sorgo*. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/748792/1/Sorgo-Plantio.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2025.

MEUWISSEN, T. H. E.; HAYES, B. J.; GODDARD, M. E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. **Genetics**, v. 157, p. 1819–1829, 2001. <https://doi.org/10.1093/genetics/157.4.1819>.

- MELO, J. O. et al. Allelic variation at the sorghum aluminum tolerance gene SbMATE is associated with DNA polymorphisms in its promoter region. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 126, p. 1909–1926, 2013.
- MELO, J. O. et al. A zinc finger transcription factor regulates SbMATE, a major aluminum tolerance gene in sorghum. **Plant Cell**, v. 31, p. 2249–2264, 2019.
- MUKHERJEE, S. et al. Genome editing for nutrient use efficiency in sorghum: a review of CRISPR applications. **Journal of Experimental Botany**, v. 76, n. 2, p. 415–430, 2025.
- MURPHY, K. M. et al. Sorghum as a climate-resilient cereal: opportunities and challenges. **Field Crops Research**, v. 299, p. 109025, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109025>.
- OLIVEIRA, I. C. M. et al. Diallel analysis of grain sorghum hybrids under water stress. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 311–318, 2019.
- PEREIRA FILHO, I. A. et al. Genetic improvement and perspectives of sorghum cultivation in Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, n. 1, p. 1–10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21n1a60>.
- PRASAD, P. V. et al. Resilience of sorghum to climate change: heat and drought interaction. **Field Crops Research**, v. 312, p. 109–125, 2025.
- REUTERS. U.S. sorghum exports hit by trade barriers with China. **Reuters Markets**, 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/>. Acesso em: 19 fev. 2026.
- RANGEL, P. H. N.; SCHAFFERT, R. E.; BORÉM, A. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2011.
- SCHERTZ, K. F.; RITCHEY, J. M. Cytoplasmic–genic male sterility systems in sorghum. **Crop Science**, v. 18, p. 890–893, 1978.
- SINGH, A. et al. Global climate adaptation potential of sorghum. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 356, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020356>.

SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum: origin, history, technology, and production**. New York: Wiley, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr32>.

STEPHENS, J. C.; HOLLAND, P. F. Cytoplasmic male sterility for hybrid sorghum seed production. **Agronomy Journal**, v. 46, p. 20–23, 1954.

USDA. World agricultural supply and demand estimates – WASDE. Washington, 2025. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde>. Acesso em: 19 fev. 2026.

VEYRAT, N. et al. Accelerating genetic gain in crops through genomic selection. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843123>.

WATSON-LAZOWSKI, Alexander; CANO, Francisco Javier; KIM, Mikael; BENNING, Urs; KOLLER, Fiona; GEORGE-JAEGGLI, Barbara; CRUICKSHANK, Alan; MACE, Emma; JORDAN, David; PERNICE, Mathieu; WARREN, Charles; GHANNOUM, Oula. Perfis multiômicos de genótipos de *Sorghum* com tolerância contrastante ao calor conectam vias relacionadas à termotolerância. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 76, n. 17, p. 4980–4998, 4 nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erae506>. Acesso em: 25 fev. 2026.

WANG, Y. et al. The dual role of tannins in sorghum: nutritional constraints vs. biotic stress defense. **Plant Science**, v. 340, art. 111952, 2024.

YU, J. et al. Genomic prediction contributing to a promising global strategy to turbocharge gene banks. **Nature Plants**, v. 2, 2016. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.50>.

ZHAO, Y. et al. Genome-based establishment of a high-yielding heterotic pattern for hybrid wheat breeding. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 25, p. 10660–10665, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1011043108>.

ZHANG, X. et al. Projected impacts of climate change on sorghum yield and adaptation strategies. **Nature Food**, v. 5, p. 221–229, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00798-1>.

ZHANG, Y. et al. Improving sorghum grain quality through biofortification: current progress and future prospects. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1185623, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1185623>.

ZHANG, Y. et al. Improving sorghum grain quality through modern genomics and gene editing. **Frontiers in Genetics**, v. 14, p. 1185623, 2023.