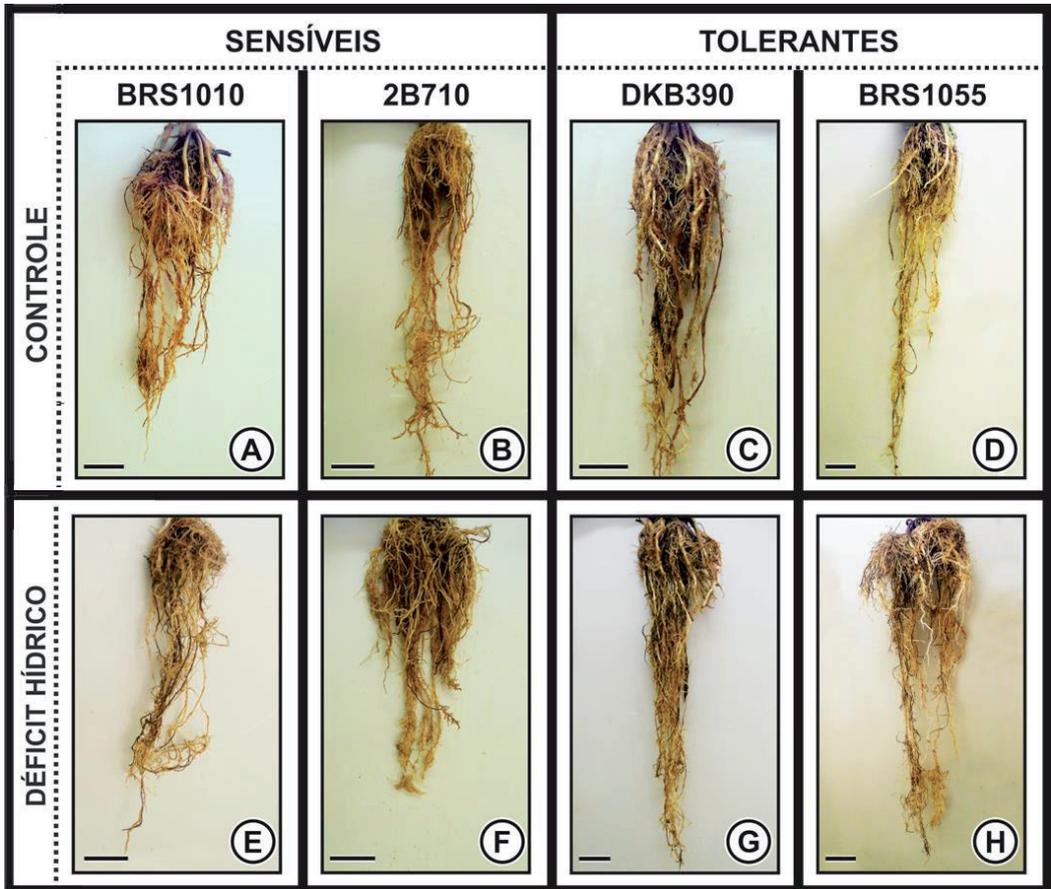


Caracterização do Sistema Radicular e dos Componentes da Produtividade em Quatro Genótipos de Milho Cultivados sob Déficit Hídrico



ISSN 1679-0154
Dezembro, 2014

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 111

Caracterização do Sistema Radicular e dos Componentes da Produtividade em Quatro Genótipos de Milho Cultivados sob Déficit Hídrico

Paulo César Magalhães
Alyne Oliveira Lavinsky
Roniel Geraldo Ávila
Junia Clarissa Alves
Mariana Diniz Melo
Carlos César Gomes Júnior
Heverton Fernando Melo

Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2014

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45

Caixa Postal 151

CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Fone: (31) 3027-1100

Fax: (31) 3027-1188

Home page: www.cnpms.embrapa.br

E-mail: cnpms.sac@embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Sidney Netto Parentoni

Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau

Membros: Antonio Claudio da Silva Barros, Dagma Dionísia da Silva, Maria Marta Pastina, Monica Matoso Campanha, Paulo Eduardo de Aquino Ribeiro e Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro

Tratamento de ilustrações: Tânia Mara Assunção Barbosa

Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa

Foto(s) da capa: Alyne Oliveira Lavinsky

1ª edição

1ª impressão (2014): on line

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Milho e Sorgo

Caracterização do sistema radicular e dos componentes da

produtividade em quatro genótipos de milho cultivados

sob déficit hídrico / Paulo César Magalhães... [et al.]. -- Sete

Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2014.

25 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1619-0154; 111).

1. *Zea mays*. 2. Raiz. 3. Deficiência hídrica. I. Magalhães, Paulo César. II. Série.

CDD 633.15 (21. ed.)

Sumário

Resumo	4
Abstract	6
Introdução	7
Metodologia	9
Resultados e Discussão	12
Conclusões	21
Referências	22

Caracterização do Sistema Radicular e dos Componentes da Produtividade em Quatro Genótipos de Milho Cultivados sob Déficit Hídrico

*Paulo César Magalhães¹
Alyne Oliveira Lavinsky²
Roniel Geraldo Ávila³
Junia Clarissa Alves⁴
Mariana Diniz Melo⁵
Carlos César Gomes Júnior⁵
Heverton Fernando Melo⁶*

Resumo

Nesse trabalho foram combinadas avaliações de parâmetros agronômicos com morfometria de raízes usando o programa *WinRhizo*, a fim de detectar características no sistema radicular que permitam a manutenção da produtividade em quatro materiais genéticos de milho (BRS1010, 2B710, DKB390 e BRS1055), cultivados em dois níveis de água no solo (CC- capacidade de campo, e DH- déficit hídrico). Plantas oriundas dos genótipos DKB390 e BRS1055 sob DH mantiveram valores de produção de grão similares aos de seus respectivos

1PhD Fisiologia da Produção, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.
E mail: paulo.magalhaes@embrapa.br

²D.Sc Fisiologia Vegetal, Bolsista de Pós-doutorado Fapemig.
E-mail alynelavinsky@gmail.com

³Mestrando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras.
E-mail: ronielgeraldo@yahoo.com.br

⁴Bolsista Bic Junior Embrapa Milho e Sorgo. E-mail:
juniacrisaalves@gmail.com

⁵Graduandos em Agronomia, UFSJ. Emails: marianamelodiniz@yahoo.com.br,
juninhoiam@yahoo.com.br

⁶Graduando em Agronomia, Universidade de Santa Catarina.
Email: hevertonfernando@gmail.com

controles, sob CC. Por sua vez, plantas oriundas dos genótipos 2B710 e BRS1010 apresentaram perdas substanciais na produção de grãos com a imposição do DH. Cabe ressaltar que plantas oriundas do genótipo BRS 1055 apresentaram estratégia abaixo do solo de evitação à seca, por aumentarem a área superficial de raízes finas e muito finas, sendo esse um ponto de divergência em relação ao também tolerante genótipo DKB 390.

Palavras-chave: *WinRhizo*, fenotipagem, fotoassimilados, índice de colheita, raízes

Characterization of Root System and Productivity Components in Four Maize Genotypes Grown under Water Deficit

Paulo César Magalhães¹

Alyne Oliveira Lavinsky²

Roniel Geraldo Ávila³

Junia Clarissa Alves⁴

Mariana Diniz Melo⁵

Carlos César Gomes Júnior⁵

Heverton Fernando Melo⁶

Abstract

The present study combined evaluations of agronomic parameters with root morphology using *WinRhizo* software, in order to detect features in the root system which allow the maintenance of productivity in four maize genotypes (BRS1010, 2B710, DKB390 e BRS1055), cultivated under two soil water levels (FC- Field capacity, WD-water deficit). Plants originated from DKB 390 and BRS1055 genotypes maintained grain yield values similar to their counterparts, under FC. On the contrary, significant yield losses were verified in plants originated from BRS1010 and 2B710 at the same condition. It should be noted that plants originated from the genotype BRS1055 diverts from DKB390 by presenting a strategy for avoiding drought producing fine and very fine roots.

Key-words: *WinRhizo*, phenotypic characterization, photoassimilate, harvest index, roots

Introdução

A ameaça das mudanças climáticas globais tem causado preocupação na agricultura, uma vez que fatores climáticos indispensáveis para o desenvolvimento dos cultivos agrícolas serão severamente afetados e certamente comprometerão a produção e a qualidade alimentar (IPCC, 2007). Uma vez que a maioria dos cultivos é produzida em regiões tropicais, caracterizadas por baixa disponibilidade hídrica, existindo ainda previsões de estações secas mais frequentes e severas (EASTERLING et al., 2007; TUBIELLO; FISCHER, 2007), pesquisas que identifiquem as necessidades adaptativas prioritárias para investimento na agricultura tornam-se relevantes (LOBELL et al., 2008), até mesmo porque, nessas regiões, vivem muitas famílias que dependem da agricultura como único meio de sobrevivência (HAILE, 2005). Tais adaptações permitirão atenuar a gravidade dos impactos previstos sobre a produção de cultivos em regiões tropicais, dentre as quais o milho (*Zea mays* L.).

O milho é um cereal básico para alimentação de humanos e para ração de animais, e a forte estiagem que assola o Brasil tem prejudicado a produção e o abastecimento desse cereal, afetando, principalmente, criadores rurais e agroindústrias de pequeno porte no Nordeste, que utilizam o milho na ração animal (GLOBO RURAL, 2013). Em milho, os principais alvos de seleção visando o aumento de produtividade incluem *stay green*, intervalo entre os florescimentos feminino e masculino e o número de espigas por planta, que são características vantajosas sob déficit hídrico (DH). Desse modo, pesquisas para a caracterização fenotípica e de produtividade dos materiais genéticos de milho sob DH são os passos iniciais

para a elucidação dos possíveis mecanismos fisiológicos responsáveis pelo comportamento diferencial de alguns genótipos de milho nessa condição (DURÃES et al., 2002), por fornecerem subsídios para seleção utilizando características que conferem tolerância à seca especificamente. Nesse contexto, a busca de novos descritores, que reflitam a produtividade, a exemplo da caracterização de raízes via o *software* “WinRhizo” (MAGALHÃES et al., 2011), torna-se de crucial importância.

Segundo a teoria do equilíbrio funcional (BROUWER, 1962), plantas aumentariam a alocação de biomassa para a parte aérea se o ganho de carbono for afetado por recursos limitantes acima do solo, como luz e CO₂. Da mesma forma, as plantas aumentariam a alocação de biomassa para as raízes quando submetidas a baixos níveis de recursos abaixo do solo, como exemplo, água e nutrientes (POORTER; NAGEL, 2000). Apesar da flexibilidade de alocação de biomassa para esse órgão de captura e armazenamento de recursos constituírem pontos-chave na coordenação das modificações fisiológicas de plantas em ambientes com baixa disponibilidade de água no solo (DAVIES; ZHANG, 1991), pouco se sabe sobre tal relação (FORT et al., 2012). Isso porque a relação entre a alocação de carbono e os traços de economia hídrica tem sido estudada principalmente em órgãos localizados acima do solo, com particular ênfase para as folhas.

Cientes de que sob DH as estratégias adaptativas em órgãos localizados abaixo do solo sobrepõem aquelas em órgãos localizados acima (FORT et al., 2012), existindo ainda variações nos diferentes traços de uma mesma espécie (LIU et al., 2010), um maior investimento em sistema radicular possivelmente ampliaria a captura de água no solo com

reflexos na manutenção da produtividade. Nesse trabalho, foram combinadas avaliações de parâmetros agrônômicos com morfometria de raízes usando o programa *WinRhizo*, a fim de detectar características no sistema radicular que permitam a manutenção da produtividade em quatro genótipos de milho sob DH.

Metodologia

Condições de Cultivo, Material Vegetal e Desenho Experimental

O experimento foi conduzido em condição de casa de vegetação na Embrapa Milho e Sorgo (19°28' S, 44°15'08" W, 732 m de altitude), e o material vegetal consistiu em quatro híbridos de milho contrastantes para tolerância à seca, sendo dois tolerantes (DKB 390 e P30F53) e dois sensíveis (BRS 1030 e 2B710).

As plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade de 20 L, contendo Latossolo Vermelho Distrófico Típico. O teor de água no solo foi monitorado diariamente entre 09h00 e 15h00, com auxílio de sensores de umidade modelo GB Reader N1535 (Measurement Engineering, Austrália) instalados no centro de cada parcela, com auxílio de um trado de rosca, a uma profundidade de 20 cm. Esses sensores detectam a tensão de água no solo com base na resistência elétrica e são acoplados a medidores digitais. 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 durante o período que antecedeu a imposição dos tratamentos. Os cálculos de reposição de água foram realizados com o auxílio

de uma planilha eletrônica, feita em função da curva de retenção de água do solo. Em paralelo, foram realizados todos os tratamentos culturais e fitossanitários necessários. A unidade experimental foi composta pelo vaso, contendo duas plantas, e seis repetições por tratamento.

Ao atingir o estágio de pré-florescimento, a metade de cada tratamento inicial foi submetida ao déficit hídrico (DH); a outra metade continuou recebendo irrigação diariamente, a fim de manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo (CC), com tensão de água no solo de -18 kPa. A exposição ao DH se deu pelo fornecimento diário de 50% da água total disponível até a tensão de água no solo atingir, no mínimo, -138 kPa. Após doze dias nessa condição, o potencial hídrico foliar foi determinado com uma bomba de pressão tipo Scholander ao meio dia (Ψ_{md}), e em seguida o fornecimento de água foi restabelecido, mantendo-se em níveis ótimos até o final do ciclo. Na maturidade fisiológica, foram analisados os parâmetros agronômicos associados com a produtividade, conforme metodologia a ser detalhada na seção “parâmetros agronômicos”.

Foram aplicados testes estatísticos preliminares para adequação dos resultados à análise da variância (ANOVA). O teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade foi utilizado para testar todo e qualquer contraste.

Parâmetros Agronômicos

Foram quantificados os números de folhas, de espigas, a área foliar e, com o auxílio de uma régua graduada e/ou paquímetro, a altura da planta e de inserção da espiga, bem

como o diâmetro e o comprimento da espiga. A área foliar foi mensurada com um medidor de área (Li-Cor Inc.). Em seguida, as plantas foram particionadas em raiz, colmo, folhas, pendão, espigas (sabugo, palhada e grãos), e submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C, durante 72 h. Com base no valor de biomassa seca obtido para cada uma das diferentes partes, foi estimado o índice de colheita (DURÃES et al., 2002). Em paralelo, análises em nível de espiga, tais como número de grãos por espiga e o peso de 100 grãos, foram estimadas.

Adicionalmente, um grupo de 50 grãos de três repetições por tratamento foi submetido à caracterização morfométrica, mensurando-se as dimensões dos grãos (comprimento, largura e espessura) com auxílio de um paquímetro digital. Posteriormente, os grãos foram embebidos *overnight* em amolecedor etilenodiamina (10%, *p/v*) e cortados longitudinalmente com navalha para se avaliarem possíveis mudanças no tamanho do embrião, a depender dos tratamentos. Fotografias foram obtidas a partir de uma câmara fotográfica acoplada a um microscópio estereoscópico tipo lupa, utilizando-se o programa *ImageJ* para calcular a relação entre as áreas do endosperma e do embrião.

Para as avaliações do sistema radicular, foi utilizado o sistema informatizado WinRhizo Pro 2007a (Régent Instr. Inc.), sendo mensurados comprimento, diâmetro, volume e área de superfície de raízes por classe de diâmetro, descritos a seguir: raízes muito finas (\emptyset inferior a 0,5 mm), raízes finas ($> 0,5 \emptyset < 2,0$ mm) e raízes grossas ($\emptyset > 2,0$ mm) (MAGALHÃES et al., 2011). Para essa análise, foram coletadas raízes em três repetições por tratamento.

Resultados e Discussão

Ao final do período de imposição do estresse, todos os genótipos de milho avaliados sob déficit hídrico (DH) exibiram, em relação àqueles que tiveram a umidade do solo mantida próxima à capacidade de campo (CC), valores mais negativos de potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}) (Figura 1).

Entretanto, não foi possível distinguir genótipos sensíveis e tolerantes com base nessa variável. Ao avaliarem o Ψ_{md} ao final do período de imposição do estresse em genótipos de milho cultivados em condição de campo sob DH, Vitale et al. (2007) e Souza et al. (2013) verificaram uma redução do Ψ_{md} em relação aos respectivos controles, sob CC. Souza et al. (2013) verificaram ainda uma diferencial manutenção do *status* hídrico sob DH, a depender do grau de tolerância do genótipo ao DH, com maiores valores no tolerante em relação ao sensível.

Plantas oriundas dos genótipos 2B710 e DKB 390 que tiveram a umidade do solo mantida próxima à CC durante todo o ciclo fenológico apresentaram maior biomassa de grãos (BSG) e diâmetro de espiga (DESP) em relação às oriundas dos genótipos BRS 1010 e BRS 1055, sem alteração da altura da planta (AP), altura de inserção da espiga (ALTIE), área foliar específica (AFE), área foliar individual (AFI), número de folhas (NF), e da biomassa total (BST). Como consequência, o índice de colheita (IC) nos genótipos 2B710 e DKB 390 foi, em média, 14.2% maior em relação ao dos genótipos BRS 1010 e BRS 1055 (Tabela 1). As plantas do genótipo DKB 390 sob CC apresentaram menor comprimento de espiga (CESP) dissociado de alteração no número de grãos por fileiras (NGF), e, ainda assim, o peso de 100 grãos (P100G) foi maior em relação aos demais genótipos. Em plantas do genótipo 2B710 sob CC, a

maior BSG esteve associada a um maior número de grãos por espiga (GESP), com valores inclusive similares aos verificados em plantas do genótipo BRS 1055 (Tabela 1).

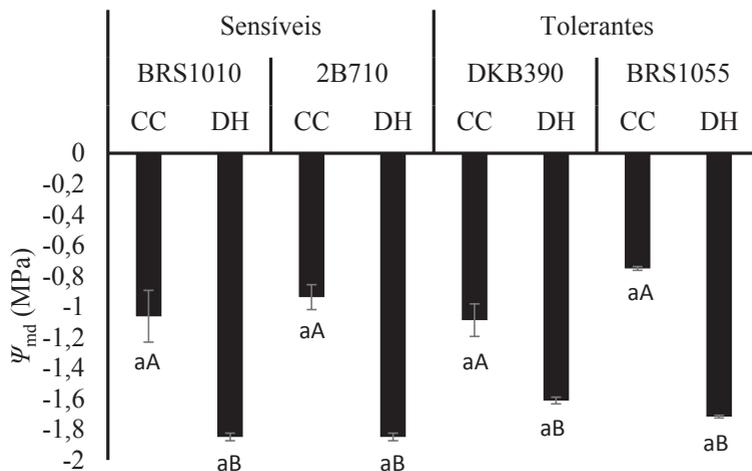


Figura 1. Potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}) em quatro genótipos de milho com características contrastantes para tolerância à seca (BRS1010 e 2B710 – sensíveis; DKB390 e BRS1055 - tolerantes), cultivados sob diferentes níveis de água no solo (capacidade de campo – CC, e déficit hídrico – DH). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Letras minúsculas denotam comparações entre os genótipos dentro de um mesmo nível de água no solo, e maiúsculas, comparações entre os níveis de água no solo dentro de um mesmo genótipo. Foi aplicado o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade ($n = 4$).

Sob DH o genótipo DKB 390 manteve IC significativamente superior aos demais genótipos; fato acoplado a maiores valores de GESP e CESP quando comparados às plantas desse mesmo genótipo sob CC, ainda que a largura dos grãos (LG) tenha sido diminuída. Já plantas oriundas do genótipo 2B710 sob DH tiveram o IC drasticamente diminuído em relação às suas respectivas plantas sob CC, atingindo valores similares aos verificados em plantas dos genótipos BRS 1010 e BRS 1055 (Tabela 1), corroborando reduções no dimensionamento dos grãos como um todo e no GESP sem alteração em P100 sob DH.

Souza et al. (2013) verificaram que a maior produção de grãos sob DH do genótipo DKB 390 em condições de campo está atrelada a menores valores de percentual de folhas secas, de distanciamento entre os feixes vasculares e de intervalo entre os florescimentos feminino e masculino, bem como maiores valores de abertura estomática, de número de estômatos, e de relação F_v/F_m em relação aos genótipos sensíveis nessa mesma condição hídrica. Além disso, apresentam sob DH aumento no número de elementos de metaxilema com menor diâmetro, o que, por sua vez, pode indicar uma elevada condutividade hidráulica radicular aumentando a capacidade de transporte de água no vaso do floema (LI et al., 2009). Assim, percebe-se que o genótipo DKB 390 investe principalmente em mecanismos fisiológicos em nível de parte aérea para manutenção de seus componentes de produtividade, por minimizar a perda de água.

Tabela 1. Produção agrônômica em quatro genótipos de milho com características contrastantes para tolerância à seca (BRS1010 e 2B710 – sensíveis; DKB390 e BRS1055 - tolerantes), cultivados sob diferentes níveis de água no solo (capacidade de campo – CC, e déficit hídrico – DH). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Letras minúsculas denotam comparações entre os genótipos dentro de um mesmo nível de água no solo, e maiúsculas, comparações entre os níveis de água no solo dentro de um mesmo genótipo. Foi aplicado o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade (n = 6)

	Sensíveis				Tolerantes			
	BRS1010		2B710		DKB 390		BRS1055	
	CC	DH	CC	DH	CC	DH	CC	DH
AP	1,764 bA	1,712 cA	1,840 bA	1,728 cA	1,820 bA	1,883 bA	2,190 aA	2,157 aA
ALTIE	0,951 aA	0,913 bA	0,744 bA	0,732 cA	0,981 aA	1,111 aA	0,927 aA	0,915 bA
AFE	15,58 aA	15,77 aA	17,82 aA	15,48 aA	16,86 aA	16,79 aA	16,56 aA	15,90 aA
AF	0,529 bA	0,480 bB	0,567 bA	0,486 bB	0,559 bA	0,553 aA	0,630 aA	0,576 aA
AFI	0,043 bA	0,040 bA	0,047 bA	0,040 bA	0,046 bA	0,046 aA	0,052 aA	0,048 aA
NF	12,17 aA	11,92 aA	12,00 aA	11,92 aA	12,00 aA	12,00 aA	12,17 aA	11,92 aA
NESP	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA	1,000 aA
GESP	440,6 bA	291,1 cB	563,4 aA	387,9 bB	388,4 bB	456,3 aA	508,5 aA	426,2 aA
BSR	30,09 bA	24,96 bA	25,09 bA	19,90 bA	28,55 bA	21,04 bA	46,61 aA	43,39 aA
BSC	50,19 aA	47,41 aA	47,26 aA	44,18 aA	50,71 aA	48,35 aA	54,69 aA	53,11 aA
BSF	33,96 bA	30,53 aA	32,48 bA	31,54 aA	32,90 bA	33,82 aA	39,02 aA	37,09 aA
BSS	29,18 aA	16,50 aB	27,80 aA	18,09 aB	24,88 aA	21,95 aA	25,21 aA	18,84 aB
BSG	90,74 bA	53,83 cB	104,0 aA	58,33 cB	99,87 aA	98,92 aA	90,02 bA	71,63 bB
BSPL	23,66 aA	20,78 aB	22,02 aA	17,23 bB	19,8 aA	18,28 bA	20,81 aA	18,37 aB
BSPE	3,166 aA	3,052 aA	2,517 aA	2,787 aA	2,475 aA	2,392 aA	2,887 aA	2,563 aA
BST	261,0 aA	197,1 bB	261,2 aA	192,1 bB	259,4 aA	243,9 aA	279,3 aA	244,9 aB
IC	0,349 bA	0,270 bB	0,401 aA	0,303 bB	0,384 aA	0,405 aA	0,324 bA	0,294 bA
P100G	20,66 bA	18,42 bA	18,49 bA	15,43 bA	26,06 aA	21,87 aA	17,75 bA	16,80 bA
DESP	49,67 bA	45,26 bB	54,86 aA	48,83 aB	53,80 aA	49,51 aA	46,28 cA	43,31 bB
CESP	17,66 aA	13,60 cB	18,03 aA	15,75 bB	15,38 bB	17,42 aA	18,11 aA	17,8 aA
NFESP	13,00 bA	12,33 cB	15,66 aA	16,66 aA	13,00 bA	13,33 bA	14,33 bA	13,67 bA
NGF	34,00 aA	23,16 cB	35,00 aA	22,33 cB	31,17 aA	34,67 aA	35,17 aA	28,67 bB
CG	11,76 bA	10,88 aA	13,16 aA	10,27 aB	11,78 bA	11,23 aA	11,46 bA	10,92 aA
EG	5,216 bA	5,196 aA	6,437aA	5,546 aB	4,510 cA	4,317 bA	4,724 cB	5,232 aA
LG	10,09 aA	8,685 aB	9,669 aA	8,277 aB	9,569 aA	8,423 aB	8,387 bA	8,716 aA
EM.E	0,200 aA	0,156 aB	0,225 aA	0,165 aB	0,229 aA	0,228 aA	0,194 aA	0,187 aA

Abreviaturas: ALT = Altura da planta, m; ALTIE = Altura de inserção da espiga, m; AFE = área foliar específica, m². kg⁻¹; AF = área foliar, m²; AFI = área foliar individual, m²; NF = número de folhas, n^o; NESP = número de espigas, n^o;

GESP = número de grãos por espiga, n° . $n^{\circ-1}$; BSR = Biomassa seca de raízes, g; BSC= Biomassa seca de colmos, g; BSF = Biomassa seca de folhas, g; BSESP = Biomassa seca de espigas, g; BSS= Biomassa seca de sabugo, g; BSG = Biomassa seca de grãos, g; BSPL – Biomassa seca da palhada, g; BSPE = Biomassa seca de pendões, g; BST = Biomassa seca total, g; IC = Índice de colheita, $g \cdot g^{-1}$; P100G = peso de 100 grãos, g; IFMF = intervalo entre os florescimentos masculino e feminino, dias; TIF = tempo para início do florescimento, dias; DESP = Diâmetro de espiga, mm; CESP = Comprimento de espiga, cm; NFESP= Número de fileira por espiga, n° ; NGF = Número de grãos por fileira, n° ; CG = comprimento dos grãos; EG = espessura dos grãos; LG = largura dos grãos; EM:E = relação embrião: endosperma.

Independentemente do nível de água no solo, plantas oriundas do genótipo BRS 1055 apresentaram biomassa vegetativa superior à dos genótipos DKB 390, BRS 1010 e 2B710, o que explica o seu IC menor quando comparado ao DKB 390.

Entretanto, não foram verificadas reduções significativas nos valores de IC nem de AF desse genótipo com a exposição ao DH. A maior biomassa vegetativa advinda do sistema radicular associado com uma maior área foliar (AF) pode ter ajudado o genótipo BRS 1055 a evitar declínio nos seus valores de IC, à medida que permitiu drenar fotoassimilados da folha para melhor enchimento dos grãos, sugerindo a existência de mecanismos diferenciais entre genótipos DKB 390 e BRS 1055 para lidar com o estresse gerado pelo DH.

Os fotoassimilados constituem não apenas fonte de energia para sustentar eventos de divisão e expansão celular, mas também de esqueleto de carbono durante o processo de maturação e acúmulo de biomassa seca de grãos. Em genótipos sensíveis ao DH, a exposição ao estresse hídrico conduz a um decréscimo na quantidade de água no vaso do floema, o que, por sua vez, diminui a pressão para influxo de fotoassimilados por meio dos plasmodesmos do floema para dentro das células do dreno (EDMEADES et al., 2000).

Apenas plantas oriundas dos genótipos BRS 1010 e 2B710 tiveram os valores de AF sobremaneira reduzidos sob DH. Isso, inevitavelmente, implicaria uma menor área fotossintética disponível para produção de fotoassimilados, conduzindo a menores valores de BSG, DESP e IC. De fato, apenas plantas oriundas dos genótipos sensíveis BRS 1010 e 2B710 tiveram a área do embrião em relação à do endosperma (EM:E) reduzidos sob DH paralelamente a uma diminuição na BSG, quando comparados às sob CC, o que permite afirmar, de modo contundente, que ocorreu um menor fluxo de fotoassimilados para os grãos nesses dois genótipos de milho sob DH, quando comparados aos genótipos DKB 390 e BRS 1055. Por sua vez, os valores da EM:E em plantas dos genótipos tolerantes DKB 390 e BRS 1055 sob DH não variaram em relação aos de plantas desses sob CC, corroborando a continuidade do fluxo de fotoassimilados para nutrição do embrião. A Figura 2 mostra as espigas dos genótipos nos diferentes tratamentos.

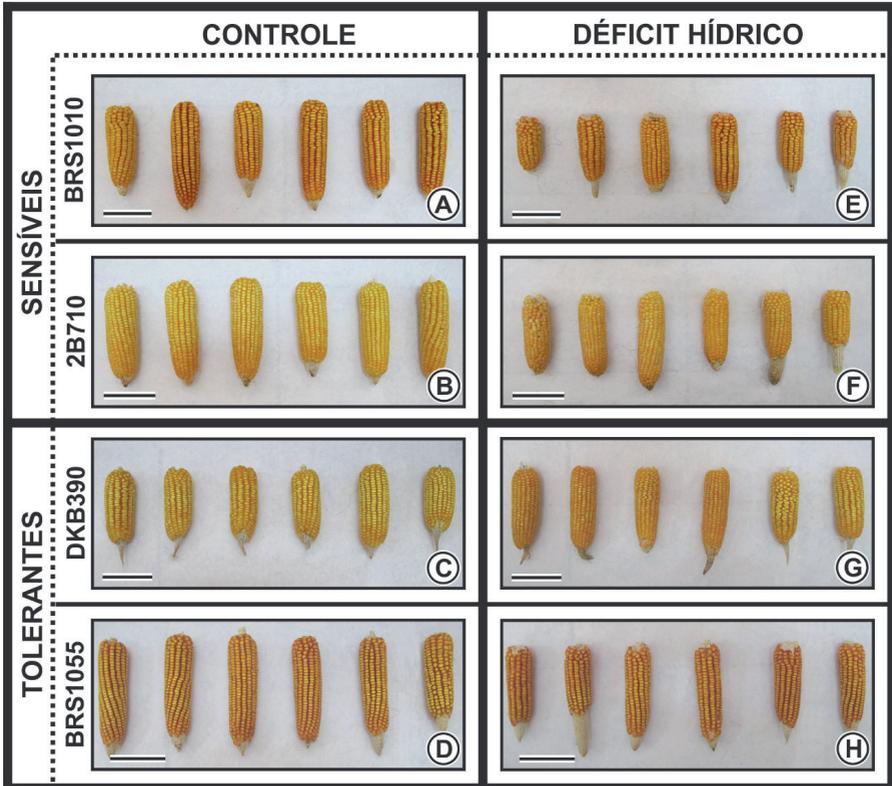


Figura 2. Espigas em quatro genótipos de milho com características contrastantes para tolerância à seca (BRS1010 e 2B710 – sensíveis; DKB390 e BRS1055 - tolerantes), cultivados sob diferentes níveis de água no solo (capacidade de campo: Figuras A-D; e déficit hídrico: Figuras E-H). Barra: 10 cm.

Mediante análise morfométrica de imagens das raízes, previamente digitalizadas em escâner de mesa, usando o programa Winrhizo, foi verificado que sob CC não há diferença entre os genótipos no que se refere ao comprimento, à área superficial e ao volume nas diferentes classes de diâmetro. Entretanto, sob DH o genótipo BRS1055 apresentou maior comprimento de raízes finas (CRF), área superficial de raízes

finas (ASRF), área superficial de raízes total (ASRT) e volume de raízes finas (VRF) em relação aos demais genótipos (Tabela 2). Além disso, plantas oriundas de tal genótipo sob DH tiveram CRF, área superficial de raízes muito finas (ASRMF), ASRF, área superficial radicular total (ASRT) e VRF sobremaneira aumentadas em relação àquelas mantidas sob CC, enquanto nos genótipos BRS 1010 e DKB 390 tais variáveis praticamente não mostraram alterações. Registra-se ainda que no genótipo sensível 2B710 sob DH os valores de ASRMF, ASRF e ASRT diminuíram em relação ao respectivo controle, sob CC (Tabela 2).

Poucos estudos têm examinado como os traços das raízes se relacionam com a produtividade em plantas cultivadas sob DH (SOUZA et al., 2013; UGA et al., 2013; HORTA et al., 2014). Uga et al. (2013) demonstraram que ao alterarem a sua estrutura para aumento no ângulo de crescimento radicular, plantas adaptadas à estratégia de tolerância à seca conseguiram explorar água em camadas mais profundas do solo, o que permite melhoras significativas na taxa fotossintética e no rendimento em grãos. É importante ressaltar que apenas plantas com características conservativas de ambientes áridos apresentam melhoras na eficiência de captura de água por produzir raízes finas (LIU et al., 2010). A Figura 3 mostra o sistema radicular dos genótipos nos diferentes tratamentos.

Tabela 2. Caracterização morfolométrica de raízes em quatro genótipos de milho com características contrastantes para tolerância à seca (BRS1010 e 2B710 – sensíveis; DKB390 e BRS1055 - tolerantes), cultivados sob diferentes níveis de água no solo (capacidade de campo – CC, e déficit hídrico – DH). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Letras minúsculas denotam comparações entre os genótipos dentro de um mesmo nível de água no solo, e maiúsculas, comparações entre os níveis de água no solo dentro de um mesmo genótipo. Foi aplicado o teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade ($n = 3$).

	Sensíveis				Tolerantes			
	BRS1010		2B710		DKB 390		BRS1055	
	CC	DH	CC	DH	CC	DH	CC	DH
DR	1,042 aA	1,022 aA	0,924 aA	1,094 aA	1,040 aA	1,000 aA	1,100 aA	1,029 aA
CRMF	356,4 aA	469,5 aA	417,0 aA	420,0 aA	404,2 aA	552,1 aA	469,1 aA	687,8 aA
CRF	415,9 aA	364,2 bA	379,2 aA	317,2 bA	386,7 aA	390,6 bA	382,5 aB	509,7 aA
CRG	84,40 aA	88,28 aA	82,49 aA	71,24 aA	90,88 aA	85,83 aA	67,62 aA	89,37 aA
CRT	856,7 aA	822,0 aA	878,7 aA	808,5 aA	881,8 aA	1029 aA	919,2 aA	1286 aA
ASRMF	33,89 aA	36,86 aA	48,52 aA	29,81 aB	36,95 aA	41,77 aA	33,17 aB	51,11 aA
ASRF	121,6 aA	106,0 bA	114,7 aA	90,14 bB	130,5 aA	112,8 bA	107,6 aB	149,4 aA
ASRG	104,9 aA	108,2 aA	98,88 aA	92,38 aA	113,2 aA	115,2 aA	96,17 aA	112,7 aA
ASRT	260,4 aA	251,0 cA	262,1 aA	212,3 cB	280,6 aA	269,8 bA	236,9 aB	313,2 aA
VRMF	2,457 aA	2,346 aA	2,761 aA	1,861 aA	2,390 aA	2,151 aA	1,615 aA	2,471 aA
VRF	3,253 aA	2,905 bA	3,161 aA	2,563 bA	3,351 aA	3,049 bA	2,832 aB	4,114 aA
VRG	13,4 4 aA	14,51 aA	12,65 aA	16,18 aA	14,31 aA	17,24 aA	16,50 aA	16,92 aA
VRT	19,15 aA	19,77 aA	18,58 aA	20,60 aA	20,05 aA	22,44 aA	20,94 aA	23,50 aA

DR = diâmetro de raiz, mm; CRMF = comprimento de raízes muito finas, cm; CRF = comprimento de raízes finas, cm; CRG = comprimento de raízes grossas, cm; CRT = comprimento de raízes total, cm; ASRMF = área superficial de raízes muito finas, cm²; ASRF = área superficial de raízes finas, cm²; ASRG = área superficial de raízes grossas, cm²; ASRT = área superficial de raízes total, cm²; VRMF = volume de raízes muito finas, cm³; VRF = volume de raízes finas, cm³; VRG = volume de raízes grossas, cm³; VRT = volume de raízes total, cm³.

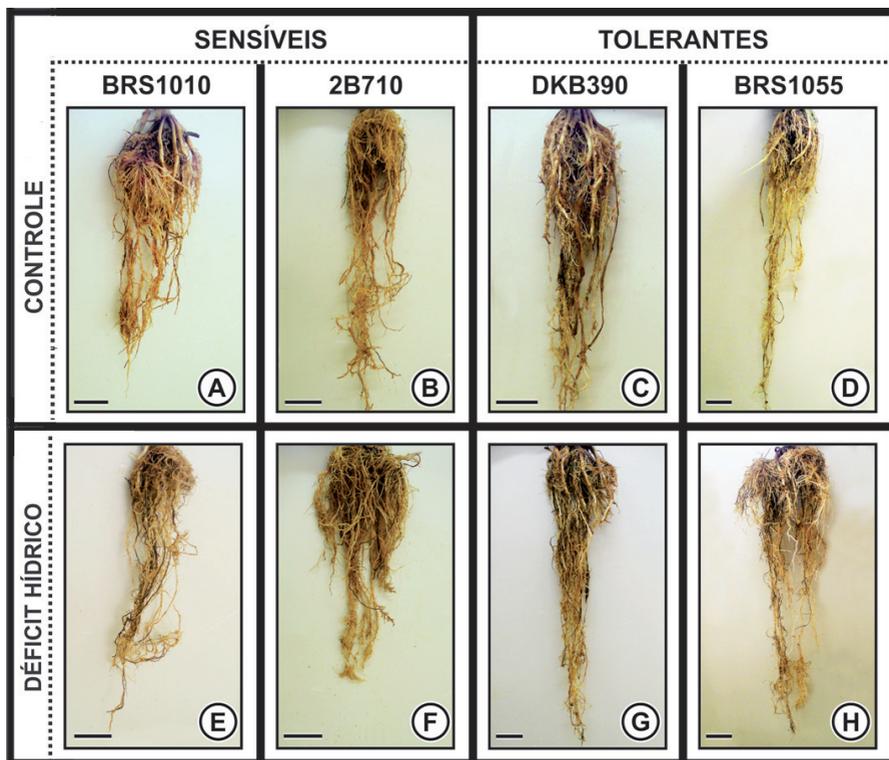


Figura 3. Sistema radicular em quatro genótipos de milho com características contrastantes para tolerância à seca (BRS1010 e 2B710 – sensíveis; DKB390 e BRS1055 - tolerantes), cultivados sob diferentes níveis de água no solo (capacidade de campo: Figuras A-D; e déficit hídrico: Figuras E-H). Barra: 10 cm.

Conclusão

Os genótipos DKB 390 e BRS 1055 são mais produtivos sob DH em relação aos BRS 1010 e 2B710. Entretanto, tais genótipos possuem mecanismos diferenciais para lidar com o estresse gerado pelo DH. O genótipo DKB 390 investe principalmente em mecanismos fisiológicos em nível de parte aérea para

manutenção da produtividade, por minimizar a perda de água, o que diminui a dependência de investimentos em nível de raiz para aumentar a captura de água. Por sua vez, o genótipo BRS 1055 possui em adição uma estratégia abaixo do solo de adaptação à seca, sendo esse um ponto de divergência em relação ao genótipo DKB 390.

Referências

- BROUWER, R. Distribution of dry matter in the plant. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 10, p. 399-408, 1962.
- DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 55-76, 1991.
- DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, A. C. 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, p. 33-40, 2002.
- EASTERLING, W. E.; AGGARWAL, P. K.; BATIMA, P.; BRANDER, L. M.; ERDA, L.; HOWDEN, S. M. Food, fiber and forest products. In: PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Ed.). **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. p. 273-313. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

EDMEADES, G. O.; BOLANOS, J.; ELINGE, A.; RIBAUT, J.-M.; BANZIGER, M.; WESTGATE, M. E. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. In: Westgate, M. E.; Boote, K. J. (Ed.). **Physiology and modeling kernel set in maize**. Madison: CSSAo, 2000. p. 43-73.

FORT, F.; JOUANY, C.; CRUZ, P. Root and leaf functional trait relations in Poaceae species: implications of differing resource-acquisition strategies. **Journal of Plant Ecology**, v. 2, p. 1-9, 2012.

GLOBO RURAL. **Forte seca prejudica safra e abastecimento de milho no Nordeste**. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2013/03/forte-seca-prejudica-safra-e-abastecimento-de-milho-no-nordeste.html>>. Acesso em: 24 out. 2014.

HAILE, M. Weather patterns, food security and humanitarian response in sub-Saharan Africa. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v. 360, p. 2169-2182, 2005.

HORTA, L. P.; BRAGA, M. R.; LEMOS-FILHO, J. P.; MODOLO, L. V. Organ-coordinated response of early-post-germination mahogany seedlings to drought. **Tree Physiology**, Oxford, v. 00, p. 1-12, 2014.

IPCC. Summary for policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate change 2007: the physical science basis**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. p. 1-18. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

LI, Y.; SPERRY, J. S.; SHAO, M. Hydraulic conductance and vulnerability to cavitation in corn (*Zea mays* L.) hybrids of differing drought resistance. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 66, p. 341-346, 2009.

LIU, G.; FRESCHER, G. T.; PAN, X.; CORNELISSEN, J. H. C.; LI, Y.; DONG, M. Coordinated variation in leaf and root traits across multiple spatial scales in Chinese semi-arid and arid ecosystems. **New Phytologist**, Cambridge, v. 188, p. 543-553, 2010.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. B.; TEBALDI, C.; MASTRANDREA, M. D.; FALCON, W. P.; NAYLOR, R. L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. **Science**, Washington, v. 319, p. 607-610, 2008.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; CANTÃO, F. R. O. Early evaluation of root morphology of maize genotypes under phosphorus deficiency. **Plant Soil Environment**, v. 57, p. 135-138, 2011.

POORTER, H.; NAGEL, O. The role of biomass allocation in the growth responses of plants to different levels of light, CO₂ and water: a quantitative review. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 27, p. 595-607, 2000.

SOUZA, T. C.; CASTRO, E. M.; MAGALHÃES, P. C.; LINO, L. O.; ALVES, E. T.; ALBUQUERQUE, P. Morphophysiology, morphoanatomy, and grain yield under field conditions for two maize hybrids with contrasting response to drought stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, p. 3201-3211, 2013.

TUBIELLO, T. N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation 2000-2080. **Technological Forecasting and Social Change**, New York, v. 74, p. 1030-1056, 2007.

UGA, Y.; SUGIMOTO, K.; SATOSHI OGAWA, S.; RANE, J.; ISHITANI, M.; HARA, N.; KITOMI, Y.; INUKAI, Y.; ONO, K.; KANNO, N.; INOUE, H.; TAKEHISA, H.; MOTOYAMA, R.; NAGAMURA, Y.; WU, J.; MATSUMOTO, T.; TAKAI, T.; OKUNO, K.; YANO, M. Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. **Nature Genetics**, New York, v. 45, p. 1097-1105, 2013.

VITALE, L.; DITOMMASI, P.; ARENA, C.; FIERRO, A.; SANTO, V. A. de; MAGLIULO, V. Effects of water stress on gas exchange of field grown *Zea mays* L. in Southern Italy: an analysis at canopy and leaf level. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 29, p. 317-326, 2007.

