



LEANDRO DE OLIVEIRA LINO

**CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E
FISIOLÓGICAS DE GENÓTIPOS DE SORGO
CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À
SECA**

LAVRAS – MG

2011

LEANDRO DE OLIVEIRA LINO

**CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE
GENÓTIPOS DE SORGO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À
SECA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Evaristo Mauro de Castro

Coorientador

Paulo César Magalhães, PhD

LAVRAS – MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Lino, Leandro de Oliveira.

Características anatômicas e fisiológicas de genótipos de sorgo contrastantes para tolerância à seca / Leandro de Oliveira Lino. – Lavras : UFLA, 2011.

85 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Evaristo Mauro de Castro.

Bibliografia.

1. *Sorghum bicolor* L. 2. Estresse hídrico. 3. Transpiração. 4. Fotossíntese. 5. Anatomia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 581.1

LEANDRO DE OLIVEIRA LINO

**CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE
GENÓTIPOS DE SORGO CONTRASTANTES PARA TOLERÂNCIA À
SECA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de Julho de 2011.

Dr. Fabrício José Pereira UFLA

Paulo César Magalhães, PhD. EMBRAPA Milho e Sorgo

Dr. Evaristo Mauro de Castro
Orientador

LAVRAS – MG

2011

À minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e, mesmo à distância, se fez presente nos momentos em que mais precisei, contribuindo para formação dos meus princípios e valores. Em especial à minha mãe, Neila, o verdadeiro e grande amor da minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela oportunidade de estágio, crescimento profissional, pelo apoio financeiro e tecnológico.

Ao professor Dr. Evaristo Mauro de Castro, pela orientação, paciência, confiança, amizade e pelos seus conselhos valiosos dos quais vou me lembrar por toda vida.

Ao Dr. Paulo César Magalhães, pela orientação, paciência e amizade, um grande exemplo de competência e profissionalismo.

A Dra. Adriana Tiemi Nakamura, pela amizade, companheirismo, pelas incontáveis horas de descontração e alegria e por seus ensinamentos valiosos em histologia vegetal.

Ao Doutorando Thiago Correia de Souza, pela incansável paciência, companheirismo, amizade, sempre presente em todas as etapas desse trabalho.

Ao professor Dr. Fabrício José Pereira, pelas orientações na estatística.

Aos técnicos da Embrapa Milho e Sorgo, Gilberto e Fábio, pela amizade e por cuidarem com dedicação e afincos dos nossos experimentos.

Aos amigos do laboratório de anatomia vegetal da UFLA, Elícia, João, Maíra, sem os quais esse trabalho jamais poderia ser concluído.

Aos demais amigos do laboratório que não contribuíram diretamente para esse trabalho, mas que no decorrer desses dois anos compartilharam comigo alegrias, tristezas, fracassos e acertos, tornando a vida mais fácil e divertida, Afonso, Flávia, Marines, Maurício, Mírian, Melina, Renê, Samara.

Aos amigos da fisiologia vegetal, Ana Catarina André, Amanda, Carla, Camila, Diogo, Jean, Helbert, Michele, Vinícius, Tânia pelo companheirismo, desde as infindáveis horas de estudo, brigas, discussões e confraternizações.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Biologia Dartagnan, Barrinha, Du, Ironдина, Zélia, Rafaela, Lena, Joice e Emanuelle.

Às amigas sinceras que fiz aqui em Lavras, de modo especial a Simone Abreu Asmar, que me ajudou muito nos primeiros meses durante minha adaptação, sem pedir nada em troca e a Tatielle Custódio, que abriu as portas da sua casa e do seu coração para nossa amizade.

“A natureza é sempre um livro divino, onde as mãos de Deus escrevem a história da sua sabedoria, livro da vida, que constitui a escola de progresso espiritual do homem”

Emmanuel

RESUMO GERAL

A disponibilidade hídrica exerce forte impacto sobre a produtividade agrícola. O estresse hídrico, na fase reprodutiva, limita a produtividade de culturas em áreas propensas à seca. Com o objetivo de caracterizar as mudanças anatômicas e fisiológicas em linhagens de sorgo contrastantes para a tolerância à seca plantas de sorgo foram estressadas gradativamente até o potencial da água no solo atingir aproximadamente o valor de -100 kPa. O delineamento foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial $4 \times 2 \times 2$, sendo quatro linhagens (duas tolerantes à seca: Tx642, 99100 e duas sensíveis: BR007 e BR001) dois estádios fenológicos (florescimento e frutificação) e dois sistemas de manejo, irrigado e estressado com três repetições e parcela experimental constituída de um vaso com três plantas, todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ao teste de Scott-Knott. Após o término da imposição do estresse hídrico, no período da manhã, o teor de clorofila das folhas bandeira foram avaliadas com o clorofilmetro também foram realizadas medidas instantâneas de trocas gasosas com analisador de trocas gasosas no infravermelho modelo LI-6400. Para realização de secções paradermicas e transversais nas faces adaxial e abaxial. foram coletadas amostras do terço médio das folhas bandeiras e fixadas em F.A.A₇₀, posteriormente, as amostras foram submetidas aos procedimentos usuais em microtécnica vegetal. O restante da folha foi coletado excluindo-se a nervura central, envolvida em papel alumínio e mergulhadas em nitrogênio líquido e, posteriormente, transferidas para freezer, onde permaneceram a -86°C , até o momento das análises enzimáticas. Foram realizadas análises das enzimas do sistema do sistema antioxidante APX, POD, CAT. Após os grãos atingirem a maturidade fisiológica foram avaliados o peso da panícula, peso seco da raiz, peso dos grãos, peso da planta, peso de 100 grãos e o índice de colheita. A linhagem tolerante à seca 99100 reúne o maior número de atributos anatômicos e fisiológicos relacionados à tolerância a esse estresse. Foi encontrada elevada atividade enzimática da APX e CAT na linhagem Tx642 que pode ser um indicativo de maior capacidade do sistema antioxidante nesse genótipo. Todas as linhagens de sorgo sofreram redução no teor de clorofila sob estresse hídrico. A fotossíntese, condutância estomática e a transpiração foram maiores no florescimento para as linhagens sensíveis à seca e maior na frutificação para linhagens tolerantes à seca. As linhagens apresentam uma maior eficiência do uso da água na frutificação. Sob estresse hídrico durante a frutificação ocorreram uma melhor eficiência de carboxilação. As linhagens de sorgo no geral são mais sensíveis no florescimento.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*. Tolerância á seca. Estresse hídrico. Anatomia vegetal.

GENERAL ABSTRACT

The water availability and temperature are the climatic factors of greater effect on agricultural productivity. Water stress during the reproductive phase is one of the most limiting factors of productivity in drought-prone areas. The aim of this study was characterize in greenhouse under water stress the morphoanatomical changes in sorghum lineages contrasting for drought tolerance. The imposition of stress was done gradually until the soil water potential reaches a value of approximately -100 kPa. The design was completely randomized DIC in a 4x2x2 factorial, with four lines, two drought-tolerant, Tx642, 99100 and two sensitive and BR007 BR001, two phenological stages, flowering and grain filling and two management systems irrigated and stressed, totaling 16 treatments with three repetitions each represented by a pot. Each pot had two plants at the point of collection. Analyses were performed on the flag leaf after the imposition of water stress for 10 days In the morning flag leaves were sampled with SPAD chlorophyll meter to quantify the relative chlorophyll content instantaneous gas exchange measurements was used with a LI-6400 IRGA to. After the grain reaches physiological maturity were evaluated panicle weight, root dry weight, grain, plant, 100 grain weight, harvest index. for conducting paradermic and transverse sections in the adaxial and abaxial samples were collected from the middle third of the flag leaf and fixed in FAA₇₀, then the samples were subjected to the usual procedures in microtechniques. The rest of the leaves were collected excluding the midrib, wrapped in aluminum foil and dipped in liquid nitrogen and then transferred to freezer, where it remained at -86 ° C until the time of enzymatic analysis. It was proceeded the antioxidant defense system APX, POD, CAT. The drought-tolerant strain 99100 resulted in the largest number of attributes and anatomical changes that allows it to better withstand drought. Most of the anatomical changes occurred in the first beam of larger diameter in the mesophyll. High enzyme activity of APX and CAT was found in the lineage Tx642 that may be indicative higher ROS production in this species. All sorghum lineages were reduced in relative chlorophyll content under water stress. The highest relative content of chlorophyll does not appear to be related to the thickness of the mesophyll. Photosynthesis, stomatal conductance and transpiration were higher in the flowering strains sensitive to drought and increased pod filling lineages tolerant to drought. The strain 99100 showed a higher photosynthetic activity, than the control, the increased investment in root system, which contributed to its higher productivity. The strains have a greater efficiency of water use in grain filling. Under water stress lines filling the stadium had a better efficiency of carboxylation. The sorghum lines generally had higher losses in the production area in the flowering part, this is the most critical stage to the strains studied.

Keywords: *Sorghum bicolor*. Drought tolerance. Water stress. Plant anatomy.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1	Espessura da epiderme e cutícula da face abaxial e adaxial em linhagens de sorgo contrastantes à seca	36
Tabela 2	Espessura do limbo foliar e densidade de células buliformes/mm em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	38
Tabela 3	Distância entre feixes vasculares na nervura central de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	39
Tabela 4	Diâmetro dos elementos do metaxilema, células buliformes em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	41
Tabela 5	Distância entre feixes, área de floema e no mesofilo foliar de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	42
Tabela 6	Número de estômatos, diâmetro polar e equatorial de estômatos de linhagens de sorgo contrastantes à seca	45
Tabela 7	Funcionalidade e Índice Estomático (IE) de linhagens de sorgo contrastantes à seca	47
Tabela 8	Atividade de enzimas do sistema antioxidante em linhagens de sorgo contrastantes à seca	48
Tabela 9	Atividade enzimática CAT em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	50
Tabela 10	Teor de clorofila, em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	51

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Fotossíntese, condutância estomática e transpiração de linhagens de sorgo nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento ..	66
----------	---	----

Tabela 2	CO ₂ interno e relação Carbono interno/ Carbono de referência (Ci/Cr) em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado.....	71
Tabela 3	Eficiência do Uso da Água (EUA) e Eficiência de Carboxilação (CE) em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado	72
Tabela 4	Densidade estomática de linhagens de sorgo	74
Tabela 5	Peso seco médio de raiz, panícula (sem grãos) e de plantas de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento de grãos.....	77
Tabela 6	Peso seco médio de grãos e Índice de Colheita (IC) de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento de grãos.....	80

SUMÁRIO

	CAPITULO 1 INTRODUÇÃO GERAL Erro! Indicador não definido.	
1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Modificações anatômicas em resposta a seca	15
2.2	Respostas fisiológicas à seca	18
2.3	Sistema de defesa antioxidante	19
2.4	Produtividade e seca	20
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	22
	REFERÊNCIAS	23
	CAPÍTULO 2 ANATOMIA FOLIAR, ENZIMAS E TEORRELATIVO DE CLOROFILA	26
1	INTRODUÇÃO	29
2	MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1	Procedimentos Gerais	30
2.2	Anatomia foliar	31
2.3	Enzimas do estresse oxidativo	34
2.4	Teor relativo de clorofila	35
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1	Anatomia foliar	36
3.1.1	Feixe central da nervura central	39
3.1.2	Primeiro feixe maior no mesofilo	40
3.1.3	Epiderme da face abaxial e adaxial	44
3.2	Enzimas do estresse oxidativo	47
3.3	Teor relativo de clorofila	51
4	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	54
	CAPÍTULO 3 FOTOSSÍNTESE, DENSIDADE ESTOMÁTICA E PRODUTIVIDADE	58
1	INTRODUÇÃO	61
2	MATERIAL E MÉTODOS	63
2.1	Fotossíntese	64
2.2	Densidade estomática	65
2.3	Produtividade	65
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
3.1	Fotossíntese	66
3.2	Densidade estomática	73
3.3	Produtividade	76
4	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A tolerância à seca é a principal característica que faz do sorgo (*Sorghum bicolor* L.) uma das mais importantes culturas em regiões áridas e semi-áridas. O sorgo granífero é uma importante fonte de alimento no Brasil e em outras áreas do mundo. Para conseguir o máximo de produtividade na colheita é importante conhecer como a planta cresce e desenvolve, bem como quais os fatores que afetam seu desenvolvimento.

O sorgo é o quinto cereal mais importante no mundo e está se tornando objeto de interesse como matéria-prima para produção de fibras, biocombustíveis, alimentação humana e animal. Este fato é devido à sua tolerância ao déficit hídrico e à possibilidade de cultivo em sistema de sequeiro, em épocas e locais com maior ocorrência de irregularidade na distribuição da pluviosidade em regiões marginais com pouco investimento em adubação e em regiões semi-áridas do mundo todo (XIN; AIKEN; BURKE, 2009).

Apesar do fato de plantas C₄ contribuírem significativamente para o sequestro de carbono e representarem culturas de importância fundamental na segurança alimentar, como milho e sorgo, as respostas de plantas C₄ à deficiência hídrica tem sido menos estudadas do que em plantas C₃. Além disso, plantas C₄ predominam em regiões quentes e áridas que são propensas a secas frequentes (GHANNOUM, 2009).

A via fotossintética C₄ evoluiu como uma adaptação para altas pressões resultantes da atividade fotorrespiratória a partir de várias combinações de tensões que incluem baixa concentração atmosférica de CO₂, alta temperatura, aridez e salinidade (TIPPLE; PAGANI, 2007).

Embora plantas C₄ representem apenas 4% da flora mundial, elas contribuem com cerca de 20% da produtividade primária global, principalmente

devido à alta produtividade (EHLERINGER; CERLING; HELLIKER, 1997; LLOYD; FARQUHAR, 1994).

O entendimento de como o vegetal comporta-se mediante os fatores limitantes ao seu desenvolvimento também faz parte da estratégia de pesquisa e desenvolvimento para utilização de genótipos comerciais eficientes e mais competitivos em condições adversas.

É necessário selecionar genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico e entender como eles relacionam-se com o ambiente limitado em água em cada estágio do desenvolvimento para obter maiores rendimentos na colheita. O objetivo deste trabalho é caracterizar alterações morfofisiológicas de quatro genótipos de sorgo contrastantes à seca nos estádios de florescimento e frutificação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modificações anatômicas em resposta a seca

As características morfológicas, anatômicas e fisiológicas dos seres vivos podem ser adaptativas quando geram mecanismos de tolerância às condições do ambiente. Tais adaptações são resultado das relações dos organismos com o seu ambiente e das características do genótipo do indivíduo (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009).

Os estudos de anatomia na produção vegetal, em suma, são relacionados às grandes culturas e suas relações com a nutrição mineral ou às interações que fatores como solo, água, luz, e temperatura exercem sobre as características estruturais do vegetal (SILVA; ALQUINI; CAVALLET, 2005).

Quando o vegetal é submetido a condições de estresse por seca ele sofre algumas modificações na tentativa de adaptar-se a condições do local e atingir o estágio reprodutivo. A epiderme é o tecido de revestimento presente em todos os órgãos do vegetal. Em suma, sua função primordial é proteger o vegetal das intempéries ambientais. Assim esse tecido apresenta uma série de modificações relacionadas à seca, como aumento da espessura, aumento do número de tricomas, deposição de cera, aumento na espessura da cutícula, estômatos em cavidades (criptas estomáticas), entre outras. É possível encontrar na epiderme grandes modificações em resposta à seca (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009).

A cutícula recobre as partes aéreas das plantas terrestres e lhes conferem uma aparência esbranquiçada, é composta por cera intracuticular amorfa incorporada em polímeros de cutina e cristalóides de cera epicuticular (KUNST; SAMUELS, 2003). Porém, a cutícula possui regiões descontínuas como em células secretoras de tricomas glandulares, em papilas de certas flores e até

mesmo poros por onde grande parte da água pode ser perdida por transpiração (CUTTER, 1986).

Estudos relacionando a espessura da epiderme e cutícula em linhagens de milho (*Zea mays* L.), sob estresse hídrico no estágio vegetativo, concluíram que existe uma relação inversa entre a perda de água pela epiderme e a espessura da parede celular das células desse tecido e da cutícula. Quanto mais espessa são a parede celular e a cutícula menos água é perdida por transpiração (RISTIC; JENKS, 2002).

As folhas podem perder água por transpiração não estomática através da cutícula, provocando um aumento na transpiração sem um benefício associado à fixação do CO₂. Podem ocorrer diferenças na cutícula entre as espécies, por exemplo, plantas de arroz têm uma cutícula altamente permeável, enquanto essa estrutura em plantas de sorgo é relativamente impermeável, o que possibilita redução da transpiração cuticular pela maior deposição de cutícula (KERSTIENS, 2006).

A quantidade de cera cuticular não se correlaciona inversamente com a perda de água pela epiderme, sugerindo que a quantidade de cera (RISTIC; JENKS, 2002).

A quantidade e tamanho dos estômatos pode determinar o quão adaptada ou eficiente a espécie é na captura de CO₂. Ao colonizarem o ambiente terrestre os vegetais primitivos tiveram que desenvolver estruturas especializadas em limitar a perda de água que, por outro lado, restringiram a entrada do CO₂ atmosférico, surgindo posteriormente estruturas especializadas no controle da entrada de CO₂ e saída de água do mesófilo. Ao primeiro sinal de deficiência hídrica as plantas conservam estômatos fechados. Os estômatos são estruturas importantes para a produção vegetal, pois são a porta de entrada de CO₂ para a fotossíntese.

O maior número de estômatos por área ajuda a explicar as maiores taxas de condutância estomática, taxas transpiratória e fotossintética das plantas. Cultivares da mesma espécie e espécies de mesmo gênero podem diferir quanto à densidade estomática (CARVALHO; SILVA; AZEVEDO, 2001).

Os estômatos podem variar sob a influência de diversos fatores ambientais como a disponibilidade de água, salinidade do solo, radiação incidente, dentre outros fatores, sendo um importante indicador de respostas ambientais (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009; CUTTER, 1986; LARCHER, 1986).

Diminuição no tamanho dos estômatos é um evento reconhecidamente importante na regulação das trocas gasosas, uma vez que folhas com estômatos menores possuem maior eficiência no uso da água, por apresentarem um menor tamanho dos poros estomáticos, condicionando assim uma menor perda de água por transpiração (MELO et al., 2007).

Em condições de estresse hídrico pode ocorrer um acréscimo do número de estômatos, porém, com redução significativa de tamanho. Outras adaptações incluem a ocorrência de estômatos abaixo do nível das demais células epidérmicas ou ainda restritos às cavidades das superfícies das folhas (SILVA; ALQUINI; CAVALLET, 2005).

Modificações no mesófilo e no parênquima clorofiliano sob estresse hídrico são relatados em estudos com oliveira por Chartzoulakis et al. (2002), segundo os quais pode ocorrer aumento na densidade, redução dos espaços intercelulares e no tamanho das células do mesófilo. A maior proporção de tecido parenquimático pode estar relacionada com maior eficiência fotossintética (BACELAR et al., 2004; GUERFEL et al., 2006).

Modificações na estrutura anatômica do xilema sob déficit hídrico são observadas em diversos estudos. Para diminuir a cavitação é comum a ocorrência de ajustes no xilema das espécies arbóreas através da redução nas

dimensões dos elementos de vaso, e maior investimento em estrutura de reforço, como o espessamento da parede celular (CORCUERA et al., 2004; CALDEIRA JÚNIOR, 2009).

Algumas modificações nas características do xilema são previstas de acordo com as particularidades de cada espécie em determinadas condições ambientais (CALDEIRA JÚNIOR, 2009). Essas adaptações moldam as dimensões dos elementos de vaso e suas propriedades, podendo ajustá-las de acordo com a disponibilidade de água no solo (CORCUERA et al., 2004).

2.2 Respostas fisiológicas à seca

O sorgo é uma planta C_4 com altas taxas fotossintéticas. A grande maioria dos materiais genéticos de sorgo requerem temperaturas superiores a 21°C para um bom crescimento e desenvolvimento. A planta de sorgo tolera mais o déficit de água e o excesso de umidade no solo do que a maioria dos outros cereais e pode ser cultivada numa ampla faixa de condições de solo (MAGALHÃES; DURÃES; RODRIGUES, 2003). O estresse hídrico é um dos fatores ambientais mais limitantes à planta em todo o mundo. A resposta fotossintética de plantas C_3 ao estresse hídrico tem sido bem estudada e avaliada, conforme indicado pelo grande número de pesquisas (CORNIC; FRESNEAU, 2002; FLEXAS et al., 2004).

Em contraste, plantas C_4 têm sido menos estudadas, apesar da significativa contribuição das mesmas para o seqüestro de carbono global e produção de alimentos. A característica fundamental da fotossíntese C_4 é a operação de um mecanismo concentrador de CO_2 nas folhas, que serve para saturar a fotossíntese e suprimir a fotorespiração.

O fechamento dos estômatos é um processo regulado por vários fatores como a concentração celular de CO_2 nas folhas, concentração de solutos

celulares, íons específicos, pH e ABA produzido na folha ou importados a partir da raiz (BLUM, 2009).

2.3 Sistema de defesa antioxidante

O estresse hídrico aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) como superóxido (O_2^-) e a produção de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em folhas e raízes (BIAN; JIANG 2009). O estresse oxidativo é resultante do aumento de espécies reativas de oxigênio (EROs), as quais são geradas em células de plantas durante o funcionamento metabólico normal, especialmente nos cloroplastos e mitocôndrias, ou sua formação é induzida por diferentes condições ambientais (FOYER; DESCOURVIERES; KUNERT, 1994; SMIRNOFF, 1993).

A maior parte das EROs são formadas na fosforilação oxidativa (respiração). O radical superóxido é convertido pela enzima dismutase do superóxido (SOD) em peróxido de hidrogenio (H_2O_2) que é convertido em água pela catalase. Há algumas defesas bioquímicas utilizadas pelas plantas, como a realizada pela enzima dismutase do superóxido (SOD) que destrói os radicais livres. No entanto, estas defesas são insuficientes se a condição de estresse é prolongada (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Plantas com eficiente mecanismo de limpeza dos EROs são fortes candidatas a tolerar condições de estresse abiótico. A estratégia adotada pelos vegetais para lidar com a formação de EROs implica agir diretamente sobre as EROs através de compostos antioxidantes.

Halliwell e Guteridge (1989) definiram os compostos antioxidantes como substâncias que, em relativamente baixas concentrações, competem com outros substratos oxidáveis e, portanto, diminuem significativamente ou inibem a oxidação destes substratos.

Os antioxidantes são substâncias oxidáveis, com alto poder redutor, capazes de fornecer um átomo de hidrogênio ou um elétron ao radical livre, recebendo em troca o excesso de energia da molécula.

Nesta definição incluem-se (como antioxidante) as enzimas dismutase do superóxido (SOD), peroxidase do ascorbato (APX), peroxidase da glutathione (GPX), peroxidase do guaiacol (GPOX) e catalase (CAT).

A CAT é a única entre as enzimas degradantes de peróxido de hidrogênio que não consome equivalentes redutores celulares e possui um mecanismo eficiente para remover o H_2O_2 formado nas células sob condições de estresse (MALLICK; MOHN, 2000).

A catalase parece ser sensível à fotoinativação, especialmente em baixa temperatura, levando a uma severa inibição da fotossíntese (ELSTNER; OSSWALD, 1994). As reações da catalase tornam-se mais importantes quando a concentração de H_2O_2 aumenta, pois em concentração normal de H_2O_2 , o mesmo é reduzido pela glutathione e peroxidase (RICE-EVANS; DIPLOCK; SYMONS, 1991).

A APX, uma enzima presente em quase todos os compartimentos celulares, faz parte de duas vias metabólicas que agem na desintoxicação de H_2O_2 , o ciclo água-água e o ciclo ascorbato-glutathione (MITTLER, 2002).

2.4 Produtividade e seca

Dois fatores são de extrema importância para a produtividade: o estágio fisiológico da planta e o ambiente em que ela está. Certamente o ambiente em que a planta cresce, em particular o campo, freqüentemente afeta o rendimento da colheita. É necessário selecionar variedades e híbridos e prover as melhores condições de desenvolvimento para obter melhores rendimentos (VANDERLIP, 1993).

Existe uma variabilidade muito grande no grau de tolerância à falta d'água entre espécies e, mesmo dentro de uma espécie, entre variedades. Além disto, o estágio de desenvolvimento da planta em que ocorre o estresse também é crítico para a produtividade agrícola (KRAMER; BOYER, 1995 apud PIMENTEL, 2004, p. 56).

A produtividade vegetal é um fenômeno complexo e o entendimento e a utilização de características secundárias, a exemplo parâmetros como eficiência do uso da água, índice de colheita e transpiração, podem orientar pesquisadores e produtores na obtenção de ganhos de eficiência quanto à recomendação de cultivares e de práticas de manejo da cultura.

A produtividade depende do número de grãos polinizados e desenvolvidos e da quantidade de fotoassimilados disponíveis (fotossíntese). Portanto, atenção deve ser dada para características de plantas que têm forte relação com o componente do rendimento “número de grão” e dos eventos de enchimento pós-polinização (DURÃES et al., 2005).

Pesquisas realizadas com linhagens e híbridos de sorgo revelam que genótipos tropicais podem atingir altos rendimentos de biomassa seca da parte aérea total de (31-51 t ha⁻¹) sob irrigação e (20-29 t ha⁻¹) na condição de sequeiro (HABYARIMANA et al., 2004).

Plantas submetidas sob estresse apresentam alterações em órgãos maduros, provocadas pela redução do tamanho das células, resultante do equilíbrio entre a expansão do tecido e divisão celular; os efeitos dependem da intensidade da seca.

Em monocotiledôneas, se um estresse ocorre durante a divisão celular, ele afeta o tamanho dos órgãos folhas e comprimento radicular, tanto nas fases de divisão celular quanto na fase de expansão, sendo a divisão celular mais afetada que a expansão (TARDIEU et al., 2011).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A disponibilidade hídrica e a temperatura são dos fatores climáticos, entre os abióticos, os que têm maior efeito sobre a produtividade agrícola, principalmente em áreas tropicais como América do Sul, África e Ásia, onde as frequências de baixos índices de precipitação e altas temperaturas são muito maiores do que nas regiões temperadas.

Pouco se conhece sobre os fatores abióticos que interferem na produtividade, devido à grande complexidade desse tema, assim, é necessário que se tenha mais pesquisas para um melhor entendimento dos mecanismos fisiológicos, enzimáticos e anatômicos, de resposta das plantas à seca, principalmente em espécies cultivadas. Essas pesquisas visam garantir não só conhecimento de base a ser aplicado em novas tecnologias, mas também são de suma importância na segurança alimentar.

REFERÊNCIAS

- BACELAR, E. A. et al. Sclerophylly and leaf anatomical traits of five field-grown olive cultivars growing under drought conditions. **Tree Physiology**, Oxford, v. 24, p. 233–239, 2004.
- CALDEIRA JÚNIOR, C. F. **Xilema e propriedades hidráulicas de plantas *Caryocar brasiliense* CAMB. (pequi) em diferentes ambientes**. 2009. 42 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- CARVALHO, L. M.; SILVA, E. A. M.; AZEVEDO. Aspectos morfofisiológicos das cultivares de café Catuaí-Vermelho e Conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 411-416, 2001.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.
- CORCUERA, L. et al. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. **Trees**, [S. l.], v.18, p.83-92, 2004.
- CORNIC, G.; FRESNEAU, C. Photosynthetic carbon reduction and oxidation cycles are the main electron sinks for photosystem II activity during a mild drought. **Annals of Botany**, London, v. 89, p. 887–894, 2002.
- CUTTER, E. **Anatomia vegetal: células e tecidos**. 2. ed. São Paulo: Roca, 1986.
- DURÃES, F. O. M. et al. Caracterização fenotípica de linhagens de milho quanto ao rendimento e à eficiência fotossintética. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 3, p. 355-361, 2005.
- EHLERINGER, J. R.; CERLING, T. E.; HELLIKER, B. R. C₄ photosynthesis, atmospheric CO₂ and climate. **Oecologia**, Berlin, v. 112, p. 285–299, 1997.
- ELSTNER, E. F.; OSSWALD, W. Mechanisms of oxygen activation during plant stress. **Proceedings of the royal Society of Edinburgh**, Edington, v. 102b, p. 131-154, 1994.

FLEXAS, J. et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 5, p. 1–11, 2004.

FOYER, C. H.; DESCOURVIERES, P.; KUNERT, K. J. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 17, n. 5, p. 507-523, May 1994.

GUERFEL, M. et al. Effects of water stress on leaf structure of two main Tunisian olive cultivars (*Olea europaea* L.). In: TUNISIA JAPAN SYMPOSIUM ON SCIENCE SOCIETY AND TECHNOLOGY, 7., 2006, Sousse. **Anais...** Sousse: [s. n.], 2006. p. 9.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C. **Free radicals in biology and medicine**. Oxford: Clarendon, 1989. 543 p.

KERSTIENS, G. Water transport in plant cuticles, an update, **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 57, p. 2493–2499, 2006.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic, 1995.

KUNST, L.; SAMUELS, A. L. Biosynthesis and secretion of plant cuticular wax. **Progress in Lipid Research**, Oxford, v. 42, n. 1, p. 51-80, Jan. 2003.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. ^{13}C discrimination during CO_2 assimilation by the terrestrial biosphere. **Oecologia**, Berlin, v. 99, p. 201–215, 1994.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Comunicado Técnico, 86).

MALLICK, N.; MOHN, F. H. Reactive oxygen species: response of algal cells. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 157, p. 183-193, 2000.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7. n. 9, p. 601-639, September 2002.

RICE-EVANS, C. A.; DIPLOCK, A. T.; SYMONS, M. C. R. Techniques in free radical research. In: URDON, R. H.; VAN KNIPPENBERG, P. H. (Ed.). **Laboratory techniques in biochemistry and molecular biology**. London: Elsevier, 1991. v. 22, 291p.

RISTIC, Z.; JENKS, M. A. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration avoidance. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v.159, p. 645–651, Jan. 2002.

SILVA, L. M.; ALQUINI, Y.; CAVALLET, V. J. Inter-relações entre a anatomia vegetal e a produção vegetal. **Acta Botânica Brasílica**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 183-194, 2005.

SMIRNOF, N. The role active in the response of plants to water deficit and desiccation. **New Phytologist**, Cambridge, v. 125, n.1, p. 27-58, Sept. 1993.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TIPPLE, B. J.; PAGANI, M. The early origins of terrestrial C4 photosynthesis. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, Palo Alto, v. 35, p. 435–461, 2007.

VANDERLIP, R. L. **How a sorghum plant develops**. Manhattan: Kansas Agricultural Experiment Station, 1993. (Contribution, 1203).

CAPÍTULO 2

ANATOMIA FOLIAR, ENZIMAS E TEORRELATIVO DE CLOROFILA

RESUMO

A disponibilidade hídrica e a temperatura são os fatores climáticos de maior efeito sobre a produtividade agrícola, sendo que estes regem a distribuição das espécies nas diferentes zonas climáticas do globo. Com o objetivo de caracterizar as mudanças morfoanatômicas de linhagens de sorgo contrastantes para a tolerância à seca, foram submetidas à condição de estresse hídrico por 10 dias em casa de vegetação. A imposição do estresse foi feita gradativamente até o potencial da água no solo atingir aproximadamente o valor de -100 kPa. O delineamento foi inteiramente casualizado DIC, em um fatorial $4 \times 2 \times 2$, sendo quatro linhagens, duas tolerantes à seca, Tx642, 99100 e duas sensíveis, BR007 e BR001, dois estádios fenológicos, florescimento e enchimento de grãos e dois sistemas de manejo, irrigado e estressado, totalizando 16 tratamentos com 3 repetições representadas por um vaso cada, sendo que cada vaso continha duas plantas até o momento da coleta. As análises foram realizadas na folha bandeira após o término da imposição do estresse hídrico, durante o período da manhã estas foram avaliadas com auxílio do clorofilometro (SPAD) para quantificação do teor relativo de clorofila, foram coletadas amostras do terço médio das folhas bandeiras e fixadas em F.A.A₇₀, posteriormente, as amostras foram submetidas aos procedimentos usuais em microtécnica vegetal para realização de secções paradérmicas e transversais nas faces adaxial e abaxial. O restante da folha foi coletado excluindo-se a nervura central, envolvida em papel alumínio e mergulhada em nitrogênio líquido e, posteriormente, transferidas para freezer, onde permaneceram a -86°C , até o momento das análises enzimáticas do sistema de defesa antioxidante APX, POD, CAT. Para a estatística foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar. A linhagem tolerante à seca 99100 reúne o maior número de atributos anatômicos e modificações que lhe permite suportar melhor a seca. A maior parte das modificações anatômicas ocorreu no primeiro feixe de maior diâmetro no mesófilo. Foi encontrada elevada atividade enzimática da APX e CAT na linhagem Tx642, que pode ser um indicativo de maiores produções de EROs nessa espécie. Todas as linhagens de sorgo sofreram redução no conteúdo relativo de clorofila sob estresse hídrico. O maior conteúdo relativo de clorofila parece não estar relacionado com a espessura do mesófilo.

Palavras chave: *Sorghum bicolor*. Tolerância à seca. Enzimas. Fotossíntese.

ABSTRACT

The water availability and temperature are the climatic factors of greater effect on agricultural productivity, and dictate the distribution of species in different climatic zones of the globe. In order to characterize the morphoanatomical changes of sorghum lineage contrasting for drought tolerance, sorghum lineage were subjected in a greenhouse to the condition of water stress. The imposition of stress was done gradually until the soil water potential reaches a value of approximately -100 kPa for 10 days. The design was completely randomized DIC in a 4x2x2 factorial, with four lines, two drought-tolerant, Tx642, 99100 and two sensitive and BR 007 BR001, two phenological stages, flowering and grain filling and two management systems irrigated and stressed, totaling 16 treatments with three repetitions each represented by a pot, each pot had two plants to the point of collection. Analyses were performed on the flag leaf after the imposition of water stress in the morning was available with the help of the SPAD to quantify the relative chlorophyll content. Samples were collected from the middle third of the flag leaf and fixed in FAA₇₀, then the samples were subjected to the usual procedures for conducting in microtechniques paradermic and transverse sections in the adaxial and abaxial. The rest of the leaves were collected excluding the midrib, wrapped in aluminum foil and dipped in liquid nitrogen and then transferred to freezer, where it remained at -86 ° C until the time of enzymatic analysis of the antioxidant defense system APX, POD, CAT. Was used for statistical analysis of variance (ANOVA) test and mean comparison Skott-Knott, at 5% probability, the program Sisvar. The drought-tolerant strain 99100 the largest number of attributes and anatomical changes that allows you to better withstand drought. Most of the anatomical changes occurred in the first beam of larger diameter in the mesophyll. High enzyme activity of APX and CAT was found in the lineage Tx642 that may be indicative of higher ROS production in this species. All sorghum lineages were reduced in relative chlorophyll content under water stress. The highest relative content of chlorophyll does not appear to be related to the thickness of the mesophyll.

Keywords: *Sorghum bicolor*. Drought tolerance. Enzymes. Photosynthesis.

1 INTRODUÇÃO

A anatomia vegetal tem importante destaque na contribuição com diversas áreas do conhecimento, como botânica, fisiologia e ecologia. Os primeiros estudos da anatomia de plantas tinham por objetivo entender a distribuição e organização dos principais tecidos no corpo do vegetal. Atualmente, com a evolução do conhecimento e desenvolvimento de novos métodos, a anatomia vegetal tornou-se uma ferramenta valiosa, tanto na identificação das estruturas quanto na caracterização de genótipos e sua interação com o ambiente.

A anatomia quantitativa surge no contexto de avaliar morfometricamente as adaptações do vegetal em diversos ambientes, como em situações de estresse abiótico ou adaptações a áreas contaminadas por metais pesados, substâncias tóxicas e até mesmo poluição atmosférica.

A possibilidade de mensurar células e tecidos tem sido uma ferramenta muito útil para estudos de qualidade das pastagens mediante a proporção de tecidos digeríveis e tecidos lignificados. Sendo as gramíneas muito utilizadas na forragicultura, as relações entre a anatomia vegetal e a qualidade de gramíneas forrageiras estão diretamente ligadas às características de organização estrutural (SILVA; ALQUINI; CAVALLET, 2005).

Plantas com eficiente mecanismo de limpeza dos EROs são fortes candidatas a tolerância em condições de estresse abiótico. A estratégia adotada pelos vegetais para lidar com a formação de EROs implica agir diretamente sobre as EROs através de compostos antioxidantes.

O teor relativo de clorofila pelo SPAD é um parâmetro de avaliação bastante utilizado no melhoramento de gramíneas, porém, sua relação com a seca ainda é motivo de bastantes controvérsias na literatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Procedimentos Gerais

Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, no período de Julho a Outubro de 2010, na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG, localizada a 19° 28' de latitude S, longitude 44°15'08'' W e 732m de altitude. Foram utilizados vasos de 20 litros, nos quais foram semeados aproximadamente 10 grãos, para controle fitossanitário.

Quando as plantas atingiram o estágio de V2 a V3 que corresponde a 2 e 3 folhas completamente expandidas respectivamente, foi feito um desbaste permanecendo apenas duas plantas por vaso. Foi utilizado como substrato um solo tipo Latossolo Vermelho Distrófico Típico, previamente corrigido com calcário e adubado com NPK+ Zinco (8-28-16) na proporção de 50g para cada 100 Kg de solo de acordo com a análise do solo, seguindo recomendação para a cultura no estado de Minas Gerais. Quando as plantas alcançaram o estágio de V8 a V12, foram feitas duas adubações de cobertura.

O teor de água no solo foi monitorado diariamente nos períodos da manhã e tarde (9:00 e 15:00 horas), com auxílio de um sensor de umidade modelo GBReader, N 1535 (Measurement Engineering Austrália) instalado nas parcelas experimentais a uma profundidade de 20 cm. A reposição hídrica através de irrigação foi realizada com base nas leituras obtidas com o sensor e a água repostada até a capacidade de campo (CC). Esses cálculos foram realizados com o auxílio de uma planilha eletrônica, feita em função da curva de retenção de água do solo.

A imposição dos tratamentos com estresse hídrico iniciaram-se quando 50% das plantas atingiram o estágio fenológico de florescimento e no enchimento de grãos, separadamente, com a duração de 10 dias. A reposição

hídrica foi realizada diariamente até o solo atingir a umidade na CC, para a condição sem estresse enquanto que, na condição de deficiência hídrica, a indução do estresse hídrico foi realizada diariamente repondo-se 50% da água total disponível, ou seja, até o potencial da água no solo atingir aproximadamente o valor de -100 kPa.

Os tratamentos foram realizados em fatorial 4:2:2 de quatro linhagens de sorgo contrastantes à seca, duas tolerantes: B35Tx642B, 9910032 e duas sensíveis: BR007B, BR001B que por efeitos de simplificação serão denominadas de Tx642, 99100, BR007 e BR001, respectivamente, combinadas com dois estádios fenológicos de desenvolvimento (florescimento e enchimento de grãos) e dois manejos (irrigado e estressado), totalizando 48 vasos dispostos no delineamento inteiramente casualizado DIC.

2.2 Anatomia foliar

Aos dez dias após a imposição do estresse hídrico em cada estágio as plantas descritas anteriormente no item 2.1 foram avaliadas quanto a anatomia foliar, análises enzimáticas e teor relativo de clorofila.

Para anatomia de folhas foram coletadas seções do terço médio foliar da folha bandeira, em seguida fixadas em solução de formaldeído, ácido acético e etanol 70% (FAA₇₀) (JOHANSEN, 1940), por 48 horas e preservadas em etanol 70%. Seções transversais e paradérmicas foram feitas manualmente e com auxílio de micrótomo de mesa. Em seguida, os cortes foram clarificados com hipoclorito de sódio 5%, por 10 minutos, enxaguados três vezes com água destilada e coradas com safrablau (solução de safranina e azul de astra 7,5:2,5) e montadas em lâminas com glicerina 50% (KRAUS; ARDUIN, 1997). As seções foram fotografadas em microscópio óptico de luz Olympus BX-60, acoplado a uma câmara digital.

Para cada repetição foi montada uma lâmina, com aproximadamente 5 cortes dos quais foram fotografadas três imagens aleatoriamente.

Nas secções paradérmicas nas faces adaxial e abaxial das folhas foi medida a densidade estomática (número de estômatos/mm²), índice estomático [(número de estômatos/mm²)/número de células epidérmicas]*100, diâmetro polar dos estômatos, diâmetro equatorial e funcionalidade estomática (diâmetro polar/diâmetro equatorial).

Nos cortes transversais, foi avaliado na nervura central o diâmetro dos vasos de metaxilema, área do floema, área de esclerênquima, distância entre os feixes. No mesofilo foi avaliada a espessura da lamina foliar, o número de células buliformes por milímetro, a espessura da epiderme e cutícula. No primeiro feixe de maior calibre após a nervura central foi avaliado o diâmetro do metaxilema, área de floema, distância entre os feixes, diâmetro polar e equatorial das células buliformes, Figura 1.

Todas as medições para anatomia foram feitas pelo programa de análise de imagens UTHSCSA ImageTool (University of Texas, San Antonio, USA) utilizando-se calibrações feitas com régua microscópica fotografada nos mesmos aumentos das fotomicrografias.

Para análise estatística dos dados foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto a normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. As variáveis foram transformadas para log (x).

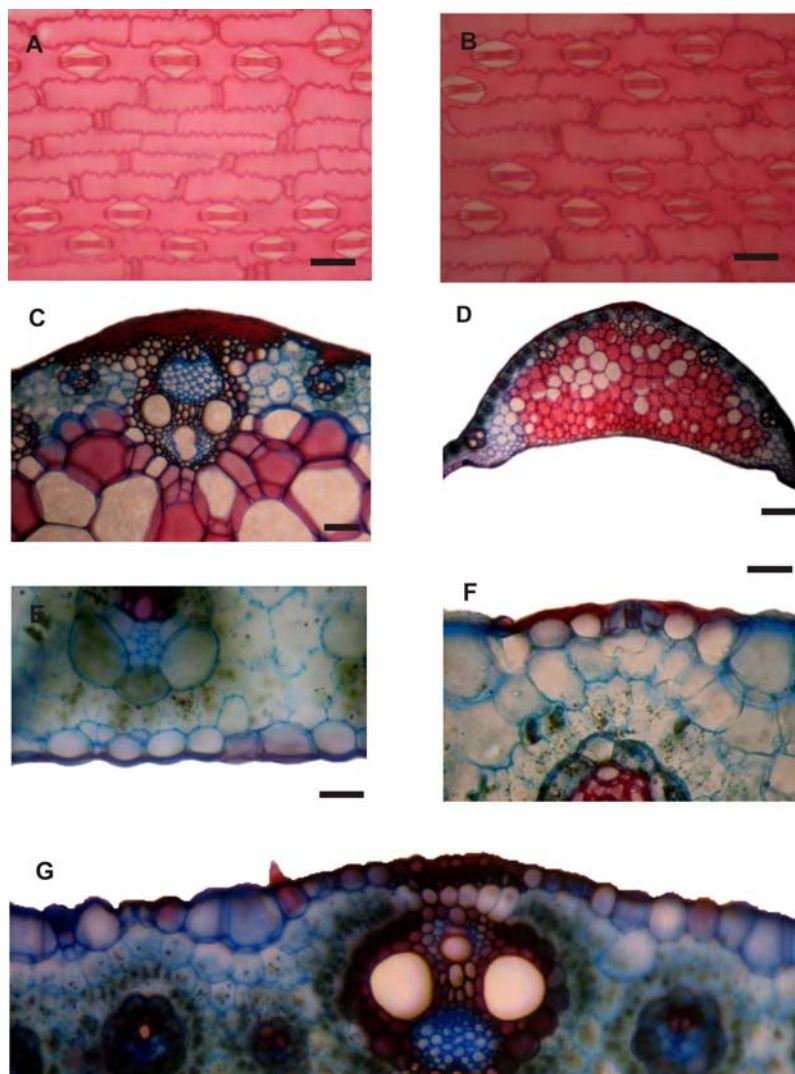


Figura 1 Regiões da folha a serem medidas. A e B: fotomicrografias de seções paradérmicas da face abaxial e adaxial respectivamente. C: feixe central da nervura central em destaque mostrando com detalhes os feixes vasculares. D: secção de corte transversal da nervura central, E e F: epiderme das faces abaxial e adaxial em cortes transversais respectivamente. G: mesofilo em corte transversal mostrando o primeiro feixe de maior calibre no mesofilo; após a nervura central, células epidérmicas ordinárias, tricomas, células buliformes, fibras, estômatos e anatomia Kranz. Barras 50 μ (A, B, E, F) 100 μ (C, D, G)

2.3 Enzimas do estresse oxidativo

Após a coleta do terço médio das folhas bandeiras para as análises de anatomia, o restante da folha foi coletado excluindo-se a nervura central, envolvida em papel alumínio e mergulhada em nitrogênio líquido e, posteriormente, transferidas para freezer, onde permaneceram a -86°C , até o momento das análises enzimáticas.

Para análise enzimática 300mg foram macerados em nitrogênio líquido até obtenção de um pó fino.

Em seguida, foi adicionado 0,9 mL de um tampão de extração constituído de 883,8 μL de tampão fosfato, 0,1M pH 6,8 EDTA 0,1M na quantidade de 9 μL , DTT 0,5 M com 3,6 μL , PMSF 0,1M na quantidade de 7,2 μL e, ainda, 18 mg de PVPP (BOR; ÖZDEMIR; TÜRKAN, 2003). Após homogeneização, o extrato enzimático foi centrifugado a 14000 g por 20 minutos, a 4°C , quando então o sobrenadante foi coletado, para realizar as determinações das atividades das enzimas oxidases, Peroxidase do Guaiacol (POD), Peroxidase do Ascorbato (APX) e Catalase (CAT).

A atividade de POD foi analisada com a adição de 990 μL de tampão fosfato de sódio 0,1 M pH 6,0 16,7 μL de guaiacol 0,2 M, 13,3 μL de H_2O_2 0,03 M, em 20 μL do extrato enzimático adaptado de Nakano e Asada (1981). A atividade enzimática foi determinada pelo acompanhamento do aumento da absorbância a 470 nm por um minuto e trinta segundos, em intervalos de 15 segundos e calculada com base no fator de extinção de $26,6\text{ mM}^{-1}\text{ cm}^{-1}$.

A APX foi analisada com a adição de 1,0 mL de tampão fosfato de sódio 0,1 M pH 7, 16,0 μL de ácido ascórbico 0,01 M, 66 μL de H_2O_2 0,03 M em 120 μL do extrato enzimático adaptado de Nakano e Asada (1981). A atividade enzimática foi determinada pelo acompanhamento da queda da absorbância, a

290 nm, por um minuto e trinta segundos, em intervalos de 15 segundos, e calculada com base no fator de extinção de $2,8 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Para quantificar a atividade de CAT, adicionou-se aos 20 μL do extrato enzimático, 0,5 mL de tampão fosfato de sódio 0,05 M pH 7,0 e 417 μL de H_2O_2 , 0,0125 M dissolvido no tampão adaptado de Madhusudhan et al. (2003). A atividade enzimática foi determinada pelo acompanhamento da queda da absorbância a 240 nm, por um minuto e trinta segundos, em intervalos de 15 segundos e calculada com base no fator de extinção de $36 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Para análise estatística dos dados foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. As variáveis foram transformadas para raiz quadrada de $(x+1)$.

2.4 Teor relativo de clorofila

O teor de clorofila foi feito nas plantas durante o estágio de enchimento de grãos, por meio de um clorofilômetro portátil *Soil plant analysis development* (SPAD) (Minolta SPAD 502 Osaka, Japan).

As medições foram feitas na folha bandeira, cada repetição foi amostrada com uma média de seis leituras por repetição, sendo cada repetição composta de duas plantas por vaso.

Para análise estatística dos dados foi utilizada, a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto a normalidade pelo teste de Shapiro Wilk.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Anatomia foliar

Para a espessura da epiderme e cutícula não houve interações entre os fatores genótipo, estágio e manejo. Dentre os genótipos, a epiderme mais espessa na face abaxial foi encontrada nas linhagens 99100 e BR001 seguidas de BR007 e Tx642. Para a epiderme da face adaxial não foram encontradas diferenças entre as linhagens.

Para a espessura de cutícula da face abaxial BR007, foi a linhagem que apresentou menor espessura, as demais linhagens não diferiram entre si. Porém, na face adaxial, as linhagens tolerantes à seca Tx642 e 99100 apresentaram uma maior espessura de cutícula em relação às linhagens sensíveis BR001 e BR007, Tabela 1.

Tabela 1 Espessura da epiderme e cutícula da face abaxial e adaxial em linhagens de sorgo contrastantes à seca

Linhagens	Espessura Epiderme (μm)		Espessura cutícula (μm)	
	Face aba.	Face Ada	Face aba.	Face Ada
BR001	52,79 a	59,21 a	12,13 a	11,72 b
BR007	49,21 b	56,70 a	9,42 b	10,68 b
99100	57,03 a	61,46 a	14,20 a	14,05 a
Tx642	48,51 b	55,63 a	13,44 a	13,73 a

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A espessura da epiderme e cutícula é uma característica genotípica que para as condições desse estudo são independentes do manejo adotado e do

estádio fonológico em que as plantas se encontraram. A presença de epiderme mais espessa em algumas linhagens pode conferir redução na perda de água pela imposição de uma barreira física maior à transpiração.

Ristic e Jenks (2002), ao estudarem a espessura da epiderme e cutícula em linhagens de milho *Zea mays*, sob estresse hídrico no estágio vegetativo, observaram que linhagens com epiderme e cutícula mais espessas perdem menos água que linhagens com parede e cutícula fina.

A cutícula desempenha um papel fundamental na perda de água. Cutículas mais espessas refletem adaptações a ambientes com baixa disponibilidade hídrica, pois a espessura da cutícula é inversamente proporcional às perdas de água por transpiração quando estômatos estão fechados (JENKS et al., 1994; RISTIC; JENKS, 2002).

Sob estresse, a linhagem tolerante à seca Tx642 foi a que apresentou a maior espessura de limbo, seguidas de BR007 e BR001 e 99100. Sob manejo irrigado não houve diferenças quanto à espessura do limbo entre as linhagens, porém, as linhagens tolerantes Tx642 e 99100 foram as únicas que apresentaram aumento e redução na espessura do limbo, respectivamente, sob mudança de manejo irrigado para estressado, Tabela 2.

Sob irrigação, as linhagens sensíveis à seca BR001 e BR007 apresentam maior densidade de células buliformes por milímetro do que as linhagens tolerantes à seca 99100 e Tx642, sendo BR001 com 37% mais células buliformes quando comparada a 99100, porém, sob estresse hídrico, BR007 apresentou a menor média de células buliformes, enquanto BR001 permaneceu com a maior média.

A linhagem 99100 foi a única com aumento significativo no número de células buliformes, da ordem de 35,63%, quando comparada na condição irrigada e estressada, Tabela 2.

Tabela 2 Espessura do limbo foliar e densidade de células buliformes/mm em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Espessura do Limbo (μm)		Nº Cel. Buliformes/mm	
	Irrigado	Estressado	Irrigado	Estressado
BR001	70,82 aA	68,17 cA	36 aA	39 aA
BR007	96,97 aA	88,48 bA	26 bA	29 bA
99100	103,12 aA	65,12 cB	23 cB	35 aA
Tx642	83,97 aB	140,05 aA	26 cA	30 bA

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A literatura relata o aumento da espessura do mesofilo e redução da área foliar em condições de elevada incidência luminosa, enquanto que reduções da espessura do limbo foliar são verificadas em ambientes com baixa intensidade luminosa, acompanhado do aumento da área foliar para compensar a baixa quantidade de luz disponível para a fotossíntese.

Pouca informação se tem a respeito de modificações na espessura do mesofilo em plantas sob estresse hídrico. Melo et al. (2007), ao estudarem as alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria anceps* Stapf ex Massey e *Paspalum paniculatum* L. sob condições de déficit hídrico aos onze dias de restrição hídrica, verificaram diminuição da espessura do limbo foliar apenas em sectária.

A maior espessura do limbo pode contribuir no aumento do número de cloroplastos e, conseqüentemente, na fotossíntese, pois a atividade fotossintética está diretamente ligada ao número de cloroplastos (PIMENTEL, 1998).

3.1.1 Feixe central da nervura central

Para todas as medições feitas na nervura central, a única característica analisada que apresentou interação entre os genótipos e o manejo foi a distância entre os feixes, sendo as demais características analisadas como diâmetro do metaxilema, área de floema e área de fibras características, que apresentaram apenas diferenças entre os genótipos, em sua maioria.

Tanto sob irrigação quanto sob estresse as linhagens sensíveis à seca BR001 e BR007 foram as que apresentaram as maiores distâncias entre os feixes vasculares, enquanto a linhagem tolerante à seca 99100 apresentou as menores distâncias entre os feixes nos dois manejos. Porém, quando comparadas entre as condições de manejo irrigado e estressado, apenas a linhagem BR007 apresentou redução significativa entre a distância dos feixes, da ordem de 11,52%, Tabela 3.

Tabela 3 Distância entre feixes vasculares na nervura central de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Distância entre Feixes Vasculares (μm)	
	Irigado	Estressado
BR001	136,58 bA	143,15 aA
BR007	169,89 aA	150,32 aB
99100	94,98 cA	86,00 bA
Tx642	124,82 bA	131,81 aA

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A distância entre os feixes pode estar relacionada com a eficiência de distribuição de água e fotoassimilados, bem como pode caracterizar uma estratégia de proteção do sistema hidráulico (PEREIRA, 2008; SACK; HOLBROOK, 2006). A menor distância entre os feixes permite uma maior

densidade por área, o que assegura que se houver dano por cavitação em um elemento de vaso, outros feixes podem suprir a demanda ao redor. Souza et al. (2010) ao estudarem as modificações foliares em dezoito ciclos de seleção de milho para tolerância ao alagamento, observaram diversas modificações anatômicas nos sucessivos ciclos de seleção dentre elas, maior quantidade de feixes vasculares e consequente diminuição da distância entre os feixes.

3.1.2 Primeiro feixe maior no mesofilo

O maior número de interações entre as linhagens e o manejo para as características estudadas ocorreram no primeiro feixe de maior calibre após a nervura central. Apenas o diâmetro equatorial das células buliformes não apresentou interação entre as linhagens e o manejo.

As linhagens tolerantes à seca Tx642 e 99100 foram as que apresentaram os maiores diâmetros do metaxilema independente do manejo; sendo o diâmetro dos vasos de metaxilema de Tx642 da ordem de 39,78% maior sob irrigação e 41,58% quando comparado ao diâmetro dos vasos de metaxilema de BR001, que foi a linhagem com menor diâmetro. Apenas BR007 apresentou redução significativa de 16,52% no diâmetro dos vasos do metaxilema quando comparado entre as condições de manejo irrigado e estressado, Tabela 4.

Em ambos os manejos a linhagem BR007 apresentou o maior diâmetro polar das células buliformes enquanto que a linhagem BR001 apresentou o menor diâmetro. Apenas a linhagem BR007 apresentou redução significativa no diâmetro polar das células buliformes, da ordem de 13,15%, Tabela 4.

Tabela 4 Diâmetro dos elementos do metaxilema, células buliformes em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Diam. Meta Xilema (μm)		Diam. Polar Cel. Buliformes (μm)	
	Irrigado	Estressado	Irrigado	Estressado
BR001	48,46 bA	48,35 cA	43,25 cA	44,83 bA
BR007	87,12 aA	72,73 bB	78,87 aA	68,50 aB
99100	74,61 aA	78,48 aA	58,78 bA	57,94 aA
Tx642	80,47 aA	82,77 aA	62,44 bA	63,81 aA

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Sob irrigação, a maior distância entre os feixes vasculares foi encontrada na linhagem BR007 e a menor distância na linhagem BR001. Já sob irrigação, as maiores distâncias foram encontradas nas linhagens tolerantes à seca Tx642 e na sensível BR007. Quando comparada à mesma linhagem dentro dos manejos, BR001 apresentou um aumento no diâmetro dos feixes da ordem de 17,10% , enquanto que BR007 apresentou uma redução de 18,50% , Tabela 5.

As maiores áreas de floema, sob irrigação, foram encontradas nas linhagens 99100 e BR007 enquanto que a menor área de floema foi encontrada na linhagem sensível à seca BR001, sendo da ordem de 63,24% menor quando comparada a 99100. Na condição estressada, as linhagens tolerantes à seca apresentaram as maiores médias em relação à área de floema, porém, apenas BR007 apresentou redução significativa da área de floema, da ordem de 23,08% sob estresse, Tabela 5.

Tabela 5 Distância entre feixes, área de floema e no mesofilo foliar de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Dist. entre Feixes (μm)		Área floema (μm^2)	
	Irrigado	Estressado	Irrigado	Estressado
BR001	58,85 bB	70,99 bA	2829,04 bA	2779,53 cA
BR007	105,17 aA	85,71 bB	7688,71 aA	5914,49 bB
99100	99,27 bA	93,97 aA	7695,66 aA	7635,04 aA
Tx642	91,68 aA	95,95 aA	6161,82 aA	6056,74 aA

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O diâmetro dos elementos de vaso do metaxilema pode conferir adaptações a baixa disponibilidade hídrica. Elementos de vaso com grande diâmetro são mais propensos a cavitação do que elementos de vaso de diâmetro pequeno. Esta redução observada na linhagem BR007 é uma característica que evita a cavitação, por proporcionar melhor condução da água ao longo dos elementos de vaso do xilema (PEREIRA, 2008).

Espécies que possuem vasos de maiores dimensões apresentam alta eficiência de absorção e transporte de água e nutrientes. Plantas com essas características, no geral, possuem fotossíntese e crescimento elevados (BRODRIBB; FIELD; JORDAN, 2007). Porém, essas mesmas características anatômicas estão relacionadas com o aumento da susceptibilidade a cavitação (COCHARD et al., 2002).

O diâmetro polar das células buliformes determina o tamanho dessas células em comprimento, anticlinal a epiderme. Mudanças no turgor dessas células são capazes de provocar o enrolamento da lâmina foliar e, conseqüentemente, redução da perda de água por transpiração (MELO et al., 2007). A redução do diâmetro equatorial das células buliformes da linhagem BR007 sob estresse hídrico certamente é devido à perda de turgor nessas células.

Há indícios de que maior número de células buliformes com maior diâmetro polar acarreta a uma redução da transpiração devido à maior

probabilidade de ocorrer enrolação em função da perda de turgor (ALVAREZ; ROCHA; MACHADO, 2008; MELO et al., 2007; SOUZA et al., 2010). É importante ressaltar que não há quase nenhuma informação sobre células buliformes e sua relação direta com a redução da perda de água por transpiração. Além disso, nada se sabe sobre a redução da área foliar provocada pelo enrolamento e a taxa de fotossíntese líquida.

As mesmas considerações para a distância entre os feixes na nervura central podem ser aplicadas ao mesófilo. Na lâmina foliar a disposição dos feixes vasculares pode conferir grande resistência física ao limbo (BRITO; RODELLA; DESCHAMPS, 2004). Assim espera-se que quanto maior a quantidade de feixes e menor distância entre eles, maior seja a resistência à murcha.

A menor distância entre os feixes possibilita uma maior quantidade de feixes por área, o que torna a planta mais funcional do ponto de vista da restrição hídrica, pois se algum vaso for prejudicado por cavitação, provavelmente o tecido não ficará sem receber água e nutrientes devido à maior densidade de vasos por área. Porém, o raciocínio inverso também é válido, pressupõe-se que linhagens com maiores distâncias entre os feixes vasculares possuem uma maior eficiência de distribuição, mas certamente são mais suscetíveis a danos causados por cavitação, limitando a distribuição de água e nutrientes devido à menor densidade de feixes.

Linhagens com maior área de tecido floemático por monostelo podem apresentar maior facilidade no transporte, armazenamento e translocação. O bom funcionamento desse tecido é fundamental para uma boa produtividade, por ser o floema o responsável pelo transporte da sacarose das folhas e colmo para os grãos.

Souza et al. (2010) observaram um aumento na espessura do floema com o decorrer dos ciclos de seleção à medida que a variedade de milho “Saracura”

BRS4154 se tornava mais adaptada à condição de hipoxia. As maiores áreas de floema e a não redução significativa da mesma sob estresse hídrico verificadas nas linhagens tolerantes à seca Tx642 e 99100 e a redução significativa de área para a linhagem BR007 podem ser fortes indícios de tolerância e susceptibilidade à seca, respectivamente.

3.1.3 Epiderme da face abaxial e adaxial

Não houve interações entre genótipo e manejo para o número de estômatos, diâmetro polar, e diâmetro equatorial, funcionalidade e índice estomático, porém houve nessas características diferenças entre as linhagens, Tabela 6.

Tx642 apresentou o maior número de estômatos com média de 37,99% superior na face abaxial e 26,29% na face adaxial quando comparado com BR001, que foi a linhagem com menor número de estômatos em ambas as faces Tabela 6.

O maior diâmetro polar foi encontrado na linhagem Tx642 em ambas as faces, enquanto que para o diâmetro equatorial, o maior diâmetro foi encontrado na linhagem sensível à seca BR001, o que explica a maior funcionalidade estomática de Tx642 em relação às outras linhagens, pois a funcionalidade é a razão entre o diâmetro polar e o diâmetro equatorial, Tabela 6.

O maior índice estomático na face abaxial foi encontrado em Tx642 enquanto que na face adaxial o maior índice foi encontrado em Tx642 e 99100. O número de estômatos e células epidérmicas por unidade de área é a base para a determinação do índice estomático (IE), que representa o investimento da planta na produção de estômatos em relação ao total de células epidérmicas (CASTRO et al., 2009), Tabela 7.

Tabela 6 Número de estômatos, diâmetro polar e equatorial de estômatos de linhagens de sorgo contrastantes à seca

Linhagens	Nº de estômatos		Diâmetro Polar		Diâmetro Equatorial	
	Face aba.	Face Ada	Face aba.	Face Ada	Face aba.	Face Ada
BR001	8,00 c	6,00 b	76,33 a	69,18 a	15,14 a	13,81 a
BR007	10,00 b	6,00 b	69,05 b	65,39 b	12,97 b	12,34 b
99100	11,00 b	9,00 a	67,80 b	62,67 b	12,49 b	12,08 b
Tx642	14,00a	8,00 a	76,36 a	69,22 a	11,70 b	11,84 b

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O maior número de estômatos por área ajuda a explicar as maiores taxas de condutância estomática, atividade transpiratória e fotossintética das plantas. Cultivares da mesma espécie e de mesmo gênero podem diferir quanto à densidade estomática (CARVALHO et al., 2001).

Por possuir estômatos na epiderme da face abaxial e adaxial, porém em maior quantidade na face abaxial o sorgo é considerado uma espécie anfigipostomática (CASTRO et al., 2009).

Além disso, maior quantidade de estômato na face abaxial permite uma maior eficiência no uso da água. Muchow e Sinclair (1989), ao estudarem a perda de água pela condutância epidérmica em linhagens de sorgo, relatam que a variação da condutância epidérmica em genótipos de sorgo não está relacionada ao comprimento do poro estomático, que variou com o genótipo e com a profundidade dos estômatos.

O poro estomático ou complexo estomático varia de acordo com o diâmetro polar e equatorial; esses dois fatores estão diretamente ligados com a funcionalidade estomática. Do ponto de vista adaptativo, genótipos com maior diâmetro polar e menor diâmetro equatorial são mais funcionais e permitem ao vegetal uma eficiência maior nos processos de abertura e fechamento estomático.

Souza et al. (2010), ao estudarem a plasticidade foliar de milho para tolerância ao alagamento, encontraram um aumento de 41,9% no número de estômatos na face adaxial entre o primeiro e o último ciclo de seleção e maior funcionalidade a partir do décimo quinto ciclo de seleção na epiderme da face adaxial.

Melo et al. (2007), ao estudarem alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria* e *Paspalum* sob condições de déficit hídrico, encontraram para *Setaria* diminuição do diâmetro polar dos estômatos da epiderme adaxial e, para *Paspalum*, diminuição nos diâmetros polar e equatorial na epiderme da face abaxial e aumento no diâmetro equatorial dos estômatos na epiderme da face adaxial.

Variações no comportamento estomático, tanto em relação à densidade quanto ao tamanho dos estômatos, é uma característica muito variável e ocorre frequentemente em plantas submetidas a diferentes estresses (CASTRO et al., 2005).

Tanto a funcionalidade quanto o índice estomático são características que podem ser relacionadas com a otimização da captação de CO₂ pelas folhas, pois estômatos mais funcionais permitem a captação desse gás de forma mais eficiente, ou seja, sem grandes perdas de água em decorrência do tempo gasto no processo de abertura e fechamento dos estômatos (PEREIRA, 2008).

Tabela 7 Funcionalidade e Índice Estomático (IE) de linhagens de sorgo contrastantes à seca

Linhagens	Funcionalidade		Índice Estomático %	
	Face aba.	Face Ada	Face aba.	Face Ada
BR001	5,14 b	5,18 b	14,75 b	10,19 b
BR007	5,46 b	5,39 b	15,94 b	8,56 b
99100	5,46 b	5,26 b	14,38 b	11,98 a
Tx642	6,73 a	6,07 a	17,96 a	10,86 a

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

3.2 Enzimas do estresse oxidativo

A atividade enzimática das enzimas peroxidase do ascorbato (APX) foi maior na linhagem BR007, da ordem de 71,18% em relação a linhagem BR001, que apresentou a menor atividade enzimática para APX, Tabela 8.

Para a atividade da enzima catalase (CAT), a linhagem tolerante à seca Tx642 foi a que apresentou maior atividade enzimática, da ordem 79.10% mais atividade que as demais linhagens. Não houve diferenças estatísticas para a atividade da enzima peroxidase do guiacol (POD) entre as linhagens, Tabela 8.

Tabela 8 Atividade de enzimas do sistema antioxidante em linhagens de sorgo contrastantes à seca

Linhagens	APX	CAT	POD
	mM Ascorbato , min ⁻¹ . /mg prot.	mM H ₂ O ₂ .min ⁻¹ /mg.prot.	mM H ₂ O ₂ . min ⁻¹ /mg.prot.
BR001	0,362 b	0,028 b	0,078 a
BR007	1,256 a	0,058 b	0,092 a
99100	0,699 b	0,058 b	0,077 a
Tx642	1,123 a	0,134 a	0,091 a

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A enzima ascorbato peroxidase (APX) está presente em quase todos os compartimentos celulares e apresenta importância fundamental nos cloroplastos onde a enzima Catalase (CAT) não está presente. Além disso, a APX e a CAT apresentam diferenças na remoção do H₂O₂ devido suas diferentes afinidades. Como a APX tem um K_m da ordem de μM e a CAT da ordem de mM, a APX atua mais na modulação refinada das EROs para a sinalização e a CAT na remoção do excesso de EROs gerado durante o estresse (MITTLER, 2002).

Pereira et al. (2010), ao estudarem a atividade enzimática e as modificações anatômicas em dezoito ciclos de seleção de milho para tolerância ao alagamento, observaram que a atividade enzimática da APX aumentou entre o primeiro e último ciclo, ao contrário do observado para atividade da CAT e POD. Madhusudhan et al. (2003) consideram que a APX tem uma maior eficiência para decompor H₂O₂, mesmo em menores proporções.

Djanaguiramana, Prasada e Seppanenb (2010), ao estudarem os efeitos do selênio em sorgo, na atividade de enzimas antioxidantes sob estresse de elevadas temperaturas, relatam que este estresse diminuiu a atividade das enzimas antioxidantes SOD, POX e CAT, além de reduzir o teor de clorofila e a taxa de fotossíntese. Nos tratamentos com selênio houve um aumento da

atividade das enzimas antioxidantes e diminuição das espécies reativas de oxigênio (ERO).

Chai et al. (2010) verificaram, em plantas submetidas a estresse salino, que a atividade da CAT, POD aumentou em brotos e raízes enquanto que a glutathione redutase (GR) diminuiu.

A ausência de atividade da POD nas condições desse experimento pode ser justificada pela eficiência das enzimas APX e CAT e pela localização dessas enzimas. Outro fator que pode ter contribuído é a presença de grandes quantidades de compostos fenólicos em sorgo que também atuam na defesa antioxidante. Kin et al. (2010), ao compararem *in vitro* a atividade antioxidante de extratos de sorgo, milho e painço, verificaram que o extrato de sorgo continha grande quantidade de compostos fenólicos, bem como um alto nível de atividade antioxidante em comparação com milho e painço.

Apenas para a enzima catalase (CAT) houve interação entre os genótipos e o manejo, sendo que, sob o manejo irrigado, não houve diferenças estatísticas entre as linhagens na atividade enzimática dessa enzima. Em condição de manejo estressado a maior atividade foi encontrada em Tx642 com uma atividade de 85,59% maior em relação a BR001. Além disso, Tx642 foi a única linhagem que apresentou aumento significativo na atividade enzimática da CAT sob estresse, quando comparada com a condição irrigada, sendo que esse aumento foi da ordem de 82.97%, Tabela 9.

Tabela 9 Atividade enzimática CAT em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	mM de H ₂ O ₂ .min ⁻¹ .mg.prot.	
	Irrigado	Estressado
BR001	0,022 aA	0,033 bA
BR007	0,039 aA	0,076 aA
99100	0,047 aA	0,069 bA
Tx642	0,039 aB	0,229 aA

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Existem muitos trabalhos publicados sobre estresse oxidativo e a atividade enzimática de limpeza de espécies reativas de oxigênio (EROs) em diversas culturas e nos mais variados tipos de estresse seja, ele biótico ou abiótico, porém pouco se sabe com relação à cultura do sorgo sob restrição hídrica em estádios reprodutivos.

O aumento significativo da atividade da CAT sob estresse hídrico na linhagem Tx642 mostra uma maior atividade dessa enzima no sistema de limpeza contra a ação das EROs, além de fornecer indícios de um eficiente mecanismo de tolerância à seca. Por outro lado, a maior atividade dessa enzima poderia denotar uma suscetibilidade estrutural maior à produção de (EROs).

Bian e Jiang (2009), ao investigarem a acumulação de espécies reativas de oxigênio e atividade das enzimas antioxidantes em *Poa pratensis* (L.) sob estresse hídrico, verificaram um aumento da atividade da APX em folhas e atividade da CAT na raiz. Em *Cleome spinosa* (C3) a expressão do gene para atividade da enzima CAT nos peroxissomos foi correlacionada à atividade da CAT, mas para *Cleome gynandra* (C4) não houve correlação aos 10 dias de restrição hídrica (UZILDAY et al., 2011), mesmo assim a restrição hídrica foi capaz de causar aumento na atividade das enzimas POD, CAT e APX.

A atividade enzimática no enchimento de grão, no presente estudo não foi avaliada, pois as plantas não resistiram à restrição hídrica imposta neste estágio fenológico.

3.3 Teor relativo de clorofila.

De todas as características avaliadas, o teor de clorofila foi a que apresentou diferenças estatísticas entre as linhagens, estádios e manejos, além de apresentar interação para todas essas características.

Sob irrigação, não houve diferenças entre as linhagens, porém, em condição de estresse hídrico, a linhagem Tx642 foi a que apresentou o menor teor de clorofila, com 29,41% menos quando comparada à 99100, que apresentou o maior teor de clorofila. Todas as linhagens apresentaram redução no teor de clorofila quando comparadas entre o manejo irrigado e estressado.

Tabela 10 Teor de clorofila, em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Teor de Clorofila	
	Irigado	Estressado
BR001	61,01 aA	44,99 aB
BR007	61,34 aA	44,07 aB
99100	57,66 aA	45,22 aB
Tx642	59,85 aA	31,92 bB

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O menor teor de clorofila foi encontrado nas linhagens 99100 e Tx642 sob irrigação e em Tx642 sob estresse esse menor teor pode indicar maior eficiência no uso da clorofila e uma economia com relação ao uso do nitrogênio. Porém é importante ressaltar que o desempenho fotossintético de genótipos não

depende apenas da quantidade de clorofila, mas da captura e transferência de energia luminosa e de sua conversão em energia química.

Mutava et al. (2011), com o objetivo de identificarem características fisiológicas em 300 raças diferentes de sorgo para tolerância à seca, encontraram grande diversidade fisiológica para o conteúdo de clorofila, sendo que as linhagens elites registraram alta dos maiores valores para o conteúdo relativo de clorofila de 57,8, quando comparado com os genótipos de Guiné, 55,5.

Elevadas temperaturas e condições de estresse hídrico reduzem o conteúdo de clorofila segundo (DJANAGUIRAMANA; PRASADA; SEPPANENB, 2010). Estudos realizados por Magalhães et al. (2009) para o teor relativo de clorofila em linhagens de milho contrastantes quanto a tolerância à seca, utilizando o clorofilômetro, não detectaram diferenças significativas entre as linhagens com e sem restrição hídrica, no entanto, a média dos ambientes revelou superioridade significativa do ambiente sem deficiência hídrica.

4 CONCLUSÃO

A linhagem tolerante à seca 99100 e Tx642 reúnem maiores atributos anatômicos e adaptações que lhes permitem suportar melhor a seca. A maior parte das modificações anatômicas ocorreu no primeiro feixe de maior diâmetro no mesofilo.

A linhagem Tx642 foi a única que apresentou aumento na espessura do limbo sob estresse, além de apresentar o maior número de estômatos, funcionalidade na epiderme das duas faces, abaxial e adaxial, e maior índice estomático na epiderme da face abaxial.

A elevada atividade enzimática da APX e CAT na linhagem Tx642 sugere maiores produções de EROs nessa espécie. Todas as linhagens de sorgo estudadas nesse trabalho sofreram redução no conteúdo relativo de clorofila sob estresse hídrico. O maior conteúdo relativo de clorofila não parece estar relacionado com a espessura do mesofilo.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, J. M.; ROCHA, J. F.; MACHADO, S. R. Bulliform cells in *Loudetiopsis chrysothrix* (Nees) Conert and *Tristachya leiostachya* Nees (Poaceae): structure in relation to function. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 51, p. 113-119, 2008.

BIAN, S.; JIANG, Y. Reactive oxygen species, antioxidant enzyme activities and gene expression patterns in leaves and roots of Kentucky bluegrass in response to drought stress and recovery. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 264-270, Apr. 2009.

BOR, M.; ÖZDEMİR, F.; TÜRKAN, I. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. **Plant Science**, Limerick, v. 164, p. 77-84, 2003.

BRODRIBB, T. J.; FIELD, T. S.; JORDAN, G. J. Leaf maximum photosynthetic rate and venation are linked by hydraulics. **Plant Physiology**, Washington, v.144, p. 1890-1898, 2007.

BRITO, C. J. F. A.; RODELLA, R. A.; DESCHAMPS, F. C. Anatomia quantitativa da folha e do colmo de *Brachiaria brizantha* (Hochst.ex A. Rich.) Stapf e *B. himidicola* (Rendle) Schweick. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 519-528, 2004.

CASTRO, E. M. et al. Aspectos anatômicos e fisiológicos de plantas de guaco submetidas a diferentes fotoperíodos. **Horticultura Brasileira**, Campinas, v. 23, p. 846-850, 2005.

CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.

CHAI, Y. Y. et al. Effects of exogenous spermine on sweet sorghum during germination under salinity, **Biologia Plantarum**, Praha, v. 54, n. 1, p. 145-148, Mar. 2010.

COCHARD, H. et al. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. **Plant Physiology**, Washington, v.128, p. 282-290, 2002.

DJANAGUIRAMANA, M.; PRASADA, P. V. V.; SEPPANENB, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 48, n.12, p. 999-1007, Dec. 2010.

EVANS, J. R. et al. The relationship between CO₂ transfer conductance and leaf anatomy in transgenic tobacco with a reduced content of Rubisco. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 21, n. 4, p. 475-479, 1994.

FERREIRA, D. F. **Manual do sistema Sisvar para análises estatísticas**. Lavras: UFLA/DEX, 2000. 66 p.

JENKS, M. A. et al. Chemically induced cuticle mutation affecting epidermal conductance to water vapor and disease susceptibility in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Physiology**, Washington, v. 105, p. 1239–1245, 1994.

KRAUS, J. E.; ARDUIM, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: Edur, 1997. 221 p.

MADHUSUDHAN, R. et al. Characterization of an ascorbate peroxidase in plastids of tobacco BY-2 cells. **Physiologia Plantarum**, Sweden, v. 117, p. 550-557, 2003.

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 3, p. 223-232, 2009.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7. n. 9, p. 601-639, September 2002.

MUTAVA, R. N. et al. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crops Research**, Warwick, v. 123, n. 1, p. 10-18, July 2011.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Epidermal conductance, stomatal density and stomatal size among genotypes of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Cell & Environment**, Oxford, v. 12, n. 4, p. 425-431, June 1989.

MELO, H. C. et al. Alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria anceps* Stapf ex Massey e *Paspalum paniculatum* L. sob condições de déficit hídrico. **Hoehnea**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 145-153, 2007.

PEREIRA, F. J. **Caracterização das modificações morfo-anatômicas e bioquímicas, em ciclos de seleção do milho saracura, para tolerância ao encharcamento do solo**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

PEREIRA, F. J. et al. Atividade do sistema antioxidante e desenvolvimento de aerênquima em raízes de milho 'Saracura'. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 450-456, maio 2010.

RISTIC, Z.; JENKS, M.A. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 159, n. 6, p. 645-651, 2002.

SACK, L.; HOLBROOK, N. M. Leaf hydraulics. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 57, p. 361-381, jun. 2006.

SOUZA, T. C. et al. Leaf plasticity in successive selection cycles of 'Saracura' maize in response to periodic soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 1, p. 16-24, Jan. 2010.

UZILDAY, B. et al. Comparison of ROS formation and antioxidant enzymes in *Cleome gynandra* (C4) and *Cleome spinosa* (C3) under drought stress. **Plant**

Science, Limerick, Apr. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945211000926#FCANote>>. Acesso em: 22 maio 2011.

CAPÍTULO 3

FOTOSSÍNTESE, DENSIDADE ESTOMÁTICA E PRODUTIVIDADE

RESUMO

O estresse hídrico na fase reprodutiva é um dos fatores mais limitantes da produtividade de culturas de sequeiro em áreas propensas à seca, principalmente em regiões com sazonalidade na distribuição das chuvas. Com o objetivo de melhor compreender os danos causados na fotossíntese e produtividade em sorgo, linhagens contrastantes para a tolerância à seca foram cultivadas em casa de vegetação e submetidas à condição de estresse hídrico por 10 dias. A imposição do estresse foi feita gradativamente até o potencial da água no solo atingir aproximadamente o valor de -100 kPa. O delineamento foi inteiramente casualizado DIC, em um fatorial 4:2:2, sendo quatro linhagens, duas tolerantes à seca: Tx642, 99100 e duas sensíveis: BR007 e BR001, dois estádios fenológicos: florescimento e enchimento de grãos e dois sistemas de manejo: irrigado e estressado, totalizando 16 tratamentos com 3 repetições representadas por um vaso cada, sendo que cada vaso continha duas plantas até o momento da coleta. As análises para fotossíntese e densidade estomática foram realizadas na folha bandeira após o término da imposição do estresse hídrico no período da manhã. Medidas instantâneas de trocas gasosas foram realizadas utilizando um IRGA modelo LI-6400. As Amostras do terço médio das folhas bandeiras foram fixadas em F.A.A₇₀, posteriormente foram submetidas aos procedimentos usuais em microtécnica vegetal para realização de secções paradermicas e cálculo da densidade estomática nas faces adaxial e abaxial. Após os grãos atingirem a maturidade fisiológica, foram avaliados o peso da panícula, peso seco da raiz, grão, da planta, peso de 100 grãos e índice de colheita. A fotossíntese, condutância estomática e a transpiração foram maiores no florescimento para as linhagens sensíveis à seca e maior no enchimento de grãos para linhagens tolerantes à seca. A linhagem 99100 apresentou maior atividade fotossintética, maior controle da transpiração, maior investimento no sistema radicular, que contribuíram para sua maior produtividade. As linhagens apresentam uma maior eficiência do uso da água no enchimento de grãos. Sob estresse hídrico, as linhagens no estágio de enchimento tiveram uma melhor eficiência de carboxilação. As linhagens de sorgo, no geral, apresentaram maiores perdas na produção de parte área no florescimento, sendo esse estágio o mais crítico para as linhagens estudadas.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*. Fotossíntese. Produtividade. EUA. Condutância estomática.

ABSTRACT

Water stress during the reproductive phase is one of the most limiting factors of productivity of rainfed crops in drought-prone areas, especially in areas with seasonal distribution of rainfall. In order to better understand the damage on photosynthesis and productivity in sorghum, lineages contrasting for drought tolerance, were grown in a greenhouse and subjected to water stress condition. The imposition of stress was done gradually until the soil water potential reaches a value of approximately -100 kPa. The design was completely randomized DIC in a 4x2x2 factorial, with four lineages, two drought-tolerant, Tx642, 99100 and two sensitive and BR 007 BR001, two phenological stages, flowering and grain filling and two management systems irrigated and stressed, totaling 16 treatments with three repetitions each represented by a pot, each pot had two plants to the point of collection. Analyses of photosynthesis and stomatal density were performed in the flag leaf after the imposition of water stress in the morning. Instantaneous gas exchange were measurements using a model LI-6400 IRGA. Samples of the middle third of the flag leaf were fixed in FAA₇₀, later submitted to the usual procedures in microtechniques to perform paradermic sections and calculation of stomatal density on abaxial and adaxial sides. After the grain reaches physiological maturity were evaluated panicle weight, root dry weight, grain, plant, 100 grain weight and harvest index. Photosynthesis, stomatal conductance and transpiration were higher in the flowering strains sensitive to drought and increased pod filling lineages tolerant to drought. The strain 99100 showed a higher photosynthetic activity, increased control, sweating, increased investment in root system, which contributed to its higher productivity. The strains have a greater efficiency of water use in grain filling. Under water stress lines filling the stadium had a better efficiency of carboxylation. The sorghum lines generally had higher losses in the production area in the flowering part, this is the most critical stage to the strains studied.

Keywords: *Sorghum bicolor*. Photosynthesis. Productivity. WUE. Stomatal conductance.

1 INTRODUÇÃO

O estresse hídrico na fase reprodutiva é um dos fatores mais limitantes da produtividade de culturas de sequeiro em áreas propensas à seca, principalmente em regiões com sazonalidade na distribuição das chuvas (KATO et al., 2008).

O déficit hídrico é definido como um desequilíbrio entre a disponibilidade de água no solo e a demanda evaporativa, capaz de reduzir a acumulação de carbono, a expansão de tecidos e o número de células. Cada um desses processos envolve um grande número de genes, enzimas, hormônios e metabólitos (TARDIEU et al., 2011).

Plantas submetidas ao estresse hídrico apresentam alterações em órgãos maduros provocadas pela redução do tamanho das células, resultante do equilíbrio entre a expansão do tecido e divisão celular, os efeitos dependem da intensidade da seca. Em monocotiledôneas, se um estresse ocorre durante a divisão celular, ele afeta o tamanho dos órgãos, folhas e comprimento radicular tanto nas fases de divisão celular quanto na fase de expansão, sendo a divisão celular mais afetada que a expansão (TARDIEU et al., 2011).

A quantidade de água usada por quantidade de CO₂ fixado é um parâmetro frequentemente usado para determinar a eficiência do uso da água (EUA). Existe uma interação delicada entre a atividade fotossintética e a concentração subestomática de CO₂. A atividade de abertura e fechamento dos estômatos na planta não está apenas determinada pela transpiração e uso da água.

Existe um equívoco de que é possível desenvolver plantas mais produtivas em condições de déficit hídrico pela seleção de genótipos com maior EUA o que nem sempre é sinônimo de resistência à seca e alta produtividade sob estresse hídrico. A produtividade depende da interação de vários fatores como

genótipo, manejo empregado na cultura, o controle de pragas e doenças e da fisiologia da planta (BLUM, 2009).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, no período de Julho a Outubro de 2010, na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas MG, localizada a 19° 28' de latitude S, longitude 44°15'08'' W e 732m de altitude. Foram utilizados vasos de 20 litros, nos quais foram semeados aproximadamente 10 grãos, tratados com Maxin e Gaucho, para controle fitossanitário.

Quando as plantas atingiram o estágio de V2 a V3, que corresponde a 2 e 3 folhas completamente expandidas respectivamente, foi feito um desbaste permanecendo apenas duas plantas por vaso. Foi utilizado como substrato um solo tipo Latossolo Vermelho Distrófico Típico, previamente corrigido com calcário e adubado com NPK+ Zinco, (8-28-16) na proporção de 50g para cada 100 Kg de solo, de acordo com a análise do solo, seguindo recomendação para a cultura no estado de Minas Gerais. Quando as plantas alcançaram o estágio de V8 a V12 foram feitas duas adubações de cobertura.

O teor de água no solo foi monitorado diariamente nos períodos da manhã e tarde (9:00 e 15:00 horas), com auxílio de um sensor de umidade modelo GBReader, N 1535 (Measurement Engineering Austrália), instalado nas parcelas experimentais a uma profundidade de 20 cm. A reposição hídrica através de irrigação foi realizada com base nas leituras obtidas com o sensor e a água repostada até a capacidade de campo (CC). Esses cálculos foram realizados com o auxílio de uma planilha eletrônica, feita em função da curva de retenção de água do solo.

Os tratamentos com estresse hídrico iniciaram quando 50% das plantas atingiram o estágio fenológico de florescimento e no enchimento de grãos, separadamente, com a duração de 10 dias, a indução do estresse hídrico foi realizada diariamente aplicando-se 50% da água total disponível, ou seja, até o potencial da água no solo atingir aproximadamente o valor de -100 kPa.

Os tratamentos foram realizados em fatorial 4x2x2 com quatro linhagens de sorgo contrastantes à seca, duas tolerantes: Tx642, 99100 e duas sensíveis: BR007, BR001, combinadas com dois estádios fenológicos de desenvolvimento (florescimento e enchimento de grãos) e dois manejos (irrigado e estressado) totalizando 48 vasos dispostos no delineamento inteiramente casualizado DIC.

Para realizar as avaliações de produtividade foram semeados 16 vasos a mais, sendo 4 vasos para cada linhagem, nos quais foram mantidas 2 plantas por vaso sob irrigação normal, até o momento das adubações de cobertura, que foram feitas nos estádios de V8 e V12. Após esse estágio foi mantida apenas uma planta por vaso para análises de produção.

2.1 Fotossíntese

As avaliações foram realizadas dez dias após a imposição do estresse hídrico a partir das 9 horas da manhã. Medidas instantâneas de trocas gasosas usando um IRGA modelo LI-6400 (Portable Photosynthesis System LICOR, Nebraska, USA). Todas as medidas foram feitas na folha bandeira.

Foram avaliadas a taxa de fotossíntese foliar (A), condutância estomática (Gs), transpiração foliar (T), eficiência do uso da água (EUA, A/T), eficiência de carboxilação (CE), a concentração interna de CO₂ e a relação carbono interno e carbono de referência (Ci/Cr). As medidas foram realizadas em uma área foliar de 6 cm², com um fluxo de ar na câmara de 1200 µmol s⁻¹ e uma intensidade de radiação fotossinteticamente ativa de 1.500 µmol m⁻² s⁻¹.

Para análise estatística dos dados foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. As variáveis analisadas foram transformadas para raiz de (x+1).

2.2 Densidade estomática

Conforme descrito no capítulo 2 item 2.1, para cada repetição foi montada uma lâmina, com aproximadamente 5 cortes de secções paradérmicas das faces abaxial e adaxial das folhas; medido-se a densidade estomática (número de estômatos/mm²).

As medidas foram feitas pelo programa de análise de imagens UTHSCSA ImageTool (University of Texas, San Antonio, USA), utilizando-se calibrações feitas com régua microscópica, fotografada nos mesmos aumentos das fotomicrografias.

Para análise estatística dos dados foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. As variáveis analisadas foram transformadas para log (x).

2.3 Produtividade

Após os grãos atingirem a maturidade fisiológica, foram avaliados o peso da panícula, da raiz, de grãos, da planta, peso de 100 grãos e índice de colheita (DURÃES et al., 2002).

O material vegetal foi separado, identificado, armazenado em sacos de papel e transportados para uma estufa de circulação forçada de ar a 70° C até a manutenção de massa constante para ser pesado.

Para análise estatística dos dados foi utilizada a análise de variância (ANAVA) e o teste de comparação de médias Skott-Knott, a 5% de probabilidade, no programa Sisvar versão 4.3 (FERREIRA, 2000). Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fotossíntese

A análise da fotossíntese, condutância estomática e transpiração apresentaram interação apenas para as linhagens e os estádios fenológicos. As características como carbono interno e a relação Carbono interno/Carbono de referencia apresentaram interação significativa para as linhagens e o manejo empregado.

Os maiores valores para fotossíntese, condutância estomática e transpiração no estágio fenológico de florescimento foram encontrados nas linhagens sensíveis à seca BR001 e BR007, enquanto que no enchimento de grãos os maiores valores desses atributos foram encontrados nas linhagens tolerantes à seca 99100 e Tx642. Para todas as linhagens a fotossíntese foi, em média, 59,39% maior no florescimento do que no enchimento de grãos, Tabela 1.

Tabela 1 Fotossíntese, condutância estomática e transpiração de linhagens de sorgo nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento

Linhagens	A ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Gs ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)		T ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	
	Flor	Ench	Flor	Ench	Flor	Ench
BR001	34,35 aA	9,65 bB	0,276 aA	0,052 bB	5,58 aA	1,02 bB
BR007	33,06 aA	10,19 bB	0,283 aA	0,052 bB	5,71 aA	0,99 bB
99100	24,78 bA	16,03 aB	0,239 bA	0,089 aB	4,85 bA	1,61 aB
Tx642	24,14 bA	11,35 bB	0,194 cA	0,067 bB	4,34 bA	1,22 bB

A – Taxa de fotossíntese foliar, Gs, Condutância estomática, T Transpiração. Flor – Florescimento, Ench. – Enchimento.

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

As linhagens sensíveis à seca BR001 e BR007 possuem juntas no florescimento, fotossíntese, condutância e transpiração, em média, 27,43%, 22,54% e 18,60% maior do que a média das linhagens tolerantes à seca Tx642 e 99100, respectivamente. No enchimento de grãos, Tx642 e 99100 possuem, juntas, fotossíntese, condutância e transpiração, em média, 27,53%, 33,0% e 28,97% maior do que a média das linhagens sensíveis à seca BR001 e BR007, respectivamente. No enchimento de grãos, 99100 foi a linhagem que teve a maior fotossíntese, condutância estomática e transpiração, Tabela 1.

Nas condições desse experimento, no enchimento de grãos, a condutância estomática foi menor do que no florescimento, conseqüentemente, a fotossíntese líquida também foi menor no enchimento.

O florescimento marca a passagem da planta do estágio vegetativo para o estágio reprodutivo, embora não tenha informações na literatura a respeito de diferenças entre atividade fotossintética nestes estádios fenológicos em sorgo. Supõe-se que a maior atividade fotossintética no florescimento seja para suprir as elevadas demandas energéticas da reprodução, enquanto que no enchimento de grãos a fotossíntese seja principalmente para “manutenção” da planta, visto que grande parte dos fotoassimilados produzidos durante o estágio vegetativo, armazenados no colmo, são nesse estágio translocados para os grãos.

Durães et al. (2005), ao estudarem parâmetros fisiológicos na caracterização de genótipos de milho no florescimento, encontraram uma maior capacidade fotossintética em genótipos com produção de fitomassa total aérea e de grãos. Cabe ressaltar que as maiores taxas fotossintéticas nem sempre estão relacionadas com elevada produtividade, que é resultado de uma série de fatores e as relações entre eles, como por exemplo, a relação fonte dreno, genética e condições ambientais.

Magalhães et al. (2009), também estudando os efeitos da restrição hídrica no florescimento em genótipos de milho em casa de vegetação, aos 7

dias após a restrição hídrica de -70KPa , observaram maior fotossíntese em ambientes sem estresse, porém maior condutância e maior transpiração quando comparados a condição de estresse. Em sorgo poucos são os trabalhos relacionados com a fotossíntese, condutância estomática e transpiração nos estádios de florescimento e enchimento.

Estudos recentes sobre Eficiência da transpiração TE (acúmulo de biomassa por unidade de água transpirada) relatam que existem consideráveis variações na eficiência de transpiração em genótipos de sorgo e acumulação de biomassa. Além disso, esse parâmetro pode ser fortemente influenciado por fatores ambientais, baixa concentração interna de CO_2 e capacidade fotossintética podendo variar de ano para ano, genótipo para genótipo (XIN; AIKEN; BURKE, 2009).

O conteúdo de água dentro da planta é resultado das taxas de absorção e perda de água. A absorção depende de vários fatores que vão desde a morfologia do sistema radicular, características físicas do solo e suprimento hídrico (PIMENTEL, 2004).

A transpiração é proporcional ao déficit de pressão de vapor de água na atmosfera e seu controle é feito pelo fechamento do poro estomático. Porém, o controle da transpiração está intimamente relacionado ao suprimento de CO_2 à folha, desse modo a condutância pode variar ao longo do tempo de forma a garantir o mínimo de perdas de água para uma máxima assimilação de CO_2 (KRAMER; BOYER, 1995 apud PIMENTEL, 2004, p. 42).

Oliveira, Fernandes e Rodrigues (2005), ao trabalharem com a condutância estomática como indicador de estresse hídrico, relatam que a condutância possui estreita relação com o estágio fenológico, temperatura e transpiração.

Plantas com menor condutância estomática possuem maior economia no uso da água. Assim é possível verificar na Tabela 1, que há uma maior demanda

de água no estágio fenológico de florescimento, devido a maior atividade fotossintética e transpiratória nesse estágio. A água perdida para a atmosfera pela transpiração é uma consequência inevitável da necessidade de assimilação do CO₂ atmosférico, pela fotossíntese, pois, quando a planta abre os estômatos para a aquisição do CO₂, ocorre a perda de água pela transpiração (HSIAO; XU, 2000).

As maiores perdas de água por transpiração coincidiram com os estágios de maior atividade fotossintética e foram encontradas nas linhagens sensíveis à seca. Taxas de transpiração muito elevadas podem causar murcha permanente e morte por desidratação pela transpiração excessiva (PIMENTEL, 2004).

É importante salientar que a transpiração tem efeitos benéficos como o resfriamento da folha, devido ao calor de vaporização da água, aceleração da ascensão da seiva do xilema e aumento na absorção de minerais. Os efeitos nocivos são de diversos tipos e intensidade podendo ocorrer desde injúrias até a morte por desidratação (PIMENTEL, 2004).

Gholipoora et al. (2010) ao investigarem as taxas de transpiração (TR) em ambientes saturados com alto déficit de pressão de vapor (VPD) em germoplasma de sorgo, dos vinte e seis genótipos estudados foram encontradas variações acentuadas em dezessete genótipos, com um ponto de interrupção na sua resposta a ambientes com VPD na faixa de 1,6 a 2,7 KPa, acima da qual houve pouco ou nenhum aumento na transpiração.

O estresse hídrico reduz as taxas de assimilação de CO₂ devido à redução da condutância estomática (ANJUM et al., 2011b). A ausência de água tem um impacto direto no aparato fotossintético, principalmente pelos desarranjos provocados na maior parte dos componentes fotossintéticos, incluindo o transporte de elétrons nos tilacóides e a fixação do CO₂ pela diminuição da funcionalidade estomática e peroxidação de lipídios e destruição de membrana (ANJUM et al., 2011b).

Anjum et al. (2011a), ao estudarem os efeitos do estresse hídrico na cultura do milho, verificaram diminuição considerável da fotossíntese (33,22%), uma queda na taxa de transpiração (37,84%) e redução da condutância estomática (25,54%), quando comparados ao controle irrigado.

O decréscimo da atividade fotossintética sob estresse hídrico está diretamente ligado ao mecanismo de fechamento estomático. Os estômatos são estruturas anatômicas pelas quais a água é perdida e CO₂ é absorvido. O fechamento do poro estomático é um dos primeiros sinais das respostas ao estresse hídrico que resulta no declínio da fotossíntese (ANJUM et al., 2011b).

Existem outros mecanismos não estomáticos que incluem mudanças na síntese de clorofila, mudanças funcionais e estruturais nos cloroplastos e distúrbios nos processos de acumulação, transporte e distribuição de fotoassimilados (ANJUM et al., 2011b).

Em milho o estresse hídrico pode provocar uma redução da eficiência do uso da água de 50,87%, quedas do CO₂ interno de 5,86%, em comparação com plantas irrigadas (ANJUM et al., 2011a).

Sob irrigação ou estresse hídrico não houve diferenças estatísticas entre as linhagens com relação ao carbono interno, exceto para a linhagem 99100 apresentou diferenças estatísticas entre os dois manejos com redução de 41,54% quando comparada à condição irrigada, Tabela 2.

O mesmo comportamento encontrado para a concentração de carbono interno foi verificado para a relação Ci/Cr, sendo a redução desta relação para a linhagem 99100 de 41,27% sob estresse hídrico, quando comparada sob irrigação Tabela 2.

Tabela 2 CO₂ interno e relação Carbono interno/ Carbono de referência (Ci/Cr) em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Linhagens	Carbono Interno (PPM)		Relação Ci/Cr (PPM)	
	Irigado	Estressado	Irigado	Estressado
BR001	102,93 aA	105,23 aA	0,271 aA	0,268 aA
BR007	92,49 aA	119,31 aA	0,262 aA	0,305 aA
99100	139,19 aA	81,37 aB	0,361 aA	0,212 aB
Tx642	139,19 aA	112,03 aA	0,281 aA	0,286 aA

Ci - Carbono interno, Ci/Cr – Ralação carbono interno/carbono de referencia. Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhaas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A assimilação do CO₂ é apenas um dos muitos fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento vegetal. A concentração do carbono interno (Ci) e a relação entre Ci/Cr é um parâmetro que pode predizer o status fotossintético do vegetal.

Para a eficiência do uso da água houve interação significativa apenas para os estádios fenológicos e os manejos adotados, irrigado e estressado. Sob irrigação e sob estresse hídrico, as linhagens apresentaram maior eficiência do uso da água no estágio fenológico de enchimento de grãos de 47,27% e de 30,68% sob manejo estressado. No florescimento, a maior eficiência do uso da água ocorreu sob estresse e no enchimento de grãos ocorreu sob irrigação, Tabela 3.

Não houve diferenças estatísticas para a eficiência de carboxilação (CE) para os estádios fenológicos sob irrigação. Sob condição de estresse, o estágio de florescimento apresentou uma maior CE do que o estágio de enchimento de grãos. Apenas para o enchimento de grãos houve redução significativa da eficiência de carboxilação de 45,16% sob estresse hídrico, quando comparado com o manejo irrigado Tabela 3.

Tabela 3 Eficiência do Uso da Água (EUA) e Eficiência de Carboxilação (CE) em linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado

Estádios	EUA		CE	
	Irrigado	Estressado	Irrigado	Estressado
Florescimento	5,33 bB	6,35 bA	0,21 aA	0,28 aA
Enchimento	10,11 aA	9,16 aB	0,31 aA	0,17 bB

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A eficiência no uso de água é de grande importância para a sobrevivência em condições de baixa disponibilidade, por ser um bom indicador para tolerância a falta de água. A maior EUA. das plantas não garante por si só maior adaptação à seca (PIMENTEL, 1998).

É importante ressaltar que além de existir uma variabilidade de E.U.A. entre espécies, isto ocorre também dentro da espécie e pode ser um parâmetro fisiológico associado a outros, como o índice de colheita (IC), profundidade do sistema radicular, os quais fornecem subsídios de grande importância a serem usados no melhoramento vegetal tropical.

As maiores taxas fotossintéticas e a maior transpiração encontradas no florescimento, contribuíram de forma direta para que a EUA fosse menor no florescimento do que no enchimento de grãos, uma vez que a EUA é produto da razão fotossíntese pela transpiração.

No enchimento de grãos a menor fotossíntese em relação ao florescimento foi compensada pela menor transpiração em função da baixa disponibilidade de água para, o que contribuiu para uma maior EUA no enchimento de grãos.

A eficiência de carboxilação (CE), ou seja, a velocidade com que o CO₂ fixado é processado é limitada, principalmente, pela quantidade e atividade

enzimática e pela disponibilidade de CO₂, além de ser influenciada por vários outros fatores como a temperatura, grau de hidratação do protoplasma, suprimento de substâncias minerais (especialmente fosfato) e grau de desenvolvimento e atividade da planta. Os fito-hormônios, como o ácido abscísico que regula o fluxo iônico, também intervêm na eficiência de carboxilação.

A redução significativa da eficiência da carboxilação (CE) no enchimento de grãos, quando comparada entre os manejos sem restrição e com restrição hídrica, é um grande indício de que a dependência de água nos processos de carboxilação é maior no enchimento do que no florescimento.

3.2 Densidade estomática

Não houve interações significativas entre os genótipos e o manejo ou entre genótipo e estágio fenológico. Porém, as linhagens avaliadas apresentaram diferenças estatísticas entre si quanto à densidade estomática, sendo a Tx642 a que apresentou maior densidade de estômatos na epiderme da face abaxial, com 37,96% mais estômatos que BR001, a qual resultou na menor densidade estomática. Na face adaxial as linhagens tolerantes à seca, 99100 e Tx642, respectivamente, apresentaram maior densidade estomática do que as linhagens BR007 e BR001, Tabela 4 e Figura 1.

Tabela 4 Densidade estomática de linhagens de sorgo

Linhagens	Número de Estômatos por mm ²	
	Epiderme da Face Abaxial	Epiderme da Face Adaxial
BR001	67,00 c	49,00 b
BR007	79,00 b	50,00 b
99100	83,00 b	72,00 a
Tx642	108,00 a	66,00 a

Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

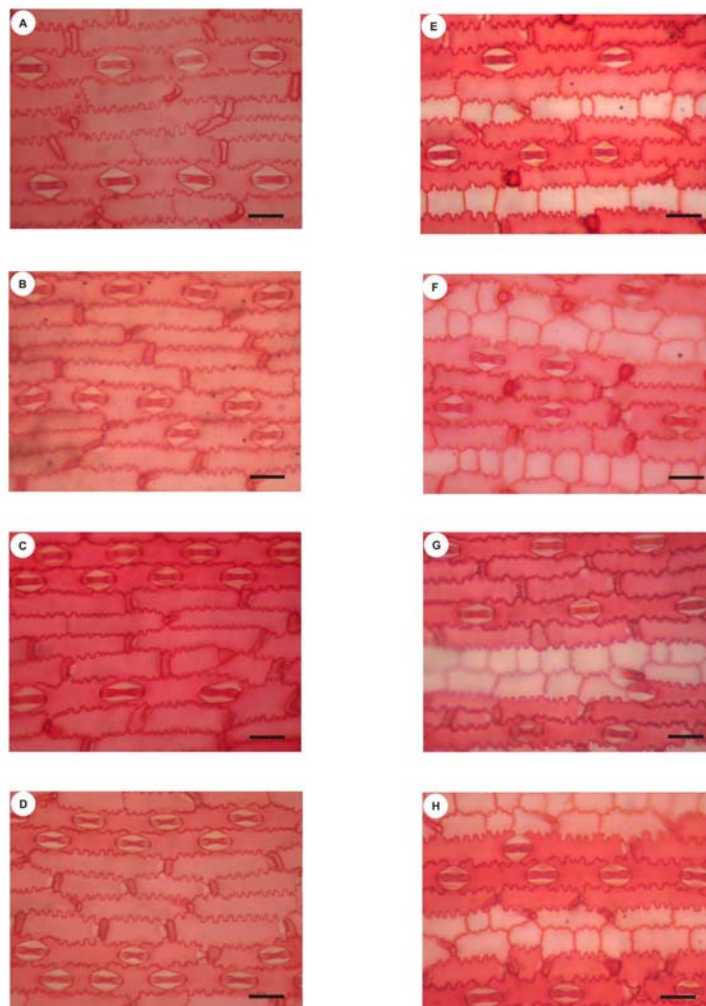


Figura 1 Fotomicrografia de secções paradérmicas do limbo foliar de linhagens de sorgo da epiderme da face abaxial em: (A) BR001, (B) BR007, (C) 99100, (D) Tx642 e da epiderme da face adaxial em: (E) BR001, (F) BR007, (G) 99100, (H) Tx642. Barras 50 μ m.

Muchow e Sinclair (1989), ao estudarem a perda de água pela condutância epidérmica em linhagens de sorgo, relatam que a condutância

epidérmica está relacionada com o aumento da densidade estomática. Isso significa que a densidade estomática desempenha papel direto na perda de água mesmo em condutâncias muito baixas.

Uma vez que a baixa condutância epidérmica está diretamente relacionada à sobrevivência de culturas sob déficit hídrico severo, Muchow e Sinclair (1989) recomendam a seleção de genótipos pela condutância epidérmica e densidade estomática.

3.3 Produtividade

As linhagens tolerantes à seca, Tx642 e 99100 apresentaram maior peso seco de raiz, sendo o peso da Tx642, 61,04% maior em relação ao peso da BR007 que, dentre as linhagens sensíveis à seca, apresentou o menor peso seco. As linhagens tolerantes à seca possuem, em média, 52,95% mais massa seca de raiz do que as linhagens sensíveis. Não houve interação entre as linhagens e o manejo para o peso seco de raiz, Tabela 5.

Na ausência de estresse hídrico, as linhagens tolerantes à seca Tx642 e 99100 apresentaram o maior peso seco de panícula em relação às linhagens BR001 e BR007; sendo o peso seco da linhagem 99100 65,31% maior que a linhagem BR001, a qual resultou no menor peso seco de panícula sob irrigação, Tabela 5.

Na condição de estresse hídrico no estágio fenológico de florescimento a linhagem tolerante à seca, 99100 apresentou o maior peso seco de panícula. A linhagem Tx642 apresentou o menor peso seco de panícula, com uma redução de 64,79% do peso seco em relação à sua testemunha irrigada e 67,95% em relação à linhagem 99100 sob estresse no florescimento, Tabela 5.

A análise estatística para o peso seco da planta, excluindo a panícula e os grãos, não houve diferenças estatísticas entre as linhagens sob irrigação e sob

condição de estresse no enchimento de grãos. Quando submetidas a estresse hídrico no florescimento, as linhagens tolerantes Tx642 e 99100 apresentaram maior peso seco de planta do que as linhagens sensíveis à seca, sendo o peso seco da linhagem Tx642 52,94% maior em relação ao peso seco da linhagem BR001, Tabela 5.

A análise de cada linhagem dentro dos diferentes manejos revela que as linhagens tolerantes Tx642 e 99100 apresentaram as maiores médias sob estresse no estágio de florescimento, sendo o estresse no enchimento de grãos mais drástico na redução do peso de plantas.

A linhagem BR007 teve um desempenho próximo ao das linhagens tolerantes à seca, embora não tenha apresentado diferenças estatísticas entre a condição irrigada e sob estresse hídrico no florescimento para o peso seco de panícula, essa linhagem apresentou redução significativa do peso de planta quando submetida ao estresse no enchimento de grãos. A linhagem BR001 não apresentou diferenças estatísticas entre os três manejos tanto para o peso seco da panícula, quanto para o peso seco da planta, Tabela 5.

Tabela 5 Peso seco médio de raiz, panícula (sem grãos) e de plantas de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento de grãos

Linhagens	PS Raiz	PS de Panícula (g)			PS de Planta (g)		
		Irrigado	Estr. Flor	Estr. Ench	Irrigado	Estr. Flor	Estr. Ench
BR001	4,68 b	2,73 cA	3,44 bA	4,38 aA	19,57 aA	20,83 cA	20,82 aA
BR007	3,46 b	5,14 bA	4,46 bA	5,31 aA	24,53 aA	29,98 bA	11,31 aB
99100	8,43 a	7,87 aA	7,80 aA	6,17 aA	22,60 aB	37,88 aA	17,37 aB
Tx642	8,88 a	7,10 aA	2,50 bA	5,36 aA	30,07 aB	44,26 aA	20,97 aB

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O peso seco de órgãos vegetativos, raiz, caule, folhas e de estruturas reprodutivas como a panícula, são indicativos de como a planta investe em sua estrutura, o que nos dá uma noção da partição de assimilados para os diferentes órgãos. Em torno de 40% do que é produzido pela fotossíntese é exportado para o as raízes, 59% é gasto com a respiração e apenas 1% vai para os grãos (PIMENTEL, 1998).

Geralmente, variedades de sorgo tolerantes à seca têm mais biomassa radicular e maior volume de raízes e também maior proporção raiz/caule que os materiais susceptíveis à seca (MAGALHÃES et al., 2003).

Plantas eficientes em suportar estádios de restrição hídrica devem possuir atributos como um eficiente sistema radicular na absorção de água, área foliar relativamente pequena, alta capacidade fotossintética, baixa perda de água por transpiração e eficiência na translocação dos fotoassimilados para frutos (PIMENTEL, 1998).

De um modo geral, as linhagens tolerantes à seca apresentaram maior peso seco de raiz e planta, mostrando um grande investimento em estruturas “não reprodutivas”. Diferenças no potencial de produção de biomassa podem ser explicadas pela variabilidade de rendimento de matéria seca observada em genótipos de sorgo, sob condições de estresse hídrico (HABYARIMANA et al., 2004).

As diferenças entre os padrões de enraizamento em duas cultivares de sorgo contrastantes para a tolerância à seca foram estudadas em caixas por Tsuji et al. (2005). Os autores relatam que a cultivar tolerante apresentou características favoráveis à tolerância à seca, como elevada matéria seca, elevado potencial hídrico foliar, alta extração de água em elevadas profundidades, maior comprimento de raiz e maior densidade de raiz nas camadas mais profundas (1,1-1,5m) do que cultivar sensível à seca.

O acúmulo de matéria seca nos órgãos reprodutivos é de grande interesse econômico, trata-se de um processo controlado pela troca de metabólitos entre os tecidos fornecedores de fotoassimilados (a fonte) e o órgão que recebe os fotoassimilados produzidos (o dreno) (PIMENTEL, 1998).

Os grãos são drenos de reserva irreversíveis que recebem os fotoassimilados das folhas, fonte e do colmo, drenos temporários. O peso seco de um vegetal nada mais é do que o acúmulo de carbono na forma de carboidratos, proteínas e lipídios, para assegurar o suprimento de carbono e energia química para o crescimento e reprodução ou para manutenção, à noite ou em condições de estresse (PIMENTEL, 1998).

No florescimento, a linhagem tolerante à seca 99100 foi a linhagem com maior média de peso seco de grãos, 87,86% a mais do que a linhagem Tx642, que apresentou o menor peso seco de grãos e 51,31% a mais que a média das linhagens sensíveis à seca.

Apenas as linhagens tolerantes à seca apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os diferentes manejos. A linhagem 99100 reduziu o peso seco de grãos apenas quando submetida a estresse hídrico no enchimento de grãos, com redução de 48,63% quando comparada com o manejo irrigado. A linhagem Tx642 reduziu seu peso seco de grãos de 82,21% no florescimento e 61,88% no enchimento de grãos quando comparada ao manejo irrigado. Sob irrigação, não houve diferenças estatísticas entre as linhagens analisadas, Tabela 6.

Sob estresse hídrico no estágio fenológico de florescimento a linhagem Tx642 apresentou o menor índice de colheita, já sob estresse hídrico no estágio de enchimento de grãos, BR007 foi a linhagem que apresentou o maior índice de colheita enquanto as demais linhagens não diferiram estatisticamente entre si. Apenas a linhagem Tx642 apresentou mudanças significativas com a imposição

de estresse hídrico no florescimento e enchimento com redução do índice de colheita para ambos, sendo a redução maior no florescimento, Tabela 6.

Tabela 6 Peso seco médio de grãos e Índice de Colheita (IC) de linhagens de sorgo sob manejo irrigado e estressado nos estádios fenológicos de florescimento e enchimento de grãos

Linhagens	PS de Grãos (g)			Índice de Colheita (IC)		
	Irrigado	Estr. Flor	Estr. Ench	Irrigado	Estr. Flor	Estr. Ench
BR001	24,93 aA	24,94 bA	19,80 aA	0,47 aA	0,46 aA	0,40 aA
BR007	26,11 aA	26,23 bA	20,70 aA	0,40 aA	0,41 aA	0,51 aA
99100	40,74 aA	52,55 aA	20,93 aB	0,50 aA	0,48 aA	0,37 aA
Tx642	35,86 aA	6,38 cB	13,67 aB	0,47 aA	0,10 bC	0,26 bB

Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Genótipos com alta produtividade são aqueles que têm sucesso na maximização da interceptação e conversão da energia solar pela folhas, sem um excessivo investimento em matéria seca vegetativa não colhida, associado ao acúmulo de carboidratos nos órgãos colhidos (SCHRADER, 1985 apud PIMENTEL, 1998, p. 121).

As diferenças no peso seco de grãos apenas no estágio de enchimento sugerem que as linhagens tolerantes 99100 e sensíveis BR001 e BR007 são diferentes quanto a tolerância a seca apenas no estágio de florescimento, sendo 99100 em relação as demais mais tolerante a seca no florescimento. No enchimento essas linhagens não apresentam diferenças significativas, o que reforça a hipótese de que para as linhagens estudadas nesse trabalho, o estresse no florescimento possui efeito mais drástico na redução da produtividade. Já a linhagem Tx642 classificada como tolerante a seca, nas condições de casa-de-vegetação apresentou desempenho menor que as linhagens sensíveis a seca.

Um fato importante que deve ser considerado é as condições desse experimento, a limitação do sistema radicular no vaso, pode ter influenciado nas

respostas a seca, visto que as linhagens tolerantes a seca apresentaram maior peso seco de raiz, o que sugere que em capo essas biomassa poderia explorar maiores profundidades e retirar água das camadas mais úmidas do solo.

O índice de colheita é uma razão entre a fração de grãos e a matéria seca total da planta (DURÃES et al., 2002), quanto maior o índice maior a partição para os grãos em relação aos órgãos vegetativos.

Os maiores índices de colheita sob estresse hídrico encontrados nas linhagens 99100 e BR001 e BR007 podem ser explicados pela melhor relação fonte/dreno nessas linhagens. Apesar de serem linhagens diferentes quanto à tolerância à seca, essas linhagens tiveram desempenhos semelhantes. As linhagens sensíveis a seca apresentaram maior fotossíntese no estágio de florescimento, baixo investimento em órgãos vegetativos (peso seco de planta e raiz) o que, conseqüentemente, contribuiu para que os índices de colheita fossem próximos aos encontrados na linhagem tolerante a seca, 99100.

A linhagem 99100 apresentou fotossíntese maior no enchimento de grãos e os maiores valores de peso seco de grãos, o que compensou o investimento em órgãos vegetativos (peso seco de raiz e planta). As duas estratégias citadas anteriormente demonstram formas diferentes de atingir os mesmos resultados.

Outro fator importante a ser considerado é o processo de partição de carbono para o dreno, afetado por fatores ambientais, nesse caso, pela restrição hídrica. Por isso quanto maior for o período de enchimento do dreno, maiores as possibilidades de manter o crescimento de pelo menos alguns drenos e, conseqüentemente, a produção (PIMENTEL, 1998).

Mutava et al. (2011), ao estudarem tolerância a seca em 300 genótipos de sorgo de diferentes raças no mundo, verificaram que o índice de colheita de grãos e os número de grãos foram afetados negativamente pela limitação de

umidade para todas as raças. No geral, houve uma grande variabilidade de características fisiológicas e rendimento, dentro e entre os genótipos.

4 CONCLUSÃO

A linhagem 99100 apresentou maior atividade fotossintética, maior controle da transpiração, maior investimento no sistema radicular, que contribuíram para sua maior produtividade.

As linhagens apresentam uma maior eficiência do uso da água no enchimento de grãos. Sob estresse hídrico, as linhagens no estágio de enchimento tiveram uma melhor eficiência de carboxilação. As linhagens de sorgo, no geral, apresentaram maiores perdas na produção de parte aérea no florescimento, sendo esse estágio o mais crítico nas condições desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ANJUM, S. A. et al. Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Main Street, v.197, n. 3, p. 177-185, Jan. 2011a.

ANJUM, S. A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, May 2011b.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVIERA, A. C. de. Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.1, n.1, p.33-40. 2002.

DURÃES, F. O. M. et al. Caracterização fenotípica de linhagens de milho quanto ao rendimento e à eficiência fotossintética. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 3, p. 355-361, 2005.

GHOLIPOORA, M. et al. Genetic variability of transpiration response to vapor pressure deficit among sorghum genotypes. **Field Crops Research**, Warwick, v. 119, p. 85–90, 2010.

HABYARIMANA, E. et al. Performances of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region. **Industrial Crops and Products**, St Martin d'Herès, v. 20, n. 1, p. 23-28, July 2004.

HSIAO, T. C.; XU, L. K. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 5, n. 350, p. 1595- 1616, Sept. 2000

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Comunicado Técnico, 86).

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 3, p. 223-232, 2009.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Epidermal conductance, stomatal density and stomatal size among genotypes of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Plant Cell & Environment**, Oxford, v. 12, n. 4, p. 425-431, June 1989.

MUTAVA, R. N. et al. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crops Research**, Warwick, v. 123, n. 1, p. 10-18, July 2011.

OLIVEIRA, A. D. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. D. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 86-95, jan./abr. 2005.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191 p.

PIMENTEL, C. **Metabolismo do carbono na agricultura tropical**. 9. ed. Seropédica: Edur, 1998. 150 p.

TSUJI, W. et al. Development and distribution of root system in two grain sorghum cultivars originated from Sudan under drought stress. **Plant Production Science**, Saitama, n. 8, v. 5, p. 553-562, Jul. 2005.

XIN, Z.; AIKEN, R.; BURKE, J. Genetic diversity of transpiration efficiency in sorghum. **Field Crops Research**, Warwick, v. 111, p. 74-80, Oct. 2009.