



Sorgo

Cultivo do Sorgo

Sumário

Ecofisiologia

Dados Sistema de Produção

Embrapa Milho e Sorgo

Sistema de Produção, 2

ISSN 1679-012X 2

Versão Eletrônica
9ª edição | Jul/2015



Cultivo do Sorgo

Ecofisiologia

Introdução

O sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) é uma planta originária da África. Segundo Doggett (1988), os sorgos cultivados atualmente se originam do silvestre *Sorghum bicolor* subsp. *arundinaceum*, e a maior variação do gênero *Sorghum* se encontra no quadrante centro-oeste da África, abaixo do Saara, na região da Etiópia-Sudão, de onde o gênero ancestral, com um número básico de cinco cromossomas, provavelmente se originou há 5.000-6.000 anos (Berenji et al., 2011).

A planta de sorgo se adapta a uma ampla variação de ambientes e produz sob condições desfavoráveis à maioria dos outros cereais. Devido a sua resistência à seca, é considerado como um cultivo mais apto para as regiões áridas com chuvas escassas (Tabosa et al., 2002; Monteiro et al., 2004).

Os componentes do rendimento do sorgo, dentro de uma densidade populacional de 30 a 60 plantas.m⁻² (300 mil a 600 mil plantas.ha⁻¹), apresentam um número de sementes por panícula de 1.500 a 12.000 e um peso de sementes de 25 a 35 mg.

O sorgo apresenta ampla utilidade na dieta alimentar humana, de forma direta (farinhas dos grãos) e indireta (na indústria de rações e volumosos em pastoreios diretos ou silagens para animais). O sorgo é um componente importante do mix de insumos energéticos que entram na composição de rações para aves, suínos, bovinos, no segmento de *pet food* e, recentemente, na produção do bioetanol (Fialho et al., 2002; Davila-Gomez et al., 2011).

O sorgo é uma planta autógama, com baixa taxa de fecundação cruzada. A planta de sorgo apresenta metabolismo C₄, resposta fotoperiódica típica de dia curto e de altas taxas fotossintéticas. A grande maioria dos materiais genéticos comerciais de sorgo requerem temperaturas superiores a 21 °C para um bom crescimento e desenvolvimento (Paul 1990). A planta de sorgo tolera o déficit de água e o excesso de umidade no solo, mais do que a maioria dos outros cereais e pode ser cultivada numa ampla faixa de condições de solo (Dogget 1970; Sharma et al., 2005; Bibi et al., 2010). Durante a primeira fase de crescimento das culturas, que vai do plantio até a iniciação da panícula (EC1), é muito importante a rapidez da germinação, emergência e estabelecimento da plântula, uma vez que a planta é pequena, tem um crescimento inicial lento e um pobre controle de plantas daninhas. Nesta fase, pode reduzir seriamente o rendimento de grãos. Embora não existam dados concretos disponíveis, acerca de como os estádios iniciais da cultura podem afetar o rendimento, é lógico pensar que um bom estande, com rápida formação de folhas e sistema radicular, tornará aquela cultura apta a enfrentar

possíveis estresses ambientais durante o seu ciclo (Eastin, 1972). Os híbridos, de maneira geral, têm uma formação de folhas e sistema radicular mais rápidos do que linhagens ou variedades. Quando se compara materiais forrageiros, principalmente variedades, estas são mais lentas que os graníferos.

Na fase seguinte (EC2), que compreende a iniciação da panícula até o florescimento, vários processos de crescimento, se afetados, poderão comprometer o rendimento. São eles: desenvolvimento da área foliar, sistema radicular, acumulação de matéria seca e o estabelecimento de um número potencial de sementes. Esse último é, provavelmente, o mais crítico desde que maior número de grãos tem sido geralmente o mais importante componente de produção associado ao aumento de rendimento em sorgo. Na terceira fase de crescimento (EC3), que vai da floração à maturação fisiológica, os fatores considerados mais importantes são aqueles relacionados ao enchimento de grãos (Dogget 1970; Eastin, 1972; Paul 1990; Barnabas et al., 2008; Lopes et al., 2011).

Durante as três etapas de crescimento, a fotossíntese, o particionamento de fotoassimilados e a divisão e expansão celular devem estar ajustados visando um bom rendimento da cultura. É lógico pensar que o rendimento final é função tanto da duração do período de enchimento de grãos como da taxa de acumulação de matéria seca diária (Dogget 1970).

Estádios de desenvolvimento do sorgo

O conhecimento do padrão diferencial de acúmulo de matéria seca e de nutrientes, durante o ciclo da cultura do sorgo, permite avaliar as necessidades de adequadas práticas de manejo.

Durante os primeiros 20 ou 30 dias após a emergência, as plantas crescem lentamente; depois, o crescimento e a acumulação de matéria seca são rápidos e quase lineares, até a maturação fisiológica. Até os 30-40 dias após a emergência, as plantas se constituem praticamente da bainha e da lâmina; e, após este período, começa o alongamento do colmo e o ganho rápido de peso.

A melhor adequação de práticas de manejo da cultura do sorgo está associada aos estádios fenológicos da planta, que variam de acordo com cultivar, condições edafo-climáticas e práticas de manejo. As fases apresentadas a seguir, representam o desenvolvimento de uma cultivar de sorgo com ciclo de 100 dias, aproximadamente (Vanderlip & Reeves, 1972):

Estádio 0 (Emergência) – da semente ao surgimento do coleóptilo na superfície do solo, que ocorre, geralmente, dentro de 4 a 10 dias, dependendo das condições ambientais (principalmente, pela umidade, temperatura, oxigênio e pela qualidade da semente).

Estádio 1 (Visível a lígula/colar ou cartucho da 3ª folha) – ocorre, em condições normais, com cerca de 10 dias após a emergência.

Estádio 2 (Visível a lígula/colar da 5ª folha) – ocorre com três semanas após a emergência.

Estádio 3 (Diferenciação do ponto de crescimento) – ocorre cerca de 30 dias após a emergência e representa a mudança do ponto de crescimento de vegetativo para reprodutivo. Esta fase é determinada pelas condições do ambiente e pelas características genéticas da cultivar. O período do plantio à diferenciação do ponto de crescimento é de aproximadamente um terço do período necessário para a maturação fisiológica, ou ciclo da cultura. Neste período inicia o alongamento rápido do colmo, quando aproximadamente 7 a 10 folhas estão completamente desenvolvidas.

Estádio 4 (Visível a última folha) – ocorre o rápido alongamento do colmo. Todas as folhas estão completamente desenvolvidas, com exceção das últimas 3 ou 4.

Estádio 5 (Emborrachamento) – Todas as folhas estão completamente desenvolvidas, resultando a máxima área foliar. A panícula alcança seu comprimento máximo, dentro da bainha da folha bandeira.

Estádio 6 (50% de floração) – O período da emergência a 50% de floração (cerca de 60 dias) é de aproximadamente 2/3 do período da emergência à maturação fisiológica.

Estádio 7 (Leitoso) – Cerca de 50% da matéria seca dos grãos já foram acumulados (cerca de 70 dias após a emergência), e o peso do colmo diminui.

Estádio 8 (Pastoso) – Cerca de $\frac{3}{4}$ de matéria seca dos grãos já foram acumulados (cerca de 85 dias após a emergência).

Estádio 9 (Maturação fisiológica) – Os grãos estão com 22 a 23% de umidade (cerca de 95 dias após a emergência).

Altura da planta e desenvolvimento inicial das folhas

A altura da planta é importante para sua classificação. Pode variar desde 40 cm até 4 m. A altura do caule até o extremo da panícula varia segundo o número e a distância dos entrenós e também segundo o pedúnculo e a panícula. A quantidade de nós está determinada pelos genes da maturação e por sua reação ao fotoperíodo e a temperatura. A distância dos entrenós varia segundo as combinações de quatro ou mais fatores genéticos e segundo o ambiente. Por outro lado, a distância do pedúnculo e da panícula com frequência são independentes.

A altura da planta, portanto, é controlada por quatro pares de genes principais (*dw1*, *dw2*, *dw3* e *dw4*), os quais atuam de maneira independente e aditiva sem afetar o número de folhas e a duração do período de crescimento (Arnon, 1972). As plantas com os genes recessivos nos quatro *loci* resultam em porte mais baixo (60-80 cm), caracterizadas pelo nanismo e são chamadas “anãs-4”; enquanto que as plantas com genes recessivos em três *loci* e dominante no outro *locus* são chamadas “anãs-3”. Cultivares graníferos normalmente são “anãs-3 e cultivares forrageiras são “anãs-2 ou “anãs-1”, com genes recessivos em dois ou um *loci* respectivamente. Inibidores de giberelinas em sorgo também tem sido utilizados para diminuir o tamanho das plantas e assim aumentarem a estabilidade do rendimento de grãos, principalmente em situações de seca (Li et al., 2011). A taxa de produção de matéria seca no sorgo é fortemente afetada pela área foliar no primeiro estágio de crescimento (do plantio à iniciação da panícula, Krieg, 1983). A área foliar final é determinada pelas taxas de produção e duração da expansão, pelo número de folhas produzidas e a taxa de senescência, os quais são fatores bastante afetados pelo ambiente (Peacock & Wilson, 1984).

A temperatura, o déficit de água e as deficiências pelos nutrientes, afetam as taxas de expansão das folhas, altura da planta e duração da área foliar, sobretudo nos genótipos sensíveis ao fotoperíodo. Esses efeitos podem ser modificados por mudanças na duração do dia (Dale 1982). A insuficiência de água é uma das causas mais comuns de redução de área foliar nos cereais e está relacionada com a expansão das células (Krieg, 1983; Royo et al., 2004; Araus et al., 2008) (Figura 1). A temperatura noturna baixa, geralmente, atrasa o desenvolvimento dos estádios EC 2 e EC 3.

Existem diferenças consideráveis das taxas diurnas de crescimento das folhas de sorgo, provavelmente como reflexo das diferenças ambientais. Tem-se observado taxas de expansão foliar de aproximadamente 60 cm²/planta/dia o qual se traduz em taxa de crescimento relativo de 70% por dia (Krieg, 1983). As folhas mais velhas mostram taxas de fotossíntese e de crescimento mais baixas, devido a mudanças causadas pela senescência (Dale, 1982).

A quantidade e qualidade de luz também são importantes para a expansão foliar. Folhas que crescem em altas intensidade de luz, tem frequentemente um maior número de células maiores que aquelas que crescem em intensidade de luz mais baixas.

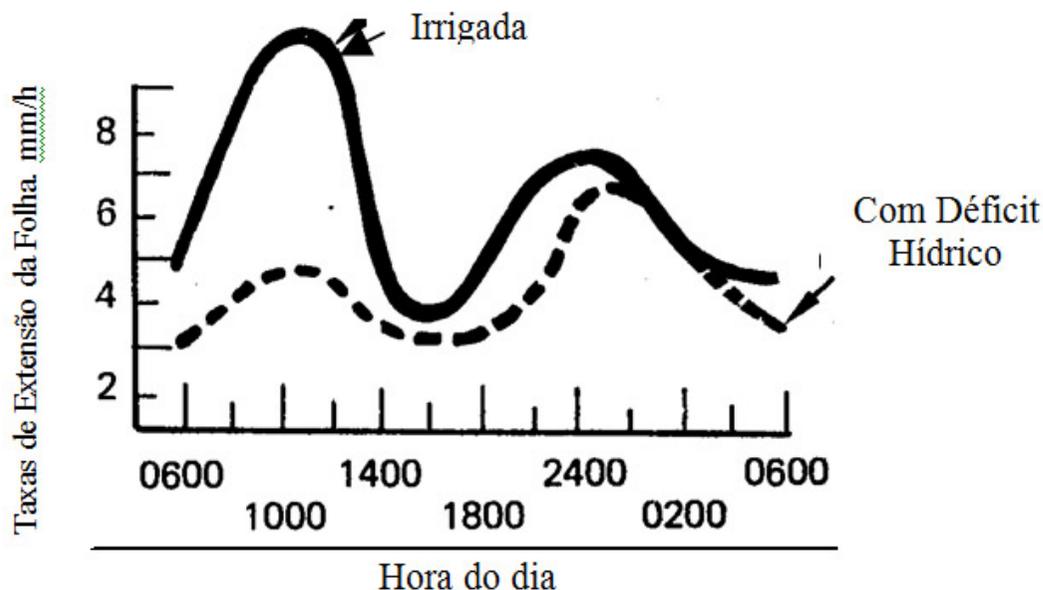


Figura 1. Taxas de extensão da folha de sorgo visível mais jovem, com a presença e ausência de estresse hídrico (Fonte: Adaptado de Krieg, 1983).

O estágio de três folhas completamente desenvolvidas é caracterizado pelo ponto de crescimento ainda abaixo da superfície do solo. Enquanto a taxa de crescimento da planta depende grandemente da temperatura, esse estágio usualmente ocorrerá cerca de 10 dias após a emergência. Da mesma maneira que no milho, como o ponto de crescimento ainda está abaixo da superfície do solo, caso aconteça algum problema com a parte aérea como por exemplo chuva de granizo ou alguma outra intemperia da natureza, isto não matará a planta, ela tem condição de sobreviver. O sorgo, no entanto, não recupera tão vigorosamente como o milho. No estágio de 5 folhas, aproximadamente 3 semanas após a emergência, o ponto de crescimento ainda está abaixo da superfície do solo. A perda das folhas, igualmente, não matará a planta. O crescimento nesse caso será mais vigoroso que no estágio anterior; porém, ainda menos vigoroso que o milho. Nos estádios iniciais da planta de sorgo, ela entra no chamado período de crescimento rápido, acumulando matéria a taxas aproximadamente constantes até a maturação, desde que as condições sejam satisfatórias.

Com cerca de 30 dias após a emergência ocorre a diferenciação do ponto de crescimento (muda de vegetativo, "produtor de folhas" para reprodutivo, "produtor de panícula"). O número total de folhas nesse estágio, já foi determinado e o tamanho potencial da panícula será brevemente determinado. Cerca de 1/3 da área total foliar está totalmente desenvolvida. Neste estágio, a planta se encontra com 7 a 10 folhas, dependendo do seu ciclo, sendo que 1 a 3 folhas baixas já foram perdidas. O colmo aumenta rapidamente, a absorção de nutrientes também é rápida. O tempo compreendido entre o plantio e a diferenciação do ponto de crescimento, geralmente, é cerca de 1/3 do tempo compreendido entre plantio e maturidade fisiológica.

Perfilhamento

O perfilhamento no sorgo forrageiro é uma característica considerada vantajosa, ao passo que para o sorgo granífero pode não ser; sobretudo, quando não há coincidência de maturação entre planta mãe e perfilhos. Neste caso o perfilhamento pode ter efeito negativo no rendimento por sombrear as folhas da planta mãe e pela competição do uso de água e nutrientes do solo (Peacock & Wilson 1984).

O perfilhamento é influenciado pelo grau de dominância apical, que é regulado por fatores hormonais, ambientais e genéticos. O perfilhamento pode ser basal ou axilar. Basal quando se originam de gemas basais (1º nó) logo após o início do desenvolvimento das raízes secundárias ou depois do florescimento. Todas as gemas dos nós são morfologicamente idênticas e possuem potencial para formar perfilho. No entanto, são mantidos em "dormência" através do fenômeno da dominância apical (Dogget 1970; Alam et al., 2009).

A dominância apical é uma característica herdável e pode ser modificada por fatores ambientais como: temperatura, fotoperíodo e umidade do solo. Fatores de manejo da cultura, igualmente, afetam o perfilhamento, como por exemplo a população de plantas. Quanto menor a população de plantas, maior a possibilidade de perfilhamento (Dogget 1970; Stoskopf, 1985; Kim et al., 2010).

O sorgo geralmente produz mais perfilhos em dias curtos e a temperaturas mais baixas. Os perfilhos, naturalmente, são mais sensíveis ao déficit hídrico que a planta mãe (Krieg, 1983). Acredita-se que quanto maior a disponibilidade de fotoassimilados de reserva (carboidratos) na planta maior será o grau de perfilhamento (Lafarge e Hammer 2002b). Dentro deste contexto, quando não há fotoassimilados suficientes para a planta mãe e perfilhos, esses, ainda que iniciados, podem simplesmente não se desenvolver. Qualquer dano no ápice de crescimento na planta pode iniciar o processo de perfilhamento, uma vez que a dominância apical será quebrada. Ex.: dano no ápice por insetos, estresse severo de água ou temperatura. Danos causados por insetos na panícula principal vão originar os perfilhos axilares, os quais se desenvolvem de gemas laterais.

Sistema radicular

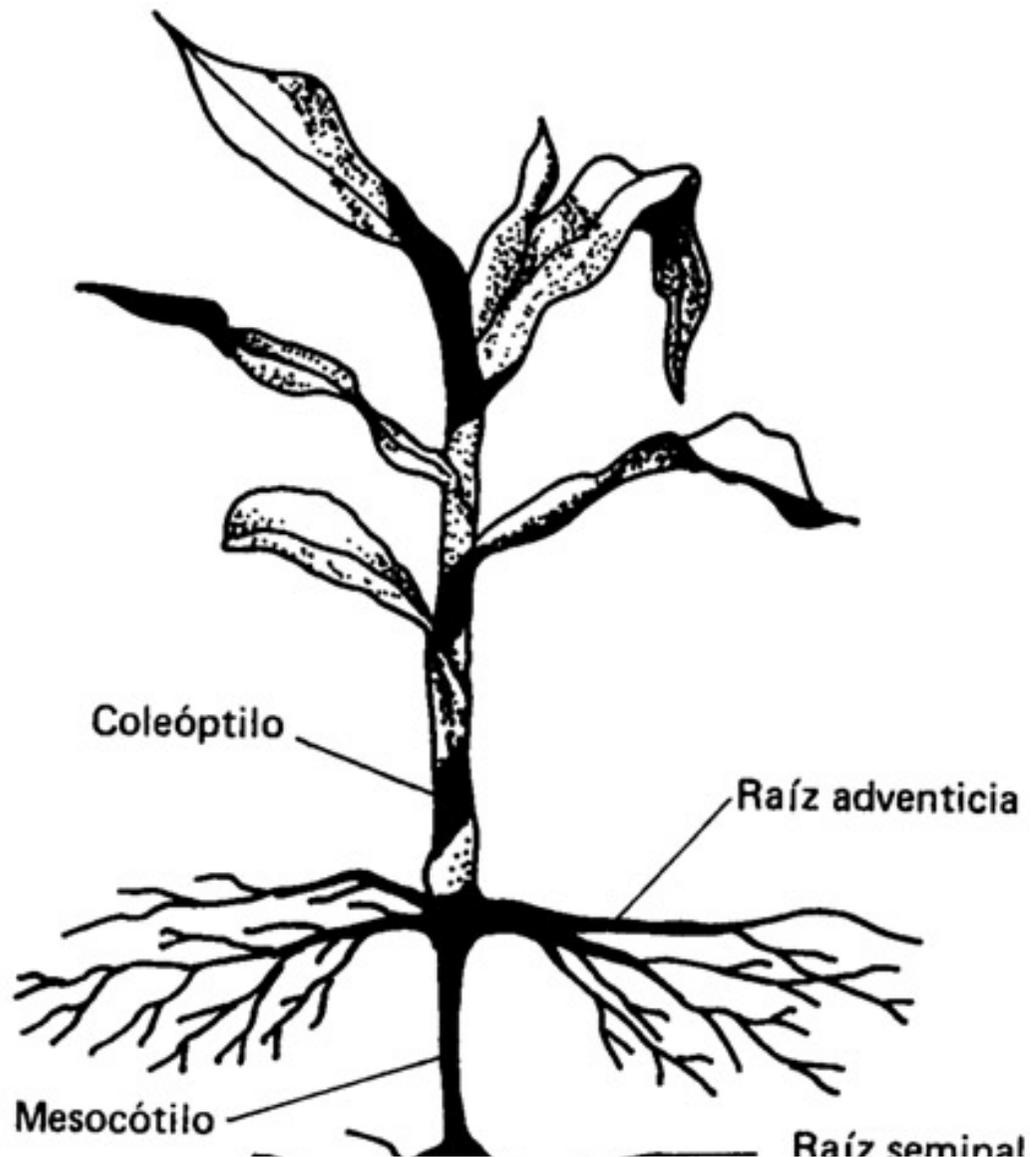
O crescimento das raízes de sorgo está relacionado com a temperatura, e é limitado pela falta de umidade no solo e disponibilidade de fotoassimilados oriundos das folhas (Milthorpe e Moorby 1979; Jordan et al. 1979). Um dos fatores mais importantes que afetam o uso de água e a tolerância à seca é um sistema radicular profundo e denso. Essa característica é bem evidenciada na planta de sorgo (Dogget 1970; Farré e Faci, 2006; Assefa e Staggenborg, 2011).

Os tipos de raízes encontrados no sorgo são: primárias ou seminais, secundárias e adventícias. As primárias podem ser uma ou várias; são pouco ramificadas e morrem após o desenvolvimento das raízes secundárias. As secundárias desenvolvem-se no primeiro nó; são bastante ramificadas e formam o sistema radicular principal (Figura 2). Já as adventícias podem aparecer nos nós acima do solo. Geralmente, aparecem como sinal de falta de adaptação. São ineficientes na absorção de água e nutrientes, sua função é mais de suporte. A espessura da raiz também determina sua função. Normalmente, raízes mais grossas são responsáveis pela fixação da planta no solo e as raízes finas (menor que dois milímetros) são responsáveis pela absorção de água e sais minerais (Wilcox et al., 2004).

Se fizermos uma comparação entre raízes primárias de milho e sorgo, será encontrado que ambas as culturas apresentam basicamente a mesma quantidade de massa radicular; porém, as raízes secundárias do sorgo são, no mínimo, o dobro daquelas encontradas no milho. Além do mais, o sistema radicular do sorgo é mais extenso, fibroso e com maior número de pêlos absorventes. Estas últimas estruturas são simplesmente extensões de células da epiderme da raiz que apresentam importante papel na aquisição de água e nutrientes de baixa mobilidade no solo, como o fósforo; na produção de

substâncias que transitam associações entre planta e microorganismos e também na fixação das plantas. Seu papel na aquisição de nutrientes é devido ao aumento do volume de solo explorado pelas raízes, com a expansão da zona de absorção de fósforo e com a dispersão de exsudados, como ácidos orgânicos, na rizosfera (Dogget, 1970; Yang et al., 2004; Lynch, 2007; Rocha, 2008).

A profundidade do sistema radicular chega até 1,5 m (sendo 80% até 30 cm de profundidade no solo), em extensão lateral alcança 2,0 m. O crescimento das raízes em geral termina antes do florescimento, nessa fase a planta passa a priorizar as partes reprodutivas (panículas) as quais apresentam grande demanda por fotoassimilados.



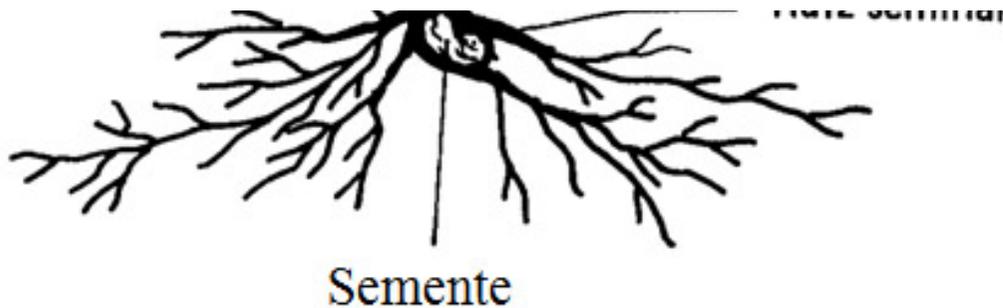


Figura 2. Partes do sistema radicular de uma plantula de sorgo (Fonte: Adaptado de Paul, 1990).

Desenvolvimento da parte aérea

A fotossíntese fornece cerca de 90% a 95% da matéria seca ao vegetal, assim como a energia metabólica requerida para o desenvolvimento da planta (Krieg, 1983). Durante o ciclo, a planta de sorgo depende das folhas como os principais órgãos fotossintéticos, e a taxa de crescimento da planta depende tanto da taxa de expansão da área foliar, como da taxa de fotossíntese por unidade de área foliar. Na medida em que a copa da planta se fecha, outros incrementos no índice de área foliar têm pouco ou nenhum efeito sobre a fotossíntese, a qual passa a depender da radiação solar incidente e da estrutura da copa vegetal. A inflorescência do sorgo, considerada grande para os padrões normais, pode interceptar 25% a 40% da radiação incidente (Eastin, 1983) e fornecer 15% ou mais da fotossíntese total da copa, variando é claro com o genótipo (Fischer & Wilson, 1976).

As taxas de fotossíntese das folhas do sorgo vão de 30 a 100 mg CO₂/dm²/h dependendo do material genético, intensidade de luz fotossinteticamente ativa e da idade das folhas. (Eastin, 1983). Folhas de sorgo contêm um grande número de estômatos. Por sinal, tem sido estimado que estas possuem 50% a mais de estômatos por unidade de área do que a planta de milho, porém os estômatos do sorgo são menores. O número total de folhas numa planta varia de 7 a 30, sendo geralmente de 7 a 14 para genótipos adaptados de sorgo granífero. O comprimento da folha pode chegar a mais de 1 metro, enquanto a largura, de 0,5 a 15 cm. Os fatores que determinam o número de folhas no sorgo são: cultivar, fotoperíodo e temperatura (Clerget et al., 2008). As partes da folha incluem: limbo no qual estão presentes os estômatos localizados nas 2 faces; bainha, a qual se liga ao nó e envolve o internódio acima e a lígula, que é a junção da bainha com o internódio (Dogget 1970). A posição da folha na planta pode variar de vertical a horizontal, concentrando-se mais na base ou ainda serem uniformemente distribuídas na planta. As folhas do sorgo possuem depósito de substância cerosa na junção da bainha com o limbo, o que leva a planta a perder menos água na transpiração, sendo importante para a economia de água, sobretudo em condições de estresse hídrico (Eastin 1972; Burow et al., 2009).

Leva-se de 3 a 6 dias entre a diferenciação de uma folha e a próxima no meristema. A expansão foliar pode continuar mesmo durante o desenvolvimento da panícula, o que pode gerar nesse caso competição por fotoassimilados disponíveis. O embrião em um grão maduro já possui 6 a 7 primórdios foliares. Fato interessante é observado na epiderme superior da folha, onde se observa filas de células especializadas chamadas buliformes que permitem a folha enrolar em condições de estresse hídrico, se constituindo, portanto numa defesa da planta (Lino, 2011).

Espera-se a capacidade de manter a expansão foliar e reter área foliar verde (Stay Green) sob estresse hídrico e de nutrientes para aumentar a interceptação de luz e eficiência do uso da radiação, o que resulta no aumento da produtividade. Em sorgo, a retenção de área foliar verde é considerada uma característica constitutiva (Borrel et al., 2000; Lopes et al., 2011).

Florescimento

O florescimento corresponde ao EC3 que engloba a polinização, fertilização, desenvolvimento e maturação do grão. A diferenciação floral do sorgo é afetada principalmente pelo fotoperíodo e pela temperatura (Craufurd e Qi, 2001; Silva e Rocha, 2006). O período mais crítico para a planta, onde ela não pode sofrer qualquer tipo de estresse biótico ou abiótico vai da diferenciação da panícula à diferenciação das espiguetas (2 a 3 semanas de duração). Em condições normais, a diferenciação da gema floral inicia-se 30 a 40 dias após a germinação (pode variar de 19 a mais de 70 dias). Em climas quentes, o florescimento, em geral, ocorre com 55 a 70 dias após a germinação (pode variar de 30 a mais de 100 dias). Em geral, a formação da gema floral ocorre 15 a 30 cm acima do nível do solo, fato esse que ocorre quando as plantas têm cerca de 50 a 75 cm de altura (Paul 1990).

A diferenciação da gema floral bloqueia a atividade meristemática (divisão celular). Daí para a frente, todo crescimento é devido ao alongamento das células já existentes. Cerca de 6 a 10 dias antes do aparecimento da inflorescência ela pode ser vista como algo semelhante a um "torpedo" dentro da bainha da folha bandeira. As flores na panícula desenvolvem-se sucessivamente do topo para a base (demora de 4 a 5 dias). Estudos de comparação de genótipos de sorgo recentes com antigos identificaram que os híbridos atuais possuem maior comprimento de panícula com um pedúnculo reduzido (Assefa e Staggenborg, 2011).

Como nem todas as plantas num campo de sorgo florescem ao mesmo tempo, a duração do florescimento no campo pode variar de 6 a 15 dias. O número de espiguetas por panícula varia de 1500 a 7000 (Dogget 1970). Existem mais de 5000 grãos de pólen por antera na maioria dos híbridos e variedades, o que equivale dizer que há mais de 20 milhões de grãos de pólen por panícula.

Fertilização

A fertilização inicia-se no topo da panícula e procede para a base (duração de 4 a 5 dias). Predomina a autofecundação, e a taxa de fecundação cruzada pode variar de 2% a 10%. Há casos em que a fecundação ocorre sem a abertura das espiguetas (cleistogamia). A panícula do sorgo varia muito quanto a forma e tamanho (compacta, aberta, grande, pequena). Seu comprimento vai de 4 a 25 cm e o diâmetro de 2 a 20 cm (Paul 1990). O pólen germina imediatamente se cai num estigma receptivo, e a fertilização tem lugar cerca de 2 horas depois. No entanto, a luz é necessária para a germinação, e o pólen espalhado à noite não germina até o amanhecer. Vale ressaltar também que temperaturas elevadas podem reduzir a longevidade do pólen e sua germinação devido a mudanças em sua estrutura e no conteúdo de carboidratos (Prasad et al., 2011).

O grão de sorgo igualmente varia muito quanto a cor, dureza, forma e tamanho. O peso de 100 sementes varia de menos de 1g a mais de 6g (Dogget 1970).

Fotoperíodo

O sorgo é sensível ao fotoperiodismo, o qual pode ser definido como a resposta do crescimento à duração dos períodos, de luz e escuro. O comprimento do dia varia de acordo com a estação do ano e com a latitude. O sorgo é uma planta de dias curtos, ou seja, floresce em noites longas (Paul 1990; Bello, 1997).

Em cultivares sensíveis, a gema vegetativa (terminal) permanece vegetativa até que os dias encurtem o bastante para haver a sua diferenciação em gema floral, esse é portanto o que se clama fotoperíodo crítico. O fotoperíodo crítico do sorgo poderia então ser colocado da seguinte maneira: se o

comprimento do dia aumenta, a planta não floresce, ao passo que se o comprimento do dia decresce a planta floresce (Paul 1990).

Diferentes materiais genéticos variam quanto ao fotoperíodo crítico. Por exemplo: algumas variedades tropicais têm dificuldade de florescer em regiões temperadas, onde os dias tem mais de 12 horas. Salienta-se que o fotoperíodo crítico para estas variedades tropicais é em torno de 12 horas. Por outro lado, variedades temperadas sensíveis têm um fotoperíodo crítico maior, florescendo com facilidade nos trópicos (Craufurd e Qi, 2001).

O fotoperíodo crítico das variedades temperadas é em torno de 13,5 horas. Portanto, é a duração do período sem luz que é importante para estimular o florescimento (Paul 1990). Os dispositivos que as plantas possuem, os quais são responsáveis pela captação e medição do comprimento dos dias, são pigmentos chamados fitocromos. Em estudos com sorgo, por exemplo, foram identificadas plantas mutantes que não codificavam o fitocromo phyB, levando a uma insensibilidade ao fotoperíodo (Morgan et al. 2002). A grande maioria dos materiais comerciais de sorgo granífero foram melhorados geneticamente para insensibilidade ao fotoperíodo, somente os genótipos de sorgo forrageiro são sensíveis ao fotoperíodo (Silva et al.,2005).

Acumulação de matéria seca e produção

Loomis & Willians (1963), num estudo de estimativa do nível teórico possível de uma produção, afirmaram que cerca de 90% do peso seco das plantas consiste de produtos da fotossíntese. A quantidade de luz disponível deve, portanto, impor um limite superior de rendimento (Black e Ong, 2000). Cerca de 90% do rendimento dos grãos se deve a fotossíntese da panícula e das 4 folhas superiores.

Os resultados observados na Tabela 1 são de grande interesse para os envolvidos com a cultura do sorgo. Na média de taxa de crescimento diário, o sorgo foi superado somente pelo capim napier. Tem-se na planta de sorgo, uma excelente fábrica de carboidratos. Dois problemas no entanto precisam ser resolvidos:

- a) saber como obter o máximo dessa fábrica;
- b) como canalizar esses resultados para altos rendimentos.

Tabela 1. Rendimento máximo de culturas e taxas de crescimento

Cultura	Matéria Seca (t/ha)	Estação de crescimento (dias)	Média crescimento diário (g.m ⁻² .dia ⁻¹)
Capim napier	102,62	365	26
Cana-de-açúcar	70,6	365	18
Beterraba	46,9	300	14
Sorgo forrageiro	30,1	120	22
Alfafa	35,8	250	13
Capim sudão	32,8	160	18
Capim bermuda	35,3	230	14
Alga (<i>Chlorella</i> sp.)	49,74	300	15-22

Fonte: Adaptado de Loomis e William (1963)

O rendimento final de grãos em sorgo geralmente está correlacionado com o número de grãos na panícula. Existe uma compensação entre os componentes de rendimento na planta de sorgo, o que resulta na manutenção do rendimento dentro de certos limites. Por exemplo: se existem condições quase ótimas durante EC1 e EC2, mas por alguma razão a população final de plantas é baixa, a planta compensa com um aumento de perfilhamento e tamanho de panículas, o que faz com que haja um aumento no número de grãos por superfície plantada. Numa outra situação, quando ocorre estresse durante EC1 e EC2, esta condição vai limitar a população, o perfilhamento e a diferenciação da panícula, acarretando com isto menor número de sementes. As sementes, no entanto vão compensar estas perdas aumentando o seu peso durante a etapa seguinte de crescimento (EC3). O limite de incremento na semente varia de 15-20%.

Rebrota

O sorgo é uma planta com alta capacidade de rebrota, devido à capacidade de conservar ativo seu sistema radicular (Rezende et al., 2011). Alguns autores observaram altas taxas de rebrota (cerca de 90%) em híbridos avaliados para corte (Tomich et al., 2004). A intensidade da rebrota é proporcional à sanidade da primeira época de corte, e o rendimento da rebrota depende do número de plantas (perfilhos) existentes na plantação. Os materiais genéticos forrageiros rendem em média 40%-60% do primeiro corte, sendo que, em determinadas situações, a rebrota pode chegar a produzir até mais que o primeiro corte. O uso da rebrota no passado era visando uma segunda produção de grãos, sendo que a variabilidade de rendimentos entre outros fatores já citados dependia muito da cultivar utilizada (Tabela 2). Atualmente, a rebrota tem sido utilizada como massa para plantio direto uma vez o sorgo é mais persistente que o milheto, por exemplo.

Tabela 2. Produção de Grãos na primeira colheita (C) e rebrota (R) do Ensaio Nacional de Sorgo Comercial.

Cultivares	Produção de Grãos (t/ha)			
	1 ^a Colheita	Rebrota	%	Total
DK 861	5,23	4,34	83,0	9,57
AG 1017	4,94	4,38	88,7	9,32
BR 303	4,33	3,01	69,5	7,34
BR 304	4,52	2,50	55,3	7,02
BR 007 B	2,00	1,69	84,5	3,69

Fonte: Adaptado de SCHAFFERT et al. (1991)

Tanino no grão de sorgo

Devido ao fato de o sorgo não apresentar uma proteção para as sementes, como a palha no caso do milho, as glumas no trigo e a cevada, a planta de sorgo produz vários compostos fenólicos os quais servem como uma defesa química contra pássaros, patógenos e outros competidores.

Toda planta de sorgo possui aproximadamente os mesmos níveis de proteína, amido, lipídios etc., porém vários compostos fenólicos pode ocorrer ou não, e entre esses compostos destaca-se o tanino condensado que tem ação antinutricional principalmente para os animais monogástricos. Como esses polifenóis são metabólitos secundários, ou seja, não participam de vias metabólicas responsáveis por crescimento e reprodução, a presença e a natureza deles variam enormemente (Magalhães et al. 1997; Dykes e Rooney, 2006).

A presença do tanino no grão de sorgo depende da constituição genética do material. Caso os genótipos possuam os genes dominantes B₁, e B₂, este sorgo é considerado com presença de tanino. No passado, era comum encontrar classificação de sorgo, dos grupos I, II e III representando teores baixos, médios e altos de tanino. Hoje se sabe que o tanino está presente ou ausente no grão. A pesquisa tem mostrado que percentuais abaixo de 0,70% no grão, verificado em algumas análises laboratoriais, são devidos a outros fenóis e não ao tanino condensado, e que, portanto, não são prejudiciais a dieta alimentar dos animais (Magalhães et al. 1997; Rodrigues et al. 1998; Dykes e Rooney, 2006).

O tanino no sorgo tem causado bastante controvérsia, uma vez que, apesar de algumas vantagens agrônômicas, como a resistência a pássaros e doenças do grão, ele causa problemas na digestão dos animais pelo fato de formarem complexos com proteínas e assim diminuírem a sua palatabilidade e digestibilidade (Rodrigues et al. 1998a).

A determinação da presença dos taninos no grão de sorgo apresenta vários problemas, uma vez que os métodos colorimétricos geralmente não diferenciam taninos de outros compostos fenólicos. Outra dificuldade é a obtenção de substâncias adequadas para serem utilizadas como padrão para estes métodos (Magalhães et al. 1997).

Os vários compostos fenólicos presentes no grão de sorgo podem afetar a cor, a aparência e a qualidade nutricional. Esses compostos podem ser classificados em três grupos básicos: ácidos fenólicos, flavonóides e taninos. Os ácidos fenólicos são encontrados em todo tipo de sorgo, ao passo que flavonóides podem ser detectados em muitos, porém não em todo sorgo. O fenol conhecido como tanino encontra-se concentrado na testa da semente. A testa é um tecido altamente pigmentado localizado logo abaixo do pericarpo. A presença da testa é fator determinante da presença de tanino em sorgo. Existem duas classes de taninos: hidrolizáveis e condensados. Não há evidências da presença de grandes quantidades de tanino hidrolizável no sorgo. Já o tanino condensado é aquele que é encontrado em materiais de sorgo resistentes a pássaros (Rodrigues et al. 1998; Duodu et al., 2003).

Os ácidos fenólicos não têm efeito adverso na qualidade nutricional; porém, podem causar cor indesejável aos alimentos quando processados sob condições alcalinas. Os flavanóides, a exemplo dos ácidos fenólicos, também não causam problemas na digestibilidade e palatabilidade do sorgo. Constituem-se em um amplo grupo de compostos fenólicos encontrados nas plantas, sendo que alguns deles estão entre os principais pigmentos presentes em vegetais (Rodrigues et al. 1998a).

Tolerância e aspectos gerais dos efeitos ambientais sobre o crescimento do sorgo

Todas as plantas respondem a alguns tipos de estresse basicamente do mesmo modo. Tanto em comunidades naturais como agrícolas, o ambiente é raramente ótimo para o crescimento das plantas, portanto, estresses ambientais limitam a produtividade potencial das culturas vegetais.

A natureza do controle de crescimento de plantas em ambientes subótimos é de interesse; portanto, necessitamos entender os mecanismos que plantas dispõem para sobreviver e reproduzir sob condições subótimas.

A maioria das pesquisas em respostas fisiológicas de plantas a estresses ambientais tem focalizado nas respostas de plantas a estresses específicos, porém sabe-se que em ambientes naturais ou sistemas agrícolas há múltiplos estresses levando a complexas respostas (Mittler, 2006). Existe uma base fisiológica de suporte que regula o crescimento da planta em resposta aos estresses ambientais. Esse suporte é complexo, e envolve mudanças funcionais em balanço hormonal, relações hídricas, balanço de carbono, e uso de nutrientes. Fisiologistas têm observado que plantas individuais respondem à maioria de estresses ambientais pela mudança de seu balanço hormonal, frequentemente produzindo mais ácido abscísico e menos citocinina. Essas

mudanças hormonais são, provavelmente, o gatilho que, diretamente, elucidam reduzidos crescimentos em resposta ao estresse ambiental, e baixa disponibilidade de um recurso simplesmente ativa esse sistema de resposta ao estresse (Liu et al., 2005).

A produtividade de uma cultura pode ser limitada por algumas das propriedades físicas do seu ambiente. No entanto, o conceito de limitação ambiental é significativo apenas como referência para um tipo específico de planta, visto que a produtividade de espécies cultivadas ou cultivares pode variar dentro de um mesmo ambiente. Os processos fisiológicos, que restringem produtividade em um ambiente, são frequentemente referidos como limites fisiológicos. Esses limites podem ser sobrepujados pela modificação do ambiente ou das características fisiológicas da cultura, e o desenvolvimento de práticas culturais e cultivares adaptadas para explorar ambientes agrícolas específicos são metas complementares da pesquisa agrícola.

O estudo de processos fisiológicos tem, tradicionalmente, concentrado suas respostas aos fatores ambientais. No entanto, há aumento considerável no interesse do controle genético de processos de plantas e seu potencial para uso em programas de melhoramento. Em bases teóricas, tem sido frequentemente sugerido que uma seleção independente e recombinações controladas de características fisiológicas individuais (características secundárias) poderiam ter um valor adicional para os métodos normais de melhoramento de plantas (Bazinger et al., 2000).

O uso de características secundárias pode aumentar a eficiência de seleção sob condições de estresse desde que essas características tenham um claro valor adaptativo sob estresse, relativamente alta herdabilidade, uma significativa correlação genética com rendimento de grãos, e que sejam fáceis de medir. Poucos estudos têm envolvidos características secundárias e produção de grãos para a fenotipagem em sorgo. Essas características podem ser importantíssimas no screening de genótipos tolerantes no melhoramento do sorgo. (Falconer, 1972; Edmeades et al., 1998; Mutava et al., 2011).

Várias características fisiológicas agem e interagem entre si e o ambiente, para determinar rendimento de grãos em sorgo. Resultados experimentais indicam que relações entre características de planta e produtividade são complexas e que o uso de uma característica secundária única em um programa de melhoramento pode ser ineficiente em melhorar o rendimento de grãos.

Tentativas de utilizar características fisiológicas para melhoramento da produtividade de sorgo têm sido limitadas. Isto não significa que características fisiológicas não sejam responsáveis pelo limite da produtividade, mas indica que as características usadas são difíceis de identificação por causa das interações complexas entre os sistemas metabólicos e o ambiente. Essa falta de conhecimento da base bioquímica de importantes processos fisiológicos deve ser o principal obstáculo para rápido melhoramento da cultura.

Um método para identificar características fisiológicas úteis é selecionar uma característica de importância conhecida, incorporar diversidade para a característica em material adaptado (se não presente), e avaliar o impacto na performance agrônômica de contrastantes estados da característica. Como exemplo, citam-se a incorporação em programas de seleção de dois importantes processos, fotossíntese e metabolismo de N na obtenção de altos rendimentos.

Comparações fisiológicas entre genótipos tradicionais (baixo rendimento) e novos (mais alto rendimento, ou melhor adaptado) são frequentemente usadas para identificar características ou processos que têm mudado com o melhoramento da cultura (Assefa e Staggenborg, 2011). Associado com os mais altos rendimentos de grãos tem-se uma melhor resistência ao acamamento/quebramento, um estendido período de enchimento de grãos, melhoria na fitossanidade da planta, uma tendência de folhas eretas, e aumentos nos índices de colheita e de trilha (ver conceito mais adiante). Assim, mudanças em processos fisiológicos têm ocorrido com melhorias na produtividade de sorgo e proveem suporte para o ponto de vista de que uma seleção baseada em características fisiológicas pode ser efetiva se as características apropriadas forem identificadas.

O sorgo, por tratar-se de uma cultura anual, procura fazer o melhor uso possível dos fatores do meio (como luz, água, temperatura, nutrientes, etc.), em curto período de tempo, no qual as condições são favoráveis ao crescimento, à floração e à frutificação. O princípio operativo dessas plantas consiste em,

primeiro, usar a maior proporção possível dos fotossintatos para a formação de folhas. Estas, então, participam na produção e aumentam a absorção da planta.

Sob condições ambientais favoráveis à vida da planta, o investimento de produtos da assimilação garante, seletivamente, tanto o crescimento quanto a frutificação. Sob condições de adversidades ambientais, especialmente quando há carência de água ou quando o solo é pobre em nutrientes, a planta é obrigada a construir um extenso sistema de raízes, com prejuízo do desenvolvimento da área foliar. Isto leva a um rendimento fotossintético menor, assim como a deterioração na capacidade competitiva.

Água

Assim como no milho tanto o excesso (alagamento) quanto a falta de água (seca ou déficit hídrico) no solo afeta o desenvolvimento do sorgo sendo este último mais estudado (Promkhambut.et al., 2010; Tsuji et al., 2005; Ali et al., 2011).

O sorgo requer menos água para desenvolver quando comparado com outros cereais, sendo que o período mais crítico a falta de água é o florescimento.

Exemplo:

Sorgo - Necessita 330 kg de água para produzir 1 kg de matéria seca.

Milho - 370 kg de H₂O/kg de matéria seca.

Trigo - 500 kg de H₂O/kg de matéria seca.

Fonte: Aldrich et al. 1982

Quando comparado com o milho, o sorgo produz mais sobre estresse hídrico (raiz explora melhor o perfil do solo), murcha menos e é capaz de se recuperar de murchas prolongadas (Farré e Faci, 2006).

A resistência a seca é uma característica complexa, pois envolve simultaneamente aspectos de morfologia, fisiologia e bioquímica. A literatura cita três mecanismos relacionados a seca: resistência, tolerância e escape (Chaves et al., 2003; Barnabás et al., 2008). O sorgo parece apresentar duas características: escape e tolerância. O escape através de um sistema radicular profundo e ramificado o qual é eficiente na extração de água do solo. Já a tolerância está relacionada ao nível bioquímico. A planta diminui o metabolismo, murcha (hiberna) e tem um poder extraordinário de recuperação quando o estresse é interrompido. Um dos fatores que mais complica seleção para tolerância a seca num programa de melhoramento de plantas é a falta de uma característica clara (marcador) para medir o grau no qual o genótipo é considerado tolerante ou susceptível ao estresse de seca. Medidas fisiológicas tais como: potencial de água na folha e ajustamento osmótico nem sempre correlacionam com diferenças em rendimento sob estresse (Serraj e Sinclair, 2002). Este fato pode levar frequentemente a uma situação no qual materiais mais susceptíveis, porém com potencial produtivo maior superem materiais genéticos considerados resistentes, mas com potencial produtivo mais baixo em condições de estresse hídrico (Blum et al. 1992).

Apesar de não se ter estabelecido concretamente nenhuma correlação genética entre ajustamento osmótico e rendimento de grão de sorgo, estudos relatam que o ajustamento osmótico leva a uma redução do impacto do estresse hídrico no crescimento e rendimento de culturas. Na produção do sorgo, isto pode conferir uma vantagem no rendimento superior a 30% em relação a condições de escassez de água. Há considerável variação de ajustamento

osmótico entre linhagens de sorgo. Segundo Ludlow et al. (1990), baseado nas diferenças da habilidade de combinação, há no mínimo três genes individuais segregando para esta característica: um recessivo, um aditivo e um desconhecido.

Uma contribuição crítica de características putativas para ambientes de escassez de água tem sido dada para culturas em geral (Ludlow & Muchow, 1990) e para grão de sorgo em particular (Ludlow e Muchow, 1992). Esses autores sugerem que o ajustamento osmótico foi segundo em importância, perdendo apenas para a "fase fenológica para oferta de água", como uma característica prioritária em ambientes estresse-intermitente e estresse-terminal (Tabela 3). Assim, o ajustamento osmótico contribui diretamente para rendimento de grãos pela melhoria de água transpirada e índice de colheita, e indiretamente por aumentar a tolerância à desidratação (Tabela 4).

Tabela 3. Características sugeridas, em ordem de prioridade, para sorgo granífero nos trópicos semi-áridos e subtropicais sob estresses hídricos intermitentes e terminais.

Estresse intermitente	Estresse Terminal
1.Associação de fenologia com oferta de água	1.Associação de fenologia com oferta de água
2. Ajustamento osmótico de colmos e raízes	2. Ajustamento osmótico de colmos e raízes
3. Profundidade de raízes e densidade	3. Profundidade de raízes e densidade
4. Vigor precoce	4. Aumentada reflectância
5. Manutenção de área foliar	5.Vigor precoce
6. Aumentada reflectância foliar	6. Mobilização de matéria seca na pré-antese
7. Baixo status hídrico letal	7. Eficiência transpiratória
8. Eficiência transpiratória	

Fonte: Adaptado de Ludlow & Muchow 1990.

Tabela 4. Uma contribuição crítica do ajustamento osmótico em sorgo baseado em suas contribuições para os componentes do rendimento e determinantes da sobrevivência para ambientes sob estresses hídricos intermitente e terminal.

Componentes do rendimento:	Contribuição do ajustamento osmótico
+ água transpirada	+
+ eficiência do uso de água	0 ^a
+ índice de colheita	+ ^b
Determinantes de sobrevivência:	
+ escape à seca	0 ^{ac}
+ evita a desidratação	+ ^d
+ tolera a desidratação	+
Custo da característica:	Não
Contribuição para rendimento:	
+ Rendimento potencial	0 ^{ac}
+ Estabilidade do rendimento	+ ^b
Variabilidade genética:	Sim

Herdabilidade desconhecida?

- ^a neutra
^b tão longo quanto disponível água do solo não é exaurida antes da maturidade
^c sem informações, mas os autores opinaram
^d positivo se água do solo não é exaurida; negativo se é exaurida
Fonte: Ludlow et al. 1993.

Muchow and Carberry (1993), usando modelos de simulação para um sítio na Austrália, puderam prever que uma melhoria de 20% na extração de água do solo por um genótipo de sorgo - uma demonstração de seu ajustamento osmótico (Santamaria et al. 1990) - poderia melhorar o seu rendimento a níveis superiores a 60%, se cultivado sob condições adversas, bem como melhorar a estabilidade do rendimento. A média de rendimento de genótipos de sorgo (representando três grupos de maturidade: precoce, intermediário e tardio) com alto ajustamento osmótico foi de 33% e 24% mais alto do que genótipos similares com baixos níveis de ajustamento osmótico, quando foram submetidos para estresse hídrico nos estádios de crescimento pré e pós-florescimento, respectivamente (Ludlow et al., 1990; Santamaria et al., 1990). Patil e Ravikumar (2011) e Ravikumar et al. (2003) relatam que o ajustamento osmótico nos grãos de pólen de sorgo também podem ser uma característica importante para adaptação ao estresse hídrico.

Em geral, parece haver no sorgo uma correlação grande entre resistência ao calor e à falta de água (Machado e Paulsen, 2001; Barnabás et al., 2008). Também parece haver correlação entre resistência à seca e a teores de alumínio no solo. O déficit hídrico, quando acontece no estádio EC1, provoca menos danos à planta do que em EC2. No estádio EC2, a escassez de água vai resultar na redução das taxas de crescimento da panícula e das folhas, e no número de sementes por panícula. Esses efeitos são devidos, provavelmente, a uma redução na área foliar, resistência estomática aumentada, fotossíntese diminuída e a uma desorganização do estado hormonal da panícula em diferenciação (Bennett, 1979; Krieg 1983; Ali et al., 2011). Quando a falta de água acontece no EC3, o resultado é a senescência rápida das folhas inferiores, com conseqüente redução no rendimento de grãos (Stoud et al. 1978 a).

Segundo Dogget (1970), o sorgo, para produzir grãos, requer cerca de 25 mm de chuva após o plantio, 250 mm durante o crescimento e 25 mm a 50 mm durante a maturidade.

Sabe-se que em sorgo, diferentes características podem estar ligados a tolerância a seca em diferentes estádios. Genótipos tolerantes submetidos ao estresse no pré-florescimento tendem a possuir maior taxa fotossintética, maior condutância estomática, maior controle da temperatura foliar, grãos de pólen com maior viabilidade. Já genótipos tolerantes no enchimento de grãos (após o florescimento), evidencia-se maior comprimento de raízes finas, stay-green e maior enchimento de grãos (Tsuji et al., 2005; Habyarimana et al., 2010; Mutava et al., 2011).

Com a falta de água, os estômatos fecham e as trocas gasosas (água e CO₂) são limitadas (condutância estomática é impedida). O controle da temperatura foliar está diretamente ligado a condutância estomática, pois estômatos abertos permitem uma transpiração maior e, assim, um resfriamento da folha. Contudo, estômatos abertos significam perda maior de água. Genótipos tolerantes de sorgo podem desenvolver mecanismos de controle estomático que permitem um uso eficiente da água com estômatos semiabertos, permitindo realização da fotossíntese sem grandes perdas de água (Tingting et al., 2010; Lino 2011; Mutava et al., 2011).

Modificações na fluorescência da clorofila também são evidenciados em sorgo sob seca. Ocorre um aumento da dissipação não fotoquímica (produção de calor na forma de irradiação infravermelha) e diminuição da eficiência quântica do fotossistema II (PSII). Como relatado anteriormente, o déficit hídrico impede a entrada de CO₂, e assim a atividade fotossintética cai. Além do fechamento estomático limitar a fotossíntese em sorgo, a atividade da Pcpase e a regeneração do fosfoenolpiruvato (PEP) também contribuem na limitação (Beyel e Bruggemann, 2005)

Em sorgo, da mesma forma que em milho, o rendimento de grãos parece estar muito mais ligado à força do dreno do que à fonte (fotossíntese na folha). Assim, índices que consideram a partição de fotoassimilados (exemplo *índice de colheita* – relação entre massa do grão e massa total da planta e *índice de trilha* – relação entre a massa do grão e massa total da panícula.) tornam-se mais importantes no estudo de seca (Araus et al., 2008; Long et al., 2006; Lopes et al., 2011; Mutava et al., 2011).

Apesar de existirem poucos trabalhos com relação à tolerância ao alagamento em sorgo, maior desenvolvimento radicular, maior distribuição de fotoassimilados, manutenção da fotossíntese e maior atividade de enzimas glicolíticas e fosfatases foram evidenciadas como características que levam a tolerância (Singla et al., 2003; Sharma et al., 2005; Promkhambut et al., 2010).

Luz

Em condições não estressantes, a fotossíntese é afetada pela quantidade de luz fotossinteticamente ativa, proporção desta luz interceptada pela estrutura do dossel e pela distribuição ao longo do dossel. O efeito do sombreamento no sorgo, com a consequente redução da fotossíntese, tem um efeito menor quando acontece em EC1 do que quando em EC2 e EC3. Isto pode ser explicado pela maior atividade metabólica da planta nesses dois estádios. Além da maior atividade, a demanda por fotoassimilados também é maior; portanto, requer da planta uma taxa fotossintética alta para satisfazer os órgãos reprodutivos em crescimento.

Muito embora o sombreamento sempre resulte numa redução de crescimento da cultura, em proporção direta à redução da radiação, o efeito final no rendimento de grãos pode ser pequeno (Evans & Wardlaw 1976).

Com relação à radiação fotossinteticamente ativa, percebe-se uma diferença na interceptação desta pelas folhas da planta de sorgo, pois as folhas maduras (primeiras folhas formadas), geralmente, são sombreadas pelas folhas jovens. Estudos vêm sugerindo que tolerância a alta irradiância leva a modificações morfoanatômicas como o número de estômatos (densidade estomática), espessura do mesófilo e tamanho das células da bainha, nas folhas jovens que são controlados pela quantidade de radiação que chega nas folhas maduras (Jiang et al., 2011).

Temperatura

Devido a sua origem tropical, o sorgo é um dos cultivos agrícolas mais sensíveis a baixas temperaturas noturnas. A temperatura ótima para crescimento está por volta de 33 °C-34 °C. Acima de 38 °C e abaixo de 16 °C, a produtividade decresce (Clegg et al. 1983). Baixas temperaturas (< 10 °C) causam redução na área foliar, perfilhamento, altura, acumulação de matéria seca, atraso na data de floração e aumento de doenças. Isto é devido a uma redução da síntese de clorofila, especialmente nas folhas que se formam primeiro na planta jovem com consequente redução da fotossíntese. Alguns genótipos de sorgo tolerantes germinam em baixas temperaturas e estabelecem mudas sadias (Clegg et al. 1983; Tiryaki e Andrews, 2001; Bogo et al., 2006; Knoll et al., 2008).

Os efeitos da temperatura durante EC2 se manifestam no número de grãos por panícula, afetando diretamente o rendimento final de grãos. Temperaturas mais altas, geralmente, tendem a antecipar a antese, assim como pode causar aborto floral, inibição da formação dos miosporos, diminuição da longevidade e germinação do grão de pólen. O desenvolvimento floral e a fertilização dos grãos podem ocorrer até com temperaturas de 40 °C a 43 °C, 15% a 30% de umidade relativa, desde que haja umidade disponível no solo. Um ajustamento osmótico em sorgo também pode ocorrer devido a altas

temperaturas. Altas e baixas temperaturas estimulam perfilhamento basal (Clegg et al. 1983; Machado e Paulsen, 2001; Jain et al., 2007; Prasad et al., 2008; Ananda et al., 2011; Prasad et al., 2011).

Quando comparado ao milho, o sorgo é mais tolerante a temperaturas altas e menos tolerante a temperaturas baixas. A temperatura baixa afeta o desenvolvimento da panícula, principalmente por seu efeito sobre a esterilidade das espiguetas. A sensibilidade a temperaturas baixas é maior durante a meiose (Brooking 1976).

Nutrientes

Uma grande quantidade de nutrientes é removida das culturas. Os dados da Tabela 5 mostram que o sorgo é uma cultura exigente em nutrientes N, P, K. Os nutrientes minerais podem influenciar a qualidade fisiológica das sementes, o metabolismo do carbono na planta, direta ou indiretamente, pela síntese de novos tecidos e crescimento. Sob estresse, este balanço de nutrientes pode ser mudado. Por exemplo, no sorgo sob estresse hídrico ocorre uma diminuição da quantidade de compostos nitrogenados, além da atividade de enzimas do metabolismo do nitrogênio (redutase do nitrato e glutamina sintetase). Os efeitos diretos sobre a fotossíntese e a respiração resultam da incorporação dos minerais em metabólitos, coenzimas e pigmentos; ou, de sua participação direta como ativadores no processo de fotossíntese (Toledo et al., 2007; Oliveira Neto et al., 2009; Han et al., 2011).

A falta e o excesso de minerais também podem levar ao estresse. Vale resaltar aqui o estresse ocorrido em solos ácidos.

Tabela 5. Concentração de N, P e K, com base na matéria seca em produtos econômicos e resíduos de culturas anuais, tropicais ou subtropicais.

Cultura	Órgão	N (%) mín-máx	P (%) mín-máx	K (%) mín-máx
Sorgo	Grão	1,00-3,20	0,13-0,65	0,25-0,70
	Palha	0,35-1,20	0,05-0,30	0,80-2,80
Milho	Grão	0,90-2,20	0,16-0,80	0,17-0,60
	Palha	0,40-1,40	0,04-0,40	0,40-2,40
Trigo	Grão	1,00-3,30	0,16-0,60	0,30-0,80
	Palha	0,40-1,05	0,03-0,45	0,70-2,70

Fonte: Adaptado de Nijhof , 1987.

Tolerância aos solos ácidos

Solos ácidos são predominantes no Brasil. O Cerrado é uma das regiões de grande potencial na produção agrícola, destacando-se como importante área marginal incorporada ao processo produtivo. Os solos do Cerrado apresentam-se com elevado grau de intemperização e baixa capacidade de troca catiônica (CTC), com sítios de troca ocupados principalmente por hidrogênio (H⁺) e alumínio (Al³⁺), possuindo portanto, alta saturação por alumínio e

baixo pH (Reichardt, 1981; Guimarães, 2005). Dessa forma, plantas cultivadas nesses solos estão geralmente sujeitas a estresses múltiplos, principalmente àqueles causados por toxidez de Al, deficiência de P e escassez de água, sendo que mecanismos que regulam a adaptação de plantas a essas condições são bastante complexos (Kochian et al., 2004). Verificou-se, então, a necessidade de um melhoramento genético específico para a tolerância ao alumínio tóxico e maior eficiência na aquisição/utilização de P. Solos com problemas de Al tóxico e deficiência de P, provavelmente, engloba mais de 50% de nosso território. Sendo assim, o ideal é a obtenção de cultivares mais adaptados a essa grande parte do Brasil, especificamente para áreas não ocupadas por lavouras e pastagens (Silva, 1976; Schaffert et al., 2001).

Tolerância ao alumínio tóxico

A utilização de corretivo de acidez do solo é uma prática bastante utilizada, mas nem sempre é uma solução viável para eliminar os efeitos de Al tóxico. Muitas regiões apresentam subsolo com teores de alumínio tóxico, diminuindo o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular de plantas sensíveis a esse elemento. De uma forma geral, os vegetais diferem grandemente em relação a seu comportamento na presença de alumínio tóxico, e esta variabilidade é encontrada tanto entre plantas de espécies diferentes como entre cultivares da mesma espécie. Portanto, a utilização da prática de calagem e adubações mais racionais, juntamente com o emprego de genótipos mais bem adaptados às condições de solo ácido, é a estratégia de maior potencial para uma utilização viável dos solos de Cerrado, elevando-se, assim, a eficiência de produção (Kochian, 1995; Howeler, 1991; Bona et al., 1991; Silva e Malavolta, 2000; Andrade Junior et al., 2005).

As raízes de plantas com sintomas de toxidez por alumínio, geralmente são curtas, grossas e possuem numerosas raízes laterais não desenvolvidas, aumentando a suscetibilidade à seca e reduzindo o uso dos nutrientes do subsolo. A toxidez por alumínio em sorgo também ocasiona a redução da fotossíntese e o teor de clorofila (Bona et al., 1991; Peixoto et al., 2002; Kochian et al., 2004).

Plantas crescidas em solução nutritiva com presença de Al, claramente apresentam esses sintomas, evidenciando a toxicidade do alumínio. A maioria dos materiais considerados tolerantes na presença deste elemento em solução nutritiva também são tolerantes no campo, demonstrando a possibilidade de discriminação de materiais usando técnicas de laboratório para avaliação da tolerância ao alumínio. Usa-se, frequentemente, "*Screening*" em solução nutritiva para avaliação de diferentes genótipos, como importante ferramenta no melhoramento de plantas, visando o desenvolvimento de genótipos adaptados a solos ácidos com toxicidade de Al. Além disso, a utilização de solução nutritiva possui as vantagens de ser rápida, possibilitar a avaliação de muitos genótipos em curto espaço e período de tempo, de não ser destrutiva, permitindo o transplante para o campo e o controle das condições ambientais e o isolamento do efeito do Al nas plantas (Furlani, 1987 e 1991; Camargo et al., 2006; Portaluppi et al., 2010). Grandes resultados têm sido encontrados na identificação de genes que conferem tolerância ao alumínio em sorgo. Estes genes estão envolvidos, principalmente, na exsudação de ácidos orgânicos na raiz (Kochian et al., 2004; Gonçalves et al., 2005; Caniato et al., 2007; Caniato et al., 2011).

Deficiência de fósforo

Fósforo (P) é um nutriente essencial que limita a produção agrícola numa variedade de solos do mundo, principalmente nos trópicos e subtropicais (Ramaekers et al., 2010). A deficiência de P é um dos fatores mais limitantes para a produção agrícola em solos ácidos. Pesquisas mostram que a deficiência em P é a maior restrição ao desenvolvimento das plantas em 96% dos solos ácidos tropicais. A concentração de P inorgânico ou fosfato (P_i) livre no solo é tipicamente 60 a 600 vezes mais baixa do que a concentração de outros macronutrientes, como K e Mg (Bielecki, 1973). Em geral, o P_i é encontrado na solução do solo em concentrações a nível de mM, enquanto a concentração de N está presente na maioria dos solos, em concentrações mM (Rendig & Taylor, 1989).

As duas maiores razões para a ocorrência da deficiência de P_i em solos ácidos são o baixo teor deste elemento no material de origem e a alta capacidade de fixação do P_i pelo solo. A disponibilidade de P_i é geralmente baixa nos Oxissolos, Utilssolos e alguns Alfissolos caracterizados por minerais de argila altamente intemperizados, como os óxihidróxidos de Fe e Al (Dechen e Nachtigall, 2007; Novais e Melo, 2007).

Uma outra característica importante que afeta a disponibilidade de P_i nos solos é a sua reduzida ou inexistente mobilidade na solução do solo, movimentando-se principalmente por difusão (Barber, 1995). A absorção de P_i pelas raízes das plantas é geralmente atribuída aos transportadores de P_i (ATPases) de alta afinidade (Marschner, 1995; Raghothama e Karthikeyan, 2005; Jain et al., 2007).

Grande parte do P_i adicionado é rapidamente fixado pelo solo, o que requer o uso contínuo de altas quantidades de fertilizantes fosfatados. Sabendo-se que a utilização de fertilizantes para corrigir a concentração de fósforo no solo é cara, o desenvolvimento de cultivares tolerantes pode representar efetiva solução para o problema (Li et al., 2010).

Vários trabalhos relatam as estratégias de plantas para a tolerância a baixos níveis de fósforo (Vance et al., 2003; Richardson et al., 2009; Ramaekers et al., 2010) e um importante mecanismo na absorção de fósforo pelas plantas tem sido a presença de ácidos orgânicos como o citrato, malato, entre outros, em exudatos radiculares de plantas cultivadas em condições de estresse de P_i . (Rocha, 2008). A presença de ácidos orgânicos nos exudatos.

Outra estratégia importante que pode ser muito útil para esta tolerância é a plasticidade radicular. A morfologia radicular acaba tendo muita importância na aquisição eficiente de fósforo nas plantas, pois existe uma relativa imobilidade de P que faz sua aquisição ser dependente da maior exploração do solo pelas raízes (maior comprimento e área superficial radicular). (Li et al., 2007; Rocha et al., 2010).

Autores deste tópico: Paulo Cesar Magalhaes, Thiago Corrêa de Souza, ROBERT EUGENE SCHAFFERT

Expediente

Embrapa Milho e Sorgo

Comitê de publicações

Sidney Netto Parentoni
[Presidente](#)

Elena Charlott Landau
[Secretário executivo](#)

Flávia Cristina dos Santos
Guilherme Ferreira Viana
Eliane Aparecida Gomes
Flávio Tardin
Paulo Afonso Viana
Rosângela Lacerda de Castro
[Membros](#)

Corpo editorial

José Avelino Santos Rodrigues
[Editor\(es\) técnico\(s\)](#)

Guilherme Ferreira Viana
[Revisor\(es\) de texto](#)

Rosângela Lacerda de Castro
[Normalização bibliográfica](#)

Enilda Alves Coelho e Rafael Ribeiro Macedo
[Editoração eletrônica](#)

Embrapa Informação Tecnológica

Selma Lúcia Lira Beltrão
Rúbia Maria Pereira
[Coordenação editorial](#)

Corpo técnico

Cláudia Brandão Mattos (Auditora)
Karla Ignês Corvino Silva (Analista de Sistemas)
Talita Ferreira (Analista de Sistemas)
[Supervisão editorial](#)

Cláudia Brandão Mattos
Mateus Albuquerque Rocha (SEA Tecnologia)
[Projeto gráfico](#)

Embrapa Informática Agropecuária

Kleber Xavier Sampaio de Souza
Sílvia Maria Fonseca Silveira Massruha
[Coordenação técnica](#)

Corpo técnico

Leandro Henrique Mendonça de Oliveira (Suporte operacional)
[Publicação eletrônica](#)

Dácio Miranda Ferreira (Infraestrutura de servidor)
[Suporte computacional](#)