

## Capítulo 5

---

### Métodos de melhoramento de sorgo

*Pedro César de Oliveira Ribeiro  
Crislene Vieira dos Santos  
Carmela Vaz Campolina  
Cícero Beserra de Menezes*

#### Introdução

O entendimento da constituição genética de uma planta e seu modo de reprodução são importantes para que o melhorista escolha o método de melhoramento a ser aplicado na cultura. E isso é, em grande parte, ditado pelo sistema reprodutivo da planta e pelas metas traçadas para o melhoramento genético. Dessa forma, conhecer as peculiaridades do modo de reprodução da espécie é fundamental para definir os métodos de melhoramento. O conhecimento das particularidades da polinização da espécie pode auxiliar os programas de melhoramento na produção de sementes, criação de variabilidade, seleção, escolha do método de melhoramento e comercialização de sementes (Borém et al., 2009).

A classificação de espécies cultivadas se baseia no modo de reprodução dessas. A literatura subdivide as espécies entre assexuadas e sexuadas. Neste capítulo serão destaques as espécies de reprodução sexuada, grupo ao qual pertence a cultura do sorgo, que podem ser divididas entre autógamas, alógamas e autógamas com frequente alogamia (Borém et al., 2009; Hallauer et al., 2010; Lersten 2015).

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma espécie considerada de reprodução mista, com autores concordantes sobre o percentual da sua taxa de fecundação cruzada como sendo superior a 10%, dependendo das condições climáticas (Borém et al., 2014), ou variando entre 5% e 10% (Coors et al., 1999; Doggett, 1970).

O sorgo apresenta flores monoicas, com gineceu e androceu bem próximos, o que influencia na alta taxa de autofecundação (Smith; Frederiksen,

## Melhoramento Genético de Sorgo

2000). Sendo assim, o melhorista pode desenvolver linhagens homozigotas, ou pode explorar heterose por meio de processos de hibridação. A definição dos objetivos do programa de melhoramento deve sempre estar clara e definida para que se obtenha sucesso. Assim, o melhorista deve entender o objetivo, o progresso, o material e conhecer o seu germoplasma.

Apesar de ser uma espécie autógama em que tradicionalmente se recomendam linhagens como cultivares, após a descoberta da macho-esterilidade genética citoplasmática (Reddy et al., 2005), a produção de híbridos de sorgo se tornou atraente e economicamente viável (Coors et al., 1999). Programas de melhoramento que utilizam macho-esterilidade se baseiam em três tipos de linhagens, denominadas A, B e R. As linhagens A e B são isogênicas e se diferem apenas quanto à fertilidade do pólen, sendo a linhagem A macho-estéril e a B macho-fértil; as linhagens R são macho-férteis e restauram a fertilidade das linhagens A. A linhagem A e a linhagem R são cruzadas para produzir o híbrido  $F_1$  macho-fértil, e a linhagem B é cruzada com a linhagem A para manter a linhagem macho-estéril (Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016; Ribeiro et al., 2020).

### Objetivos do Programa de Melhoramento de Sorgo

A cultura do sorgo pode ser classificada em seis tipos, sendo: i) o sorgo granífero, para produção de grão, que pode ser utilizado na alimentação humana e animal; ii) o sorgo forrageiro, utilizado para produção de forragem para alimentação animal, possuindo híbridos de elevada qualidade e produtividade; iii) o sorgo sacarino, que possui elevados teores de açúcares no colmo, utilizado para produção de etanol e biomassa; iv) o sorgo biomassa, que produz grande quantidade de massa verde, podendo atingir 5 a 6 metros de altura, utilizado para a cogeração de energia; v) o sorgo tipo vassoura, cuja panícula é usada para produção de vassouras artesanais, muito utilizado por pequenos produtores; e vi) o sorgo de corte e pastejo, utilizado para a alimentação animal em forma de pastejo rotativo (Doggett, 1970; Smith; Frederikson, 2000; Zhao; Dahlberg, 2019). Segundo Ribas (2003, 2008), o sorgo é uma cultura que pode ser chamada de uma "extraordinária fábrica de energia", pois possui enorme gama de utilidades. Sendo assim, os programas de melhoramento de sorgo devem estabelecer as finalidades dos híbridos que serão ofertados e os objetivos dos híbridos.

Destaca-se que os programas de melhoramento de sorgo devem ter objetivos, como maior rendimento e produtividade; resistência aos estresses

bióticos; tolerância aos estresses abióticos; características para qualidade em grãos e forragem; precocidade; insensibilidade ao fotoperiodismo; adaptabilidade e estabilidade ampla; e características agronômicas desejáveis.

### **Emasculação de Sorgo**

Como mencionado anteriormente, o sorgo possui flores perfeitas, ou seja, os dois órgãos reprodutivos em uma única flor. Sendo assim, para a realização de cruzamentos entre genótipos férteis devem-se realizar alguns procedimentos, como a emasculação, para que estes cruzamentos sejam eficientes.

A emasculação manual é a técnica mais utilizada pelos programas de melhoramento de sorgo. O processo se inicia ao retirar as anteras funcionais de cada flor sem prejudicar o estigma. Em seguida, seleciona-se a panícula, que tem suas flores removidas na véspera da antese. Essas flores ocorrem abaixo e dentro de cerca de 3 cm das flores abertas em uma panícula de sorgo. Por fim, todas as espiguetas abertas são removidas com uma tesoura.

Como medida de controle contra a contaminação, nas panículas, todos os equipamentos utilizados na emasculação devem ser lavados, antes e após o procedimento, para remover qualquer pólen residual, especialmente se a emasculação ocorrer ao ar livre. Todas as flores, exceto as que devem ser emasculadas, são removidas, deixando apenas as flores que devem abrir no dia seguinte.

Com uma pinça afiada, as flores são abertas, e as anteras são removidas com extremo cuidado, para não danificar o estigma (Figura 1). Deve-se ter cuidado para não quebrar a antera, e, se ela se romper, essa flor deve ser removida após a emasculação. A panícula é coberta com um saco de papel até o dia em que as flores sejam polinizadas, de um a dois dias depois, com o pólen do progenitor masculino.

Um método para controlar a deiscência das anteras é a utilização de um saco plástico para cobrir a panícula antes da floração, a fim de controlar a umidade. Este procedimento também é conhecido como emasculação de saco plástico, sendo comumente utilizado para o desenvolvimento e seleção de populações segregantes, já que permite a obtenção de muitos cruzamentos em um curto período.



Fotos: Pedro César Ribeiro

**Figura 1.** Processo de emascação manual, A1 e A2: remoção das flores inferiores; B1 e B2 remoção das anteras.

Normalmente os cruzamentos são feitos no campo, utilizando as plantas selecionadas como fêmeas. A abertura de flores se inicia do ápice da panícula, e em seguida essas flores são removidas, assim como as flores da parte inferior, de modo que a panícula fique com 3 a 5 cm. O próximo passo é cobrir a panícula com um saco plástico e, em seguida, com um saco polinizador, para sombrear a panícula e reduzir a temperatura sob o saco plástico. A panícula permanece coberta por dois a três dias (Figura 2), período no qual completa a sua antese. Contudo, esse método proporciona alta umidade na panícula, que pode inibir a deiscência das anteras (Figura 3).

Na sequência, o pólen do progenitor masculino é coletado, o saco plástico é removido, e a panícula é “sacudida” para remover o excesso de anteras. Com isso a polinização é feita imediatamente depois desse procedimento. Um certo nível de autopolinização ocorrerá na panícula em que foi realizado o cruzamento. Ambas as técnicas não são 100% eficazes (Rakshit; Bellundagi, 2018).



Foto: Cicero Beserra de Menezes

**Figura 2.** Processo de emasculação com saco plástico.



Foto: Cicero Beserra de Menezes

**Figura 3.** Pólen e alta umidade no processo de emasculação com saco plástico.

Outro processo de emasculação é a emasculação por tratamento com água quente. Neste caso as flores da parte inferior são removidas e aquelas da porção superior, selecionadas, são expostas a água quente (em torno de 42 °C), com um tempo de 10 minutos, tornando o pólen não funcional (House, 1985). Essas flores ficam abertas com antera exposta, sendo possível realizar a polinização com o doador, no dia seguinte (Rakshit; Bellundagi, 2018).

## **Técnicas de Melhoramento**

O melhorista deve sempre estar atento na escolha da metodologia de melhoramento que será aplicada ao seu programa, o que depende do comportamento de polinização da cultura e do tipo de cultivar a ser desenvolvida, seja híbrido ou variedade.

Na cultura do sorgo são aplicados os métodos de melhoramento para culturas autógamas por causa da predominância de sua reprodução por autofecundação, mas também são utilizadas técnicas de melhoramento usadas em espécies alógamas, o que só foi possível por causa da descoberta das fontes de macho-esterilidade. Sendo assim, os melhoristas têm trabalhado também com métodos de melhoramento aplicados às culturas alógamas na condução de programas de melhoramento de sorgo (House, 1985; Acquaah, 2012; Rakshit; Bellundagi, 2018).

Diante da possibilidade de confecção de híbridos, torna-se possível proteger a tecnologia gerada (sementes híbridas) e explorar a heterose ou "vigor híbrido". Com isso, os programas de melhoramento de sorgo têm como base o desenvolvimento de linhagens, para a obtenção de híbridos de elevado potencial e ampla adaptabilidade aos diversos ambientes de cultivo. Dessa forma, têm-se utilizado diferentes processos de seleção clássica e esquemas de reprodução para o melhoramento do sorgo, que variam de acordo com os objetivos propostos.

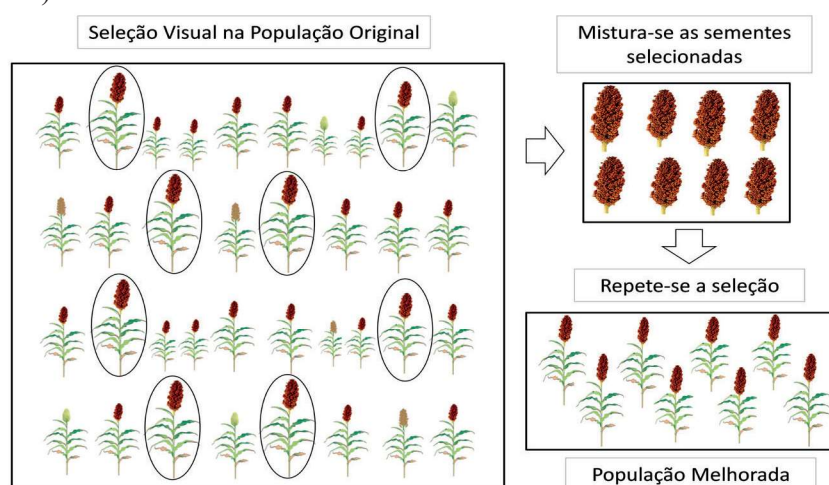
## **Método Intrapopulacional**

### **Seleção Massal**

A seleção massal é um método aplicado normalmente para características de alta herdabilidade, como florescimento, altura de plantas e alguns tipos de resistência à doença. Isto porque este método de seleção é realizado de maneira visual, e, portanto, através de caracteres fenotípicos. Vale lembrar que as características de alta herdabilidade são comumente controladas por poucos genes, ou seja, sua expressão é pouco afetada pelo ambiente, e, dessa forma, a seleção pelo fenótipo é eficiente (Santos et al., 2005). No entanto, mesmo para essas características de alta herdabilidade o controle local deve ser realizado, de forma que as plantas estejam em condições favoráveis ao seu desenvolvimento.

Neste método um número grande de plantas fenotipicamente

semelhantes é selecionado, visando manter a variabilidade genética, e suas sementes são misturadas para constituir uma população melhorada (Carena et al., 2010; Doggett, 1968; Foster et al., 1980). Como mostrado na Figura 4, a seleção de plantas deve ser realizada de maneira aleatória, tornando a amostra de plantas representativa da população. Cada panícula individual, selecionada das melhores plantas, após ser colhida e trilhada, terá suas sementes misturadas, compondo a população melhorada (Borém; Miranda, 2013).



**Figura 4.** Representação de esquema de seleção massal em sorgo.

Uma atenção especial deve ser dada para o planejamento do campo de seleção massal. Isto porque, nas gerações iniciais de alguma população, quando ainda se está selecionando plantas individuais, o espaçamento entre plantas proposto deve evitar a competição. Ou seja, o espaçamento recomendado para a seleção massal foge da recomendação convencional, de 0,5 m entre linhas e densidade de 10 plantas por metro linear. Quando em seleção massal pode-se utilizar o espaçamento de 1 m entre linhas, e menor densidade de plantas, a fim de reduzir a competição (Borém; Miranda, 2013).

Durante a seleção massal o teste de progênies não faz parte do processo de seleção, apenas as características específicas da variável que se está selecionando são levadas em consideração. O melhorista deve direcionar a seleção para os caracteres agrônômicos que são facilmente visíveis, sempre procurando uniformidade das plantas de sorgo selecionadas, quanto ao ciclo, à altura de plantas, e à resistência às pragas e doenças.

## Melhoramento Genético de Sorgo

A seleção massal é utilizada principalmente para introduções de germoplasma e purificação das variedades de linhas puras, quando estas se tornam geneticamente variáveis. Com isso, as variedades selecionadas são agronomicamente uniformes, mas ao mesmo tempo a seleção massal é mais simples e efetiva para caracteres de alta herdabilidade na cultura do sorgo, mantendo considerável variabilidade genética. A seleção massal em sorgo possui vantagens como a facilidade de condução e a possibilidade de obter mais de um ciclo por ano (Doggett, 1968; Foster et al., 1980). A desvantagem deste método é a dificuldade de identificar genótipos superiores por meio do fenótipo, por causa da variação ambiental (Gardner, 1961).

O procedimento comum para purificação de cultivares consiste em realizar a seleção de 200 indivíduos com características típicas da cultivar que se deseja purificar. Essas plantas selecionadas são trilhadas conjuntamente a fim de recuperar as características específicas da cultivar (Borém; Miranda, 2013). Contudo, este método tem suas limitações quando aplicado em espécies que realizam autofecundação, como sorgo, porque:

1. Não é possível saber se as plantas selecionadas são homozigotas ou heterozigotas. Com isso, podem ser necessários mais ciclos de seleção, para uniformizar as características desejáveis.
2. O ambiente pode afetar muito a expressão das características, e dessa forma é difícil afirmar o bom desempenho tendo por base o genótipo.
3. Os campos para a seleção devem ser alocados em regiões típicas de cultivo, onde as características que se deseja selecionar se expressem bem.
4. A seleção massal não é eficiente para características de baixa herdabilidade.

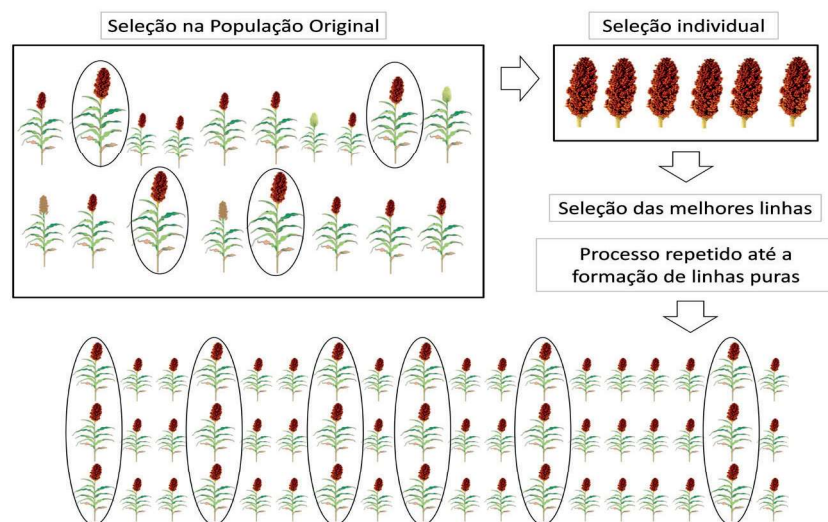
De forma geral a seleção massal é um método simples, mas eficiente, que requer baixo custo operacional, sendo esta uma das principais vantagens. Este custo é reduzido porque a mão de obra não precisa de qualquer tipo de especialização, o que torna o trabalho visual e muito simples de ser realizado (Santos et al., 2005).

### Seleção de Linhas Puras

Neste método de seleção de linhas puras a seleção individual de plantas é seguida da avaliação independente de cada progênie. Diferentemente da seleção massal, onde plantas individuais são submetidas ao "teste" em



conjunto, nesta metodologia as plantas que originam progênes superiores são encaminhadas e colhidas separadamente, sem misturar as sementes.



**Figura 5.** Representação do esquema de seleção de linhas puras.

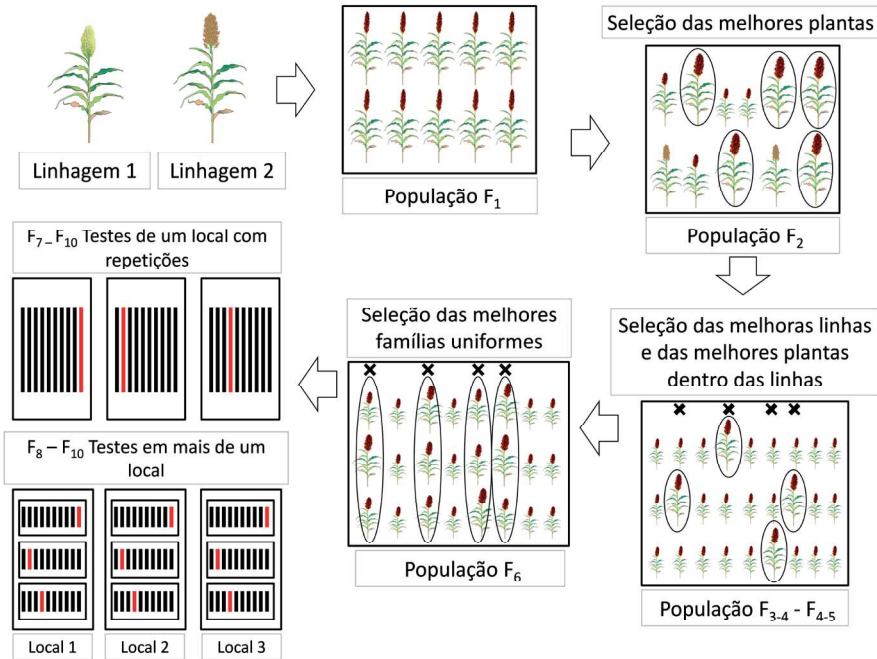
Cada planta selecionada é colhida separadamente, e as sementes oriundas da panícula selecionada irão constituir uma progênie (Figura 5). As sementes das panículas selecionadas são distribuídas em linha, e a nova avaliação quanto a rendimento, uniformidade e características relacionadas será feita por comparação entre as linhas. As melhores linhas de progênie com maior rendimento e caracteres desejáveis são selecionadas. Posteriormente, seu desempenho é comparado com as variedades de seleção para identificar a melhor linha como nova entrada (Rooney, 2004; Diallo et al., 2019). Dentro das progênes de plantas individuais selecionadas não haverá variação, mas entre as progênes de plantas selecionadas há variação genética.

### Método do Pedigree

Os progenitores selecionados para formar o cruzamento parental inicial devem ser complementares para a característica de interesse e com alta frequência de alelos favoráveis (Ramalho et al., 2012; Cruz et al., 2014). No método de pedigree, o início de seleção das plantas individuais ocorre em  $F_2$ , pois é essa geração que exibe maior variação genética observada (Cruz et al., 2011). Portanto, recomenda-se que o tamanho dessa população nesta

## Melhoramento Genético de Sorgo

geração deve ser máximo (Figura 6). Na geração  $F_2$  o melhorista deve iniciar as anotações de plantas individuais, registro que facilita a genealogia da planta ou o pedigree, sendo este o registro da futura linhagem.



**Figura 6.** Representação esquemática de seleção de Pedigree

Em cada geração de segregação, deve-se realizar seleção entre famílias e dentro das famílias, selecionando plantas individuais, até que se tornem homocigotas. Simultaneamente à seleção, as progênies são testadas e avaliadas quanto ao seu desempenho. Com base no desempenho das progênies, as plantas superiores que produzem boas progênies são conduzidas por autofecundação e colhidas separadamente. Nas primeiras gerações ( $F_3$ ,  $F_4$  e  $F_5$ ), a seleção é praticada dentro e entre as famílias, mas nas gerações posteriores ( $F_6$  e  $F_7$ ) a seleção é principalmente entre famílias e não dentro das famílias, pois dentro de cada linha as progênies se tornam uniformes, já que a autofecundação gera o aumento da homocigose na progênie selecionada. O método genealógico é um método comumente empregado no melhoramento do sorgo, e muitas variedades atuais são resultados desse método.

### Método Bulk

O método Bulk é também conhecido como método de população ou método massal de melhoramento de plantas (Borém et al., 2009). Nas gerações segregantes ( $F_2$  a  $F_6$ ), as plantas são selecionadas em conjunto, formando um “bulk” de sementes. Este “bulk” de sementes das plantas selecionadas é seguido por várias gerações e, no final do agrupamento, as plantas individuais são selecionadas com base no desempenho de sua progênie e são colhidas separadamente (Figura 7).

As plantas individuais selecionadas são avaliadas como no método de reprodução genealógica. Essas plantas selecionadas formam as parcelas que serão avaliadas com repetições, e, subsequentemente, as famílias superiores selecionadas são submetidas a uma avaliação em mais locais (Figura 7).

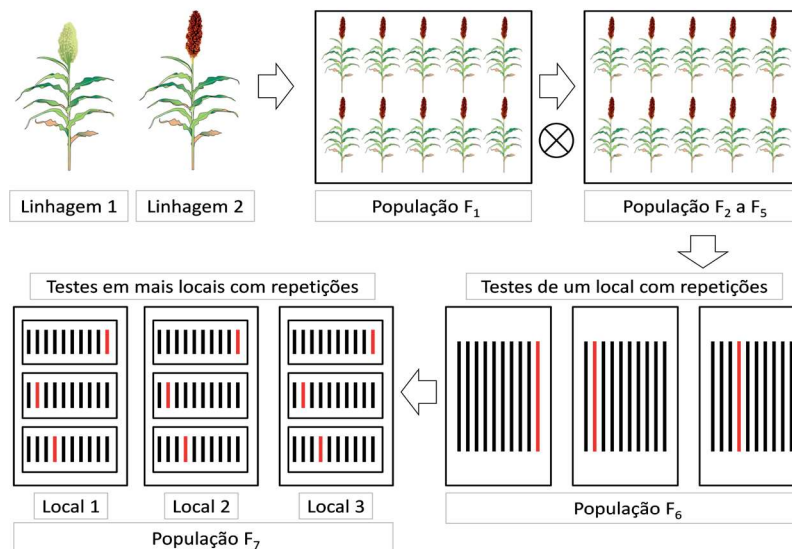


Figura 7. Representação esquema de seleção Bulk e SSD.

### Método SSD – *Single Seed Descent*

O método SSD é a modificação do método de seleção massal, sendo muito popular entre as diversas culturas, por causa da sua praticidade e utilidade (Borém et al., 2009). Os principais objetivos deste método incluem o avanço da máxima variação genética entre as linhagens cruzadas, a fim de obter a população segregante, além de atingir rapidamente o nível de

## Melhoramento Genético de Sorgo

homozigose desejado. O avanço das gerações ( $F_2:F_5$ ) pode ser realizado fora de épocas de plantios da cultura do sorgo ou em casas de vegetação, pois nesta fase ocorre apenas o avanço das gerações com uma única semente por planta, sem a necessidade de avaliação.

O método SSD consiste em, a partir de uma planta  $F_2$ , colher uma única semente por panícula (semente  $F_3$ ). Essa semente  $F_3$  colhida é misturada com a de outras plantas, constituindo a geração  $F_3$ . Entretanto a semente dessa geração consiste em semente  $F_4$ . Esse processo se repete até as progênies  $F_{5,6}$ , quando as progênies já estão uniformes. A partir dessa geração, as panículas individuais são colhidas e avaliadas em ensaios iniciais em um local. As progênies selecionadas após essa geração são avaliadas em mais locais ou usadas em cruzamentos testes.

A principal vantagem deste método é a representação de cada planta  $F_2$  no final da população, permitindo assim ao melhorista maior representação de variância genética máxima do cruzamento. Dessa maneira, este método se torna mais econômico que os demais, porque requer menor espaço e tempo, mão de obra e recursos. No entanto, dentre as desvantagens está a perda de planta única, que pode levar à redução na variabilidade e pequena ou nenhuma oportunidade de seleção nas gerações iniciais.

### Método de Retrocruzamento

O método de retrocruzamento é utilizado para melhorar características específicas em linhagens ou cultivares já pertencentes ao programa de melhoramento de sorgo, quando estas apresentam uma ou algumas características indesejáveis. E, neste caso, um exemplo a ser citado é a introdução da resistência a doenças, pragas e patógenos, dentre outras características controladas por poucos genes.

O método de retrocruzamento foi proposto por Harlan e Pope (1922), inicialmente na cultura da cevada. Esta metodologia consiste em substituir o alelo indesejável da linhagem receptora, ou seja, uma linhagem já pertencente ao programa de melhoramento de sorgo (linha de elite), pelo alelo desejável de uma outra linhagem doadora. A linhagem doadora é um genótipo de origem identificada, com expressão de alto nível da característica que se deseja repassar à linhagem receptora.

A progênie  $F_1$  obtida pelo cruzamento das linhagens receptora e doadora é repetidamente retrocruzada com a linhagem receptora para substituir os alelos das linhagens doadoras por alelos da linhagem receptora,

objetivando no final recuperar o genótipo da linhagem receptora com as novas características desejáveis.

Durante a transferência do segmento de genoma desejado para o pai recorrente, algum fragmento indesejado do genoma do pai doador também é transferido, o que é referido como arrasto de ligação. Para reduzir o arrasto de ligação, mais números de eventos de recombinação são necessários para isolar a linha com traços indesejáveis reduzidos e mais semelhantes ao pai receptor na maioria dos traços, exceto traço-alvo (Figura 8). Como mostrado na Figura 8, na medida em que são realizados os retrocruzamentos, a linhagem receptora vai sendo purificada, até que em  $RC_4$  o grau de similaridade entre as linhagens recorrente (receptora) e doadora é menor que 5%.

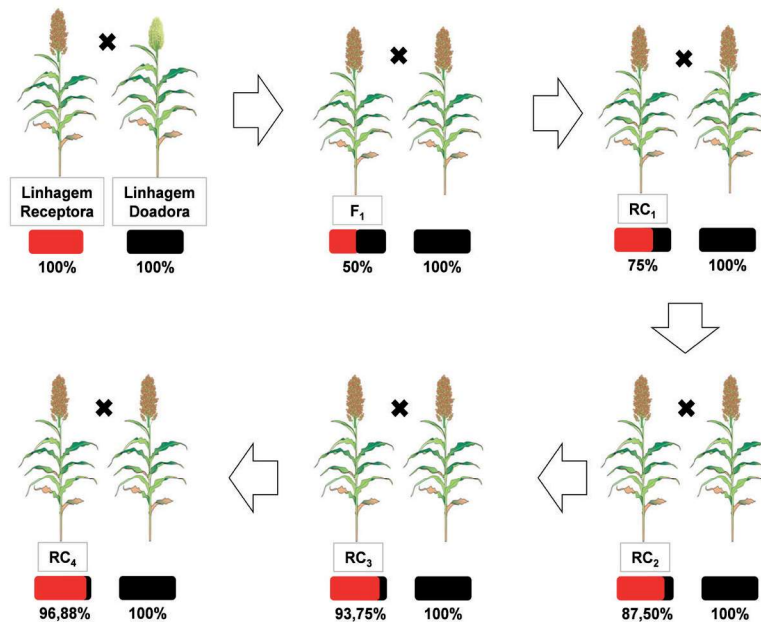


Figura 8. Representação esquema de retrocruzamento.

O método de retrocruzamento conserva todos os caracteres favoráveis da cultivar-elite junto com o traço desejado da linha do doador. Em cada geração de retrocruzamento, a seleção é feita para a característica-alvo e desempenho das plantas semelhante a caracteres parentais recorrentes. Esta metodologia pode ser potencializada com uso de marcadores moleculares e seleção assistida, exemplo de trabalhos desenvolvidos pelo Programa de

## Melhoramento Genético de Sorgo

Melhoramento de Sorgo da Embrapa é a seleção assistida por marcadores para os genes de tolerância ao alumínio (*Alt<sub>SB</sub>*) e baixo teor de lignina (*bmr6*) (Silva et al., 2020; Magalhães et al., 2013; Oliveira et al., 2010).

O Programa de Melhoramento de Sorgo da Embrapa realizou a incorporação do alelo *bmr6* em linhagens-elites de sorgo biomassa, visando melhorar a qualidade da biomassa para uso como forragem para alimentação animal ou produção de bioenergia (etanol celulósico, biogás, bióleos, etc.). Foram conduzidos dois programas de retrocruzamento separadamente, em que a linhagem CMSXS170 foi a doadora do alelo *bmr6* e as linhagens CMSXS652 e IS23777 foram as recorrentes. Através de marcadores moleculares específicos para o alelo *bmr6*, foi empregada a seleção assistida para a característica nervura-marrom nas gerações RC1F1 e RC2F1. Adicionalmente, utilizaram-se marcadores SNPs polimórficos e distribuídos ao longo do genoma do sorgo para acelerar a recuperação do genoma recorrente. Foram obtidas linhagens novas de sorgo biomassa com o alelo *bmr6* com pouco menos de dois anos, mostrando que os marcadores SNPs foram eficientes na identificação de indivíduos com mais de 99% da proporção de recuperação do genoma recorrente (Silva et al., 2020). No sorgo, o retrocruzamento também é muito aplicado para incorporar o gene da macho-esterilidade citoplasmática em linhagens mantenedoras (B), visando o desenvolvimento de linhagens macho-estéril (A) utilizadas como fêmeas na obtenção de híbridos em escala comercial (Reddy et al., 2005; Silva et al., 2020).

### Melhoramento Populacional

O melhoramento populacional se refere a uma técnica para isolar indivíduos (genótipos) superiores para serem usados como população de intercruzamento e sintetizar uma população-base, aumentando a frequência de genes e alelos favoráveis na população (Menezes et al., 2019; Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016). O melhoramento populacional envolve seleção recorrente, na qual as plantas são selecionadas com base no desempenho geral (seleção em massa) ou desempenho das progênies (seleção de progênies) (House, 1985), resultando em uma fonte contínua de novas entradas no programa de seleção.

Como o sorgo é uma cultura que se reproduz predominantemente por autofecundação, o acasalamento aleatório na população é garantido usando o sistema de macho-esterilidade genética do recessivo (*msms*) (Menezes et al.,

2019; Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016). Existem alguns genes de macho-esterilidade genética relatados em sorgo ( $ms_1$  ao  $ms_8$ ) (Reddy et al., 2005). E, com isso, grande parte dos programas de melhoramento de sorgo utiliza o gene  $ms_3$  no desenvolvimento de populações. Esta técnica com o uso da macho-esterilidade genética facilita o processo de hibridação da cultura, evitando o trabalho dispendioso da emasculação, entretanto alguns cuidados durante a antese das plantas são de extrema importância.

Os doadores a serem incorporados na população são cruzados com as linhas  $ms_3ms_3$ . Os  $F_1$ s (férteis) são autofecundados, em razão da presença dos genes  $Ms_3ms_3$  em heterozigose, sendo necessária uma geração de autofecundação para que os genótipos  $ms_3ms_3$  possam se expressar. As plantas que formam a geração  $F_2$  são usadas para um retrocruzamento, ou destinadas ao primeiro ciclo de recombinação em campo isolado. Identificam-se as  $F_2$  macho-estéreis durante o florescimento, que são colhidas separadamente. Em seguida, cada panícula é separada e misturada, em igual número de sementes, dando origem à segunda geração de recombinação, processo que é repetido até a terceira geração, quando a proporção de plantas férteis e de estéreis se aproxima de 1:1.

Um esquema de desenvolvimento de população-base de sorgo sacarino foi realizado por meio de ciclos de seleção recorrente (Figura 9). Neste caso, o primeiro passo foi realizar o cruzamento entre a fonte de macho-esterilidade ( $ms_3ms_3$ ) e as linhagens R, com altos teores de açúcar. Na sequência, a geração  $F_1$  gerada é autofecundada, dando origem à geração  $F_2$ , que é retrocruzada novamente com a recorrente (linhagem R). Em seguida, inicia-se o primeiro ciclo de recombinação, em que são colhidas panículas macho-estéreis, formando um bulk, levado à próxima geração. Por fim, na terceira geração de recombinação, a proporção entre plantas férteis e estéreis está na dimensão desejada de 1:1.

O programa de melhoramento genético do sorgo da Embrapa desenvolveu uma população-base com linhagens restauradoras de fertilidade (R) de sorgo sacarino (Parrella et al., 2016). Após o desenvolvimento da população-base (ciclo 0), foram selecionadas 196 progênies macho-estéreis com base no teor de sólidos solúveis que foram semeadas e avaliadas individualmente em campo em dois ambientes (Lavras-MG e Sete Lagoas-MG). Houve variação genética entre as progênies de meios-irmãos para todos os caracteres agrônômicos e tecnológicos estudados, expressando a existência de variabilidade genética na população. Com base nos resultados

obtidos foram selecionadas as 40 melhores progênies pela variável toneladas de Brix por hectare para proceder a nova etapa de recombinação a fim de constituir a população do ciclo 1. Posteriormente, foram tomadas aleatoriamente 40 progênies de meios-irmãos de cada ciclo (ciclos 0 e 1), as quais foram avaliadas em Lavras e Sete lagoas a fim de estimar o progresso genético. O progresso genético obtido foi de 1,17% para a característica dias para florescimento (FLOR), 3,73% para altura de plantas (AP), 8,04% para produção de massa verde (PMV), 0,24% para sólidos solúveis totais (SST) e 8,65% para toneladas de Brix por hectare (TBH) (Leite et al., 2020).

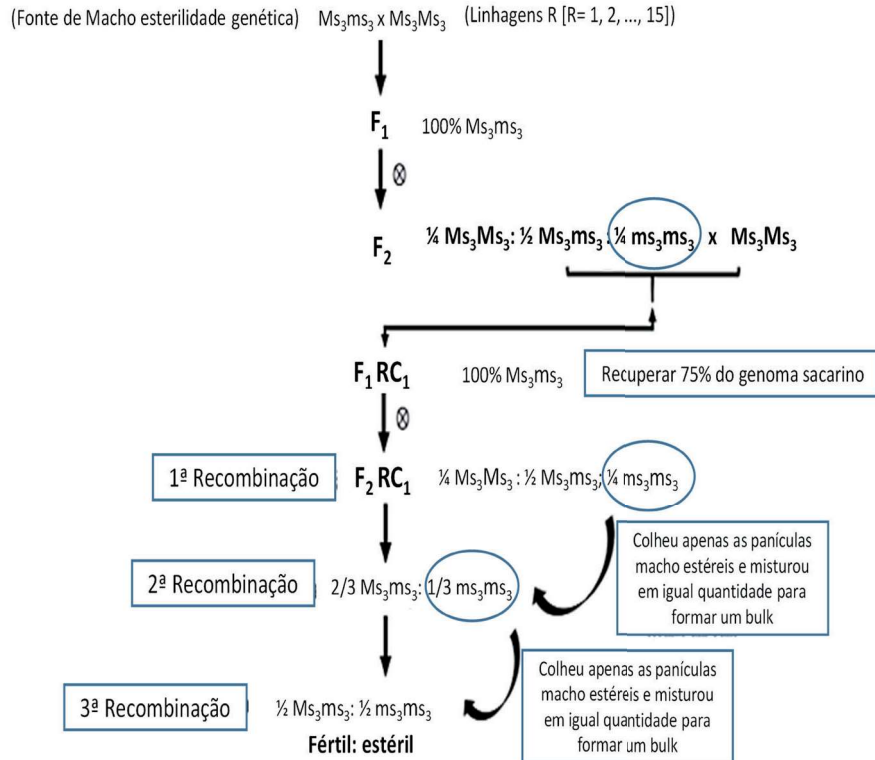
### **Testcross**

Griffing (1956) foi um dos responsáveis pelo desdobramento da capacidade de combinação dos cruzamentos, em capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC). Isso possibilitou a compreensão e aplicação da técnica de testcross, como uma etapa final do melhoramento de sorgo, onde se realiza o desenvolvimento de uma linhagem parental para compor o cruzamento de híbridos. Com isso, após as novas linhagens parentais serem desenvolvidas, a próxima etapa do processo é a avaliação dos seus respectivos híbridos.

Vencovsky (1970) ressalta que a CGC se relaciona com a performance média de um genitor em uma série de cruzamentos híbridos, sendo esta associada à ação aditiva dos genes. Já a CEC trata do comportamento de um cruzamento híbrido específico, sendo esta capacidade associada aos efeitos da dominância, podendo ser utilizada como um indicador da variabilidade presente entre cruzamentos. Dessa forma, um dos objetivos do programa de melhoramento de sorgo é encontrar combinações híbridas com maior capacidade específica de combinação, e que estas envolvam pelo menos um dos progenitores com alta CGC (Cruz et al., 2012; Ramalho et al., 2012).

O princípio de aplicação do testcross é de que cada nova linhagem parental, seja ela restauradora (linhagem R) ou macho-estéril (linhagem A), deve ser testada com linhagens-elites, denominadas de testadores. Novas linhagens restauradoras são cruzadas com duas ou três linhagens-elites A, já conhecidas pelo melhorista, com características agronômicas desejáveis e boa produção de sementes. De maneira simultânea novas linhagens A são cruzadas com dois ou três linhagens-elites R, também com características agronômicas desejáveis e ótima produção de pólen. As linhagens A serão as linhagens produtoras de sementes híbridas, e as linhagens R serão as





**Figura 9.** Esquema de desenvolvimento de população-base de sorgo sacarino por meio de ciclos de seleção recorrente.

Adaptado de Parrella et al. (2016).

linhagens fornecedoras de pólen em campos de produção de sementes, conforme relatado em capítulo deste livro. Portanto, tanto as linhagens-élites já desenvolvidas quanto também as novas linhagens em cruzamentos testcross devem possuir características de alto desempenho agrônômico.

Estes testcrosses são avaliados com um mínimo de três a quatro locais de teste, em regiões geográficas distintas (Zhao; Dahlberg, 2019). O desempenho dos híbridos topcrosses é comparado, em termos de produtividade, ciclo e outros caracteres, com híbridos-testemunhas (híbridos comerciais), no intuito de se encontrar novos híbridos que poderão ser lançados, de acordo com o plano estratégico de mercado da empresa. Os híbridos selecionados serão avançados e testados em mais ambientes.

Apesar da necessidade de teste em outros locais para validação de desempenho e indicação de zoneamento de risco para os híbridos, uma das vantagens é que, nos estágios iniciais de desenvolvimento da linha parental, há possibilidade de conduzir plantios fora de época em casa de vegetação. Vale ressaltar o ganho de tempo, pela viabilidade de realizar duas ou três gerações por ano para operações como a esterilização das linhagens B, durante o processo de transferência da macho-esterilidade.

As novas linhagens parentais A ou R, que exibiram bom desempenho em cruzamento com os vários testadores, de forma geral, apresentam alta capacidade de combinação geral (CGC). Já as novas linhagens parentais, A ou R, que exibirem desempenho em cruzamento específico com algum testador, apresentam potencial alto de capacidade específica de combinação (CEC).

As novas linhagens parentais, que mostraram maior tendência a CGC são cruzadas em um painel de linhas-elite adicionais, para gerar novos híbridos F<sub>1</sub>. Contudo, as linhagens que apresentaram CEC com um testador específico devem ter seu cruzamento avaliado em mais locais, verificando assim o potencial deste cruzamento híbrido, que precisa passar por testes mais intensivos.

## **Referências**

- ACQUAAH, G. Breeding sorghum. In: ACQUAAH, G. **Principles of plant genetics and breeding**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. p. 617-628.
- AXTELL, J.; KAPRAN, I.; IBRAHIM, Y.; EJETA, G.; ANDREWS, D. J. Heterosis in sorghum and pearl millet. In: GENETICS and exploitation of heterosis in crops. Madison: Crop Science Society of America, 1999. p. 375-386.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 523 p.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. 275 p.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 529 p.

- CARENA, M. J.; HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B. Quantitative genetics in maize breeding. In: CARENA, M. J.; HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B. **Selection: experimental results**. New York: Springer, 2010. p. 291-382.
- COORS, J. G. Selection methodology and heterosis. In: COORS, J. G.; PANDEY, S. (ed.). **Genetics and exploitation of heterosis in crops**. Madison: ASA: Crop Science Society of American, 1999. p. 225-245.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. v. 1, 480 p.
- CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria aplicada ao estudo de diversidade genética**. Visconde de Rio Branco, MG: Suprema, 2011.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- DIALLO, C.; RATTUNDE, H. F. W.; GRACEN, V.; TOURÉ, A.; NEBIÉ, B.; LEISER, W.; SIDIBÉ, B. Genetic diversification and selection strategies for improving sorghum grain yield under phosphorous-deficient conditions in West Africa. **Agronomy**, v. 9, n. 11, article 742, 2019.
- DOGGETT, H. Mass selection systems for sorghum, *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 8, n. 3, p. 391-392, 1968.
- DOGGETT, H. **Sorghum**. London: Longmans, Green, 1970.
- FOSTER, K. W.; JAIN, S. K.; SMELTZER, D. G. Responses to 10 cycles of mass selection in an inbred population of grain sorghum. **Crop Science**, v. 20, n. 1, p. 1-4, 1980.
- GARDNER, C. O. An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yield of corn. **Crop Science**, v. 1, n. 4, p. 241-245, 1961.

HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B.; CARENA, M. J. **Breeding plans. quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. p. 577-653.

HARLAN, H. V.; POPE, M. N. The use and value of back-crosses in small-grain breeding. **Journal of Heredity**, v. 13, n. 7, p. 319-322, 1922.

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

LEITE, P. S. da S.; BOTELHO, T. A.; RIBEIRO, P. C. de O.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C.; NUNES, J. A. R. Intrapopulation recurrent selection in sweet sorghum for improving sugar yield. **Industrial Crops and Products**, v. 143, article 111910, 2020.

LERSTEN, N. R. **Reproduction and seed development. hybridization of crop plants**. Madison: American Society of Agronomy: Crop Science Society of America, 2015.

MAGALHÃES, J. V.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E. **Melhoramento molecular da tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 90).

MENEZES, C. B.; OLIVEIRA, I. C. M.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E. **Uso da macho-esterilidade no melhoramento genético de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 16 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 255).

OLIVEIRA, B. C. F. S.; MOURA, P. M. A.; MACIEL, B. H.; GUIMARÃES, C. T.; CANIATO, F. F.; FONSECA JÚNIOR, S. C.; JARDIM, S. N.; MAGALHÃES, J. V. **Utilização de marcadores moleculares na seleção assistida para tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 155).

PARRELLA, R. A. da C.; SCHAFFERT, R. E.; LEITE, P. S. da S.; NUNES, J. A. R.; MENEZES, C. B. de; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, N. N. L. D. **Desenvolvimento de populações de sorgo sacarino de cruzamento ao acaso para seleção recorrente intrapopulacional**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 217).

RAKSHIT, S.; BELLUNDAGI, A. Conventional breeding techniques in sorghum. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (Ed.). **Breeding sorghum for diverse end uses**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 77-91.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2012. 522 p.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. In: JANICK, J. (Org.). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley & Sons, 2005. v. 25, p. 139-172.

RIBAS, P. M. Importância econômica. In: RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Cultivo do sorgo**. 4. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 2).

RIBAS, P. M. **Sorgo**: introdução e importância econômica. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 26).

RIBEIRO, P. C. de O.; MARÇAL, T. de S.; OLIVEIRA, I. C. M.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, A. B. de; PARRELLA, R. A. da C. Insight into genetic potential of male sterile sweet sorghum A-lines for agroindustrial traits using tester R-lines. **Industrial Crops and Products**, v. 153, 112577, 2020.

ROONEY, W. L. Sorghum improvement-integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in Agronomy**, v. 83, n. 10, p. 37-109, 2004.

## Melhoramento Genético de Sorgo

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento do sorgo. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 429-466.

SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. da C.; MENEZES, C. B. de. **Síntese e melhoramento de populações de intercruzamento para aumentar recombinação genética e facilitar seleção recorrente em sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 8 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 227).

SILVA, M. J.; DAMASCENO, C. M. B.; GUIMARÃES, C. T.; PINTO, M. O.; BARROS, B. A.; CARNEIRO, J. E. S.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. C. Introgression of the bmr6 allele in biomass sorghum lines for bioenergy production. **Euphytica**, v. 216, n. 6, article 95, 2020.

SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum**: origin, history, technology, and production. New York: John Wiley & Sons, 2000. v. 2.

VENCOVSKY, R. **Alguns aspectos teóricos e aplicados relativos a cruzamento dialélicos de variedades**. 1970. 59 f. Tese (Livre-Docencia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1970.

ZHAO, Z.-Y.; DAHLBERG, J. A. **Sorghum**: methods and protocols. New York: Springer, 2019. 281 p.