



Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal no Semiárido

**CARACTERIZAÇÃO FENOTÍPICA EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB
DÉFICIT HÍDRICO**

Suerlani Aparecida Ferreira Moreira Ruas

2018

Suerlani Aparecida Ferreira Moreira Ruas

**CARACTERIZAÇÃO FENOTÍPICA EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB DÉFICIT
HÍDRICO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutora.

Orientador
Prof. Dr. Carlos Eduardo Corsato

JANAÚBA-MG
2018

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ruas, Suerlani Aparecida Ferreira Moreira

R894c Caracterização fenotípica em híbridos de milho sob déficit hídrico [manuscrito] / Suerlani Aparecida Ferreira Moreira Ruas. – 2018.
52 p.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, Universidade Estadual de Montes Claros – Janaúba, 2018.

Orientador: Prof. D. Sc. Carlos Eduardo Corsato.

1. Déficit hídrico. 2. Hibridação vegetal. 3. Milho híbrido. I. Corsato, Carlos Eduardo. II. Universidade Estadual de Montes Claros. III. Título.

CDD. 633.15

Suerlani Aparecida Ferreira Moreira Ruas

CARACTERIZAÇÃO FENOTÍPICA EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB DÉFICIT HÍDRICO

Tese apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Corsato
UNIMONTES (Orientador)

Prof. Dr. Alcinei Místico Azevedo
UFMG (Coorientador)

Prof. Dr. Ignácio Aspiázu
UNIMONTES (Conselheiro)

Prof. Dr. João Batista Ribeiro da Silva Reis
EPAMIG (Conselheiro)

Profª. Dra. Andréia Márcia Santos de Souza David
UNIMONTES (Conselheira)

**JANAÚBA-MG
2018**

Dedico este trabalho à minha filha, Lara Moreira Ruas, meu incentivo diário.

Luz da minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	vi
GENERAL ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	12
ARTIGO 1 - INDICADORES RESPOSTA AO DÉFICIT HÍDRICO EM HÍBRIDOS DE MILHO NA FASE VEGETATIVA.....	15
INTRODUÇÃO	17
MATERIAL E MÉTODOS	18
RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
CONCLUSÕES	25
AGRADECIMENTOS	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
ARTIGO 2 - ARQUITETURA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB DUAS CONDIÇÕES HÍDRICAS	35
INTRODUÇÃO	37
MATERIAL E MÉTODOS	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
CONCLUSÕES	48
AGRADECIMENTOS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
CONCLUSÃO GERAL.....	52

RESUMO GERAL

RUAS, Suerlani Aparecida Ferreira Moreira. **Caracterização fenotípica em híbridos de milho sob déficit hídrico**. 2019. 51 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG¹.

O déficit hídrico em plantas mesófitas, a exemplo do milho, pode comprometer o desenvolvimento dependendo da intensidade, duração do período restritivo e também do híbrido considerado. Contudo, diferenças observadas entre cultivares de milho crescendo sob condições restritivas de água em diversas regiões do mundo sugerem que essa característica pode ser melhorada. Nos estudos que envolvem a fenotipagem de milho sob condições de seca, têm-se avaliado indicadores fisiológicos e morfológicos em órgãos aéreos, além do rendimento em biomassa e grãos. Apesar da importância reconhecida das raízes na exploração e aquisição dos recursos do solo pela planta, poucos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de mensurar a relação entre caracteres do sistema radicular e a exploração da água pelas raízes do milho. O presente trabalho, redigido em duas partes, explora esse campo de investigação a partir do cultivo dos híbridos BRS1010, BR1055 e DKB390 crescendo em vasos sob dois regimes hídricos distintos: restrição de água a partir do quarto dia da semeadura e conforto hídrico desde a semeadura até a colheita das plantas. Quando o milho alcançou o estágio V5, as plantas foram colhidas, sendo registrados indicadores de parte aérea, seguindo-se à remoção do substrato aderido às raízes, e posterior escaneamento e caracterização das raízes pelo sistema WinRHIZO. No primeiro capítulo, o objetivo foi avaliar indicadores de parte aérea e de sistema radicular com resposta contrastante ao cultivo sob restrição e conforto nos híbridos avaliados, empregando a análise univariada. Também foi realizada análise multivariada com aplicação de variáveis canônicas para se agrupar variáveis que melhor expressem a diferença entre os fatores de tratamento: híbridos e regime hídrico. Índice SPAD, temperatura foliar, comprimento do colmo, biomassa seca de parte aérea, profundidade acima do qual 95% das raízes estão localizadas no perfil (D95), área de superfície de raiz e volume de raiz mostraram respostas contrastantes entre os regimes hídricos. A análise por variáveis canônicas revelou que índice SPAD, fenologia, temperatura foliar e diâmetro médio da raiz explicam, conjuntamente, diferenças entre os híbridos nos regimes hídricos estudados. O capítulo dois caracteriza o sistema radicular da planta em

¹ **Comitê orientador:** Prof. Dr. Carlos Eduardo Corsato - UNIMONTES (Orientador); Prof. Dr. Alcinei Místico Azevedo – UFMG (Coorientador); Prof. Dr. Ignácio Aspiazu-UNIMONTES (Conselheiro); Eng. Agro. Dr. João Batista Ribeiro da Silva Reis - EPAMIG (Conselheiro); Profa. Dra. Andréia Márcia Santos de Souza David UNIMONTES (Conselheira);

diferentes profundidades, tendo por objetivo saber se a arquitetura e desenvolvimento de raízes aos 10 cm de profundidade expressam diferenças em resposta ao regime hídrico nos híbridos estudados; outro objetivo foi avaliar a densidade de comprimento de raiz no perfil do sistema radicular, e também identificar o grupo de variáveis que analisadas conjuntamente, expliquem as diferenças obtidas entre os regimes hídricos nos híbridos avaliados. Para tanto, ao atingirem o estágio V5, o sistema radicular das plantas foi seccionado em frações consecutivas de 10 cm de altura. De cada fração foi retirada uma alíquota com volume de 100 cm³ composta de solo e raízes, de onde se extraiu a massa úmida e seca. As raízes provenientes de cada fração foram então lavadas, digitalizadas e caracterizadas no sistema WinRHIZO quanto a densidade de comprimento de raiz (DCR – cm cm⁻³), a área de superfície de raiz (ASR – cm²) o diâmetro médio de raiz (DMR – mm) e volume de raiz (VR – cm²) sendo, posteriormente secas e estufa determinando-se a biomassa seca (BS). Na fração que alojava o mesocótilo, após a lavagem cuidadosa das raízes foi avaliado o número de raízes seminais (NRS), o ângulo de inserção das raízes nodais no primeiro (ARNV1) e segundo (ARNV2) verticilos, o número de raízes nodais no primeiro (RNV1) e segundo (RNV2) verticilos, e o número de verticilos no mesocótilo (NVM). Apenas as raízes nodais expressam variação no desenvolvimento em resposta ao regime hídrico empregado. A depender do híbrido considerado foram observadas diferenças na arquitetura (ARNV1, ARNV2, NVM) e desenvolvimento de raiz (BS, DMR, DCR, ASR) conforme o regime hídrico empregado. O híbrido DKB390 conduzido sob restrição hídrica apresentou maior ARNV1 e menor RNV2. E também expressou a menor DCR nas diferentes profundidades entre os híbridos avaliados, independentemente do regime hídrico. Na análise conjunta, ARNV1, ARNV2 e NVM foram as características que melhor explicaram a variação obtida no sistema radicular do milho sob déficit hídrico em comparação ao conforto hídrico.

Palavras-Chave: Zea mays L. Água. Raiz. Análise multivariada.

GENERAL ABSTRACT

RUAS, Suerlani Aparecida Ferreira Moreira. **Phenotypic characterization in hybrids of maize under water deficit**. 2019. 51 p. Thesis (Doctor's Degree in Plant Production in Semi-Arid) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG².

The water deficit in mesophyte plants, like maize, can compromise the development of the plant depending on the intensity, duration of the restriction period and also the genotype considered. However, observed differences between maize cultivars growing under restrictive water conditions in several regions of the world suggest that this feature can be improved. In the studies that involve maize phenotyping under drought conditions, physiological and morphological indicators have been evaluated in aerial organs, as well as yield in biomass and grains. Despite the recognized importance of roots in the exploration and acquisition of soil resources by the plant, few studies have been conducted with the objective of measuring the relationship between root system characters and water exploitation by maize roots. The present work, in two parts, explores this field of research from the cultivation of hybrids BRS1010, BR1055 and DKB390 growing in pots under two distinct water regimes: water restriction from the fourth day of sowing and water comfort from the sowing until the harvest of the plants. When the maize reached the V5 stage, the plants were harvested, registering shoot indicators, followed by the removal of the substrate adhered to the roots, and later scanning and characterization of the roots by the WinRHIZO system. In the first chapter, the objective was to evaluate aerial part and root system indicators with contrasting response to restricted and comfort cultivars in the evaluated hybrids, using the univariate analysis. Multivariate analysis was also performed with application of main components to group variables that best express the difference between the treatment factors: hybrids and water regime. SPAD index, leaf temperature, stem length, aerial dry biomass, D95, root surface area and root volume showed contrasting responses between water regimes. The analysis by canonical variables revealed that SPAD index, phenology, leaf temperature and mean root diameter explain, jointly, differences between the hybrids in the water regimes studied. The chapter two characterizes the root system of the plant at different depths, aiming to know if the architecture and development of roots at 10 cm depth express differences in response to the water regime in the studied hybrids; another objective was to evaluate the root length

² **Guidance committee:** Prof. Dr. Carlos Eduardo Corsato - UNIMONTES (Advisor); Prof. Dr. Alcinei Místico Azevedo – UFMG (Co-Advisor); Prof. Dr. Ignácio Aspiazu-UNIMONTES (Counselor); Eng. Agro. Dr. João Batista Ribeiro da Silva Reis - EPAMIG (Counselor); Profa. Dra. Andréia Márcia Santos de Souza David UNIMONTES (Counselor);

density in the root system profile, as well as to identify the group of variables that analyzed together, explain the differences obtained between the water regimes in the evaluated hybrids. For this, when they reached the V5 stage, the root system of the plants was sectioned in consecutive fractions of 10 cm in height. From each fraction an aliquot with 100 cm³ volume composed of soil and roots was extracted, from which the wet and dry mass was extracted. The roots from each fraction were then washed, scanned and characterized in the WinRHIZO system for root length density (DCR - cm cm⁻³), root surface area (ASR - cm²) and mean root diameter (DMR - mm) and root volume (VR - cm³). The dry biomass (BS) was then dried and greenhouse determined. The number of root nodules (NRS), nodal roots insertion angle in the first (RNAV1) and second (RNAV2) verticils, and the number of nodal roots in the first one were evaluated in the fraction that housed the mesocotyl, after careful root washing. (RNV1) and second (RNV2) whorls, and the number of verticils in mesocotyl (NVM). Only the nodal roots expressed developmental variation in response to the water regime employed. Depending on the hybrid, differences in the architecture (ARNV1, ARNV2, NVM) and root development (BS, DM, DCR, ASR) were observed according to the water regime employed. DKB390 conducted under water restriction showed higher RNAV1 and lower RNV2. DKB390 expressed the lowest DCR at the different depths among the evaluated hybrids, regardless of the water regime. In the joint analysis, ARNV1, ARNV2 and NVM were the characteristics that best explained the variation obtained in the corn root system under water deficit in comparison to comfort.

Key words: *Zea mays* L., Water. Root, Multivariate analysis.

INTRODUÇÃO GERAL

A adaptação de culturas a novos ambientes é de crucial importância, especialmente em um cenário de mudanças climáticas. A fim de assegurar a produção de alimentos no futuro, os esforços precisam ser direcionados para entender os mecanismos de adaptação e tolerância das plantas a estresses abióticos, como escassez de água, pois esses eventos devem se intensificar nos próximos anos (ELLIOTT et al., 2014). As plantas enfrentam o estresse hídrico ao recrutar mecanismos de tolerância à seca, que incluem ajuste osmótico, regulação da condutância estomática e fotossíntese, produção de compostos antioxidantes e eliminadores ou reguladores da absorção e fluxo de água em seus tecidos (RUIZ-LOZANO et al., 2012; CANDAR-CAKIR et al., 2016).

O milho (*Zea mays*L.) é o cereal mais cultivado no mundo, tendo como maiores produtores os Estados Unidos, China e Brasil (FAO, 2017). No Brasil, o milho possui importante papel na economia e desenvolvimento social e cultural de várias regiões do país, se caracterizando como uma das principais alternativas para o agricultor devido à sua capacidade de geração de emprego e renda (SILVA et al., 2014).

O rendimento da cultura do milho é o resultado de uma combinação do potencial genético da cultivar, o manejo da cultura e as condições ambientais da área de cultivo. Em relação a esta última, a disponibilidade de água e os episódios de seca tornaram-se um dos principais fatores que afetam o rendimento das culturas, representando uma séria ameaça à produção agrícola em todo o mundo.

A cultura do milho, por ser uma planta C4, é bastante suscetível ao estresse hídrico, especialmente na fase reprodutiva, ocasionando importantes reduções no rendimento sob o déficit hídrico em diferentes regiões do mundo (DARYANTO et al., 2016). De acordo com Liu (2015), a seca é um dos principais fatores abióticos que limita o rendimento elevado e estável dessa cultura, assim, a melhoria da eficiência do uso da água e o cultivo empregando cultivares de milho adaptados à seca torna-se urgente.

Entre as pesquisas que visam as causas das perdas de produção por limitação hídrica citam-se, maior eficiência no uso da água (EUA) pelas plantas (DANESHNIA et al., 2015; MESSINA et al., 2015), a identificação e o desenvolvimento de híbridos com tolerância à restrição hídrica (MESSINA et al., 2011). Nesse contexto, o entendimento do mecanismo de resposta vegetal à deficiência hídrica, durante as fases críticas de cultivo, é de grande importância e parte fundamental para a obtenção de cultivares tolerantes à seca (FURLAN et al., 2014).

É sabido que a seca pode ocorrer em diferentes estádios de desenvolvimento a partir da semeadura e que também seus efeitos podem ser acumulativos na planta (SOUZA, 2016). Grandes avanços no entendimento de como as plantas de milho respondem a danos causados pela seca têm

sido baseados em avaliações realizadas no estágio reprodutivo (KHODARAHMPOUR & HAMIDI, 2011; GE et al., 2012 ; LAVINSKY et al., 2015). Apesar da quantidade de informações sobre respostas das culturas ao déficit hídrico, o conhecimento sobre os mecanismos associados à tolerância à seca em milho em estádios iniciais de desenvolvimento ainda é restrito (MIN et al., 2016).

Além da escassez de estudos sobre deficit hídrico em milho na fase vegetativa da cultura, nas últimas décadas as técnicas de estudos tem se concentrado em observações de órgãos aéreos das plantas, como por exemplo, as folhas. As raízes, apesar da sua reconhecida importância no abastecimento hídrico da planta, por situarem-se abaixo da superfície do solo, têm recebido pouca atenção, na triagem de fenotipagem (FENTA et al., 2014). A eficiência da exploração dos recursos do solo e sua relação com a arquitetura do sistema radicular, complementa esse campo de estudo sob vários aspectos, uma vez que a absorção de água e nutrientes e a adaptação das plantas a um ambiente pode depender da distribuição das raízes no solo (ATTA et al., 2013).

Dificuldades para a recuperação, visualização, manuseio, entre outros fatores, transformaram o estudo desta parte da plantarum trabalho moroso, dispendioso e de difícil execução, fazendo com que sempre ficasse em segundo plano no campo da pesquisa agrônômica (GONÇALVES e LYNCH, 2014).

Szymanowska-Pulka (2013), considera que existiram muitos avanços em estudos de raízes nas últimas décadas, nas áreas de biologia celular e molecular, tendo sido dada pouca atenção, contudo a estudos da morfologia e arquitetura das mesmas.

A pesquisa sobre o déficit hídrico na fase reprodutiva do milho tem identificado híbridos com altos ou baixos rendimentos, ou produção de biomassa na época da colheita. Esse enfoque é limitado, por expressar uma característica agrônômica associada à tolerância à seca, mas que pode não ser seletivamente orientada para recombinação. De acordo com Bertolli et al. (2012), um enfoque reducionista terá sucesso limitado porque o balanço ótimo da conservação de água e a absorção de carbono é alcançado, não por estar associada a um único caractere ou mecanismo na planta, mas pela combinação de diversas estratégias e características associadas, atuando simultaneamente na expressão da tolerância à seca.

Em situações de déficit hídrico, a planta do milho lança mão de uma série de mecanismos específicos ao estresse submetido; porém a identificação e associação desses caracteres a restrição hídrica não é uma tarefa fácil uma vez que, obter tais características de tolerância, úteis para diferentes híbridos e estádios de desenvolvimento, é, no entanto, extremamente desafiador, já que uma interpretação global das respostas é necessária para entender completamente a tolerância da planta ao déficit hídrico (GRANDA et al., 2014). A análise de variância univariada (ANOVA), fornece uma visão individual e isolada de cada parâmetro medido, bem como identificam quais

fatores observados estão relacionados às diferenças entre os híbridos. A análise multivariada, contudo, oferece alternativa de processar todos os parâmetros a partir da análise conjunta dos dados em que se busca relação com estresse abiótico identificando grupos de variáveis que atuando de forma associada tornaria mais compreensível a distinção entre híbridos tolerantes e suscetíveis à seca (CORREIA et al., 2014).

A identificação e caracterização de descritores morfofisiológicos de raiz, assim como a elucidação de características agrônomicas responsáveis pelo comportamento diferencial de híbridos sobre condições de estresse podem, assim, auxiliar na seleção de híbridos de interesse contribuindo para o aperfeiçoamento de técnicas de seleção, auxiliando na identificação de caracteres genéticos de tolerância ao estresse hídrico (CLEMENTE, 2017).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar se o déficit hídrico interfere no desenvolvimento do sistema radicular em híbridos de milho na fase vegetativa do seu ciclo. A partir da análise multivariada dos dados, verificar a existência de grupos de indicadores que melhor explicam a diferença entre híbridos nos regimes hídricos avaliados.

REFERÊNCIAS

ATTA, B. M. *et al.* Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 13, p. 2108-2115, 2013.

BERTOLLI, S.C. *et al.* Why is it so difficult to identify a single indicator of water stress in plants? A proposal for a multivariate analysis to assess emergent properties. **Plant Biology, Stuttgart**, v. 16, n. 3, p.578–585, 2014.

CANDAR-CAKIR, B. *et al.* Small RNA and degradome deep sequencing reveals drought-and tissue-specific microRNAs and their important roles in drought-sensitive and drought-tolerant tomato genotypes. **Plant Biotechnology Journal**, v.14, n. 8, p. 1727–1746, 2016.

CLEMENTE, D. I. **Estresse hídrico sobre caracteres morfofisiológicos e agrônomicos em populações de milho** [manuscrito]/ Damião Inácio Clemente. - 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Ciências Agrárias, Jataí, Programa de Pós Graduação em Agronomia, Jataí, 2017.

CORREIA, B. P. *et al.* Water stress and recovery in the performance of two *Eucalyptus globulus* clones: physiological and biochemical profiles **Physiology Plant**, v.150, n. 4, p. 580-592, 2014.

DANESHNIA, F. *et al.* Surfactant effect on forage yield and water use efficiency for berseem clover and basil in intercropping and limited irrigation treatments. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 57-63, 2015.

DARYANTO, S. *et al.* Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. **PLoS one**, v. 11, n. 5, p. e0156362, 2016.

- ELLIOTT, J. *et al.* Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 11, p. 3239–3244, 2014.
- FENTA B. A. *et al.* Field phenotyping of soybean roots for drought stress tolerance. *Agronomy*, v. 4, n. 3, p. 418–435, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Production: crops**. 2013. Disponível em: <www.faostat.fao.org>. Acesso em: 15 novembro. 2017.
- FURLAN, F. *et al.* Influência do potencial hídrico induzido por polietilenoglicol in vitro na morfologia do trigo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 3, p. 370-375, 2014.
- GE, T. *et al.* Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.34, n. 3, p.1043-1053, 2012.
- GONÇALVES, S. L; LYNCH, J. P. **Raízes de plantas anuais: tolerância a estresses ambientais, eficiência na absorção de nutrientes e métodos para seleção de genótipos**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 67 p. (Documentos, 357). Disponível em: Acesso em: 30 out. 2018.
- GRANDA, V. *et al.* Physiological and biochemical responses to severe drought stress of nine *Eucalyptus globulus* clones: a multivariate approach. **Tree Physiology**, v. 34, n. 7, p. 778–786, 2014.
- KHODARAHMPOUR, Z.; HAMIDI, J. Evaluation of drought tolerance in different growth stages of maize (*Zea mays*L.) inbred lines using tolerance indices. **African Journal of Biotechnology**, v.10, n. 60, p.13482-13490, 2011.
- LAVINSKY, A.O. *et al.* Partitioning between primary and secondary metabolism of carbon allocated to roots in four maize genotypes under water deficit and its effects on productivity. **The Crop Journal**, v.3, n. 5, p.379-386, 2015.
- LIU, Y. *et al.* Overexpression of maize SDD1 (ZmSDD1) improves drought resistance in *Zea mays* L. by reducing stomatal density. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 122, n. 1, p. 147-159, 2015.
- MESSINA, C. D. *et al.* Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US corn belt. **Agronomy Journal**. Madison, v. 107, n. 6, p. 1978-1986, 2015.
- MESSINA, C. D. *et al.* Yield trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 3, p. 855–868, 2011.
- MIN, H. *et al.* Identification of drought tolerant mechanisms in maize seedlings based on transcriptome analysis of recombination inbred lines. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1080, 2016.
- RUIZ-LOZANO, J. M. *et al.* Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant drought tolerance: state of the art. In: **Plant responses to drought stress**. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 335-362. 2012.

SILVA, G. R. *et al.* C. Doses de nitrogênio e fósforo para produção econômica de milho na Chapada do Apodi, RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 12, p. 1247–1254, 2014.

SOUZA, Thiago Corrêa de *et al.* Corn root morphoanatomy at different development stages and yield under water stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol.51, n.4, p.330-339, 2016.

SZYMANOWSKA-PULKA, J. Form matters: morphological aspects of lateral root development. **Annals of Botany**, v. 112, n. 9, p. 1643-1654, 2013.

**ARTIGO 1 - INDICADORES RESPOSTA AO DÉFICIT HÍDRICO EM
HÍBRIDOS DE MILHO NA FASE VEGETATIVA**
Artigo redigido conforme norma da Revista Semina: Ciências Agrárias

40 block design in a factorial, three hybrids x two water regimes. The experiment was carried out
41 in a greenhouse with water regimes: water comfort (C) and water restriction (R). In the V5
42 stage, stem and root characteristics were evaluated. The ANOVA followed by the Tukey test
43 showed that SPAD index, leaf temperature, shoot length, dry shoot biomass, D95, root surface
44 area and root volume revealed differences between water regimes. The Manova followed by
45 canonical variable analysis distinguished the hybrids in the water regimes from the variables
46 SPAD index, phenology, leaf temperature and root mean diameter.

47

48 **Keywords:** *Zea mays* L., water, multivariate analysis.

49

50

51 INTRODUÇÃO

52

53 A seca é um dos fatores que mais limitam a produção mundial de milho (*Zea mays* L.).
54 No Brasil, onde predomina o cultivo de milho sem irrigação, a irregularidade pluviométrica
55 associada ao alto custo de implantação de sistemas de irrigação tem elevado, em safras
56 consecutivas, o déficit hídrico como o principal entrave na produção deste cereal
57 (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

58 O emprego de híbridos de milho tolerantes ao déficit hídrico vem sendo apontado como
59 estratégia para minimizar os efeitos da seca (COOPER, *et al.*, 2014). A triagem de híbridos de
60 milho cultivado sob condições restritivas de água configura-se no passo inicial para identificar e
61 compreender, nos diversos níveis de organização da planta, as estratégias de convívio com a
62 seca a serem utilizadas no desenvolvimento de material genético adaptado (MUTAVA *et*
63 *al.*,2011).

64 A maioria dos trabalhos sobre a seca no milho estuda as respostas à restrição de água a
65 partir da fase reprodutiva do ciclo da cultura, registrando seus efeitos na produção de grãos e
66 biomassa final da cultura; o que tem permitido o entendimento das respostas e identificação de
67 materiais tolerante ao déficit hídrico a partir do florescimento (LAVINSKY *et al.*, 2015).

68 Sabe-se, contudo, que a deficiência hídrica no milho pode ocorrer antes mesmo da sua
69 reprodução e em mais de um estágio de desenvolvimento. Poucos estudos têm sido realizados
70 sobre as respostas de híbridos de milho ao déficit hídrico na fase vegetativa do seu ciclo, sendo
71 esta uma informação de extrema importância, uma vez que em muitas regiões produtoras são
72 comuns veranicos nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura. De acordo com
73 Kamoshita *et al.* (2004), o vigor de plântulas pode permitir um aprofundamento de raízes antes
74 ou durante as primeiras ocorrências de seca, garantindo assim, a extração de água e a
75 manutenção do crescimento durante eventos de déficit hídrico. Entender como o milho responde
76 à seca nos estádios iniciais de desenvolvimento é de grande relevância para estudos que visam o

77 desenvolvimento de híbridos de milho destinado a regiões onde a seca ocorre durante a fase
78 inicial de desenvolvimento da cultura, assegurando assim o seu estabelecimento.

79 Para a fenotipagem de híbridos de milho visando à tolerância à deficiência hídrica têm
80 sido considerados indicadores de órgãos aéreos, tais como: espessura de cutícula, precocidade e
81 sincronismo no intervalo entre o florescimento masculino e feminino, conteúdo de clorofila na
82 folha, potencial hídrico foliar, temperatura da folha, *stay-green*, índice de área foliar e análise de
83 crescimento das plantas, além dos componentes de produção que são correlacionados positiva
84 ou negativamente com o rendimento da cultura (TEIXEIRA *et al.*, 2010; BEIRAGI *et al.*, 2011;
85 ADEBO; OLAOYE, 2015).

86 Características do sistema radicular relacionadas à aquisição de água em situações de
87 déficit hídrico também têm sido estudadas a respeito da sua utilidade no estudo destinado ao
88 desenvolvimento de híbridos tolerantes à seca. A variabilidade entre híbridos para
89 características de raiz e sua relação para obtenção de água já foram relatadas para o milho. Entre
90 elas citam-se a concentração de aerênquima cortical de raiz (ZHU *et al.*, 2010), o número de
91 raízes seminais, a biomassa e comprimento de raiz nodal (BURTON *et al.*, 2013) e o ângulo de
92 crescimento de raízes seminais (LYNCH, 2013).

93 A hipótese que fundamenta este trabalho é que indicadores de parte aérea e sistema
94 radicular de híbridos de milho respondem de forma diferenciada ao déficit hídrico no estágio
95 inicial do seu desenvolvimento. Sendo assim, os objetivos desse estudo foram: a) verificar os
96 indicadores respostas de tolerância ao déficit hídrico em plantas de milho na fase vegetativa; b)
97 verificar quais indicadores melhor explica a diferença entre híbridos nos regimes hídricos
98 avaliados.

99

100 MATERIAL E MÉTODOS

101 Híbridos comerciais de milho com rendimento contrastante ao cultivo sob restrição
102 hídrica (DKB 390 e BRS 1055 tolerantes; BRS1010 sensível) foram avaliados quanto à resposta
103 ao déficit de água no estágio vegetativo do seu ciclo.

104 O experimento foi desenvolvido na Universidade Estadual de Montes Claros
105 (Unimontes), *campus* de Janaúba-MG, no semiárido brasileiro, no período de julho a setembro
106 de 2017 por três ciclos consecutivos com data de implantação espaçada de uma semana entre
107 eles. Em cada ciclo os híbridos foram cultivados em tubos sob dois regimes hídricos distintos,
108 isto é, conforto hídrico (C) e restrição hídrica (R), perfazendo seis tratamentos, num
109 delineamento em blocos casualizados com quatro repetições em fatorial 3x2. O modelo
110 estatístico adotado foi:

$$111 \quad y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + b_k + d_{(ij)k} + e_{(ij)kl}$$

112 Em que y_{ijkl} é o valor observado na parcela que recebeu o híbrido i e regime hídrico j no
113 bloco k e ciclo l

114 μ é a média geral
115 α_i é o efeito no nível i do fator a (Híbrido)
116 β_j é o efeito no nível j do fator b (Regime hídrico)
117 $(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos níveis i do fator a e nível j do fator b
118 b_k é o efeito do bloco k
119 $d_{(ij)k}$ é o efeito da interação entre a combinação do nível i do fator A, e nível j do fator B com o
120 bloco k
121 e_{ijkl} é o erro experimental na parcela que recebeu o híbrido i e regime hídrico j no bloco k e
122 ciclo l.

123 Tubos de policloreto de polivinila (PVC) com dimensões de 1,0 m de comprimento e
124 0,1m de largura foram revestidos internamente com filme de polietileno transparente de alta
125 densidade, preenchidos com Neossolo Quartzarênico e vedados na sua parte inferior com tampa
126 contendo uma perfuração.

127 No dia do plantio os tubos destinados ao tratamento de conforto hídrico receberam água
128 até a capacidade de campo (1,640 L) e os tubos correspondentes ao tratamento de restrição
129 hídrica receberam 30% desse volume (0,490 L). Em cada tubo foram plantadas duas sementes a
130 5 cm de profundidade. No quarto dia após o plantio, cada tubo recebeu solução composta por
131 2,6 g de fertilizante organomineral – Bravo Agrolatino (composição por litro: 8,5 g de N; 8,5
132 mg de P_2O_5 ; 8,5 mg de K_2O ; 0,5 mg de Fe; 0,5 mg de Mn, 0,5 mg de B, 0,2 mg de Cu, 1,00 mg
133 Zn, 0,10 mg de Mo), diluído em 100 mL de água.

134 A partir da adubação até a colheita, as plantas do tratamento sob restrição não
135 receberam mais água, enquanto as do tratamento sob conforto hídrico foi mantido sob
136 capacidade de campo. Os tubos foram mantidos na posição vertical no interior de casa de
137 vegetação sob teladoantiafídeo e recobertos nas laterais com placas de poliestireno expansivo
138 (isopor) a fim de atenuar a incidência de radiação solar. Para diminuir a evaporação na
139 superfície exposta do substrato, a abertura superior de cada tubo foi recoberta com filme de
140 polietileno transparente onde se abriu pequena fenda para exposição da parte aérea emergente.
141 Ao atingirem o estágio de emergência (VE) procedeu-se o desbaste deixando-se uma planta por
142 unidade experimental.

143 Variações do ambiente interno do telado foram obtidas com um medidor portátil
144 Termohigroanemoluxímetro (Instrutemp – São Paulo, SP), registrando no período, médias de
145 temperatura de 35,85°C; irradiância 1979 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e umidade relativa de 36,77%. Os
146 estádios fenológicos do milho foram identificados mediante a avaliação do surgimento do elo de
147 união bainha-limbo (“colar”), conforme Abendroth *et al.*, (2011). Foi considerada a mudança de
148 estágio fenológico quando 50% das plantas de cada tratamento se encontravam com a última
149 folha desenvolvida apresentando visivelmente o “colar”. As plantas foram colhidas quando se

150 encontravam no estádio V5, quando então foram realizadas as avaliações de parte aérea e
151 sistema radicular.

152 Foi avaliado o comprimento de caule, com o auxílio de uma régua, a partir do nível do
153 solo até a base do limbo da última folha totalmente desenvolvida.

154 A temperatura foliar e índice SPAD foram aferidos no mesmo dia na última folha
155 totalmente expandida. O índice SPAD foi determinado com clorofilômetro (SPAD 502,
156 Minolta, Japan). A temperatura foliar foi medida empregando-se um termômetro digital
157 infravermelho Ray Temp 38 (Sussex, UK).

158 O conteúdo relativo de água nas folhas foi avaliado retirando-se três discos foliares da
159 última folha completamente desenvolvida. Em seguida registrou-se sua massa fresca (MF)
160 sendo então os discos submersos em frascos individuais contendo água deionizada por 24h,
161 obtendo-se então a massa túrgida (MT). Posteriormente, os discos foram para secagem em
162 estufa de circulação forçada de ar sob temperatura de 65°C, durante 48 horas, obtendo-se então
163 sua massa seca (MS). O conteúdo relativo de água foi determinado baseado na recomendação de
164 Wertherley (1950). A biomassa seca da parte aérea foi obtida após a secagem das amostras em
165 estufa de ar forçada a 65 °C.

166 Para a avaliação das raízes procedeu-se a remoção cuidadosa do solo, lavando-se
167 individualmente com água corrente e separando as raízes que, então, foram conservadas em
168 solução de etanol 70% e armazenadas sob refrigeração até o dia da avaliação. As amostras foram
169 analisadas com o sistema WinRHIZO Pro 2007a (Régent Instr. Inc.), acoplado a um scanner
170 profissional Epson XL 10000, equipado com unidade de luz adicional (TPU) e definição de 400
171 dpi, como descrito por Costa *et al.* (2002). Cada amostra foi disposta em uma cuba de acrílico
172 de 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, contendo água destilada, sendo avaliado em
173 cada fração: comprimento de raiz (CR - cm); área de superfície de raiz (ASR – cm²); diâmetro
174 médio de raiz (DMR – mm) e volume de raiz (VR – cm³).

175 Após a avaliação pelo sistema WinRHIZO, as amostras foram levadas para a estufa para
176 determinação de massa seca da raiz (MSR g planta⁻¹) a fim de se obter a relação entre a
177 biomassa seca da raiz e biomassa seca da parte aérea (R/PA).

178 Para distribuição vertical de raízes, foram calculadas as proporções acumuladas de
179 raízes a partir de seu comprimento nas diferentes profundidades no perfil dos tubos de PVC,
180 avaliadas seguindo método proposto por Schenk & Jackson (2002), cujo objetivo é conhecer a
181 profundidade acima do qual 95% das raízes estão localizadas no perfil (D₉₅).

182 Para análise dos dados, após confirmada a normalidade e homogeneidade de variâncias,
183 as médias foram submetidas à análise de variância univariada e quando significativas pelo teste
184 F ($p \leq 0,05$), foram desdobradas pelo teste Tukey ao nível de 5% de significância. Também foi
185 aplicada a análise de variância multivariada (MANOVA) com o objetivo de verificar o
186 agrupamento das diferentes respostas das plantas, considerando todo o conjunto de indicadores

187 de parte aérea e de raiz. Para tanto foi utilizada a função manova do pacote *stats*, recorrendo ao
188 teste de Pillai a um nível de 5% de significância. Posteriormente, os dados foram submetidos à
189 análise multivariada por meio de variáveis canônicas (VC) com auxílio do pacote *candisc*.
190 Todas as análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio do software R (R CORE TEAM,
191 2016).

192

193 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

194

195 *Variáveis de Parte Aérea*

196

197 Houve interação das fontes de variação híbrida (H) e regime hídrico (RH) para as
198 variáveis comprimento de caule (CC) e fenologia (FEN). Para as demais variáveis não foi
199 verificada interação significativa, sendo observados efeitos isolados do regime hídrico (RH)
200 para índice SPAD (SPAD), temperatura foliar (TF) e biomassa seca de parte aérea (BA) e efeito
201 isolado dos híbridos também para BA (Tabela 1).

202 As plantas mantidas sob restrição hídrica apresentaram um incremento de 145% no
203 índice SPAD (SPAD) em relação à condição de conforto hídrico (Tabela 1). Este resultado
204 corrobora com Fonseca *et al.* (2017), após submeter esses mesmos híbridos à restrição hídrica,
205 porém na fase de pré-floração. Contudo, Magalhães *et al.* (2009), registraram redução índice
206 SPAD de 42,36 para 35,32 sob deficiência hídrica em relação ao conforto hídrico. Na literatura
207 há controvérsia acerca do índice SPAD em resposta ao regime imposto à cultura; enquanto
208 alguns autores descrevem diminuição no seu valor, outros reportam incrementos em condições
209 de déficit hídrico, o que pode ser interpretado como uma resposta adaptativa aos agentes
210 estressantes. Para esses autores, acréscimos no índice SPAD em situação de restrição hídrica,
211 possivelmente, indica a ativação de um mecanismo de proteção ao aparato fotossintético e
212 aparenta ser uma implicação direta do próprio desenvolvimento dos cloroplastos, através da
213 ampliação no número de tilacóides ou, até mesmo, do aumento no número de cloroplastos. De
214 acordo com Araus *et al.*, (2012), para seleção de híbridos de milho tolerantes a seca, o índice
215 SPAD tem sido um caractere fisiológico muito utilizado, pois híbridos mais tolerantes ao déficit
216 hídrico apresentam melhor performance fotossintética sob condições de restrição hídrica.

217 Plantas submetidas ao déficit hídrico exibiram maior temperatura foliar quando
218 comparadas ao conforto hídrico (Tabela 1). Resultado semelhante foi observado por Liu *et al.*
219 (2010), que afirmam que a temperatura foliar pode refletir resistência à seca em milho sob
220 restrição hídrica e a diferença de temperatura das folhas pode ser considerada um indicador de
221 tolerância à seca ainda nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura. Em condição de déficit
222 hídrico, a taxa de absorção de água pela planta pode não coincidir com a taxa de transpiração e

223 como forma de manter o equilíbrio hídrico na planta há uma redução na abertura estomática para
224 assim minimizar a evapotranspiração, o que, por sua vez, leva a um aumento na temperatura
225 foliar.

226 Na condição de conforto hídrico o híbrido BRS1055 apresentou maior comprimento do
227 caule (CC) e na condição de restrição hídrica, o híbrido DKB390 apresentou maiores valores
228 para essa variável (Tabela 1). Em trabalho realizado por Kappes *et al.* (2009), o milho teve
229 49,23 a 74,51% de redução do comprimento da parte aérea quando submetido ao déficit hídrico,
230 porém essa redução variou de acordo com o genótipo testado, sendo que o híbrido BRS1055
231 apresentou diferença no CC em relação ao regime hídrico, sendo observados maiores valores na
232 condição de conforto hídrico, assim como apresentado no presente estudo. Para este genótipo,
233 portanto, o déficit hídrico influenciou na redução da altura das plantas. Rufino *et al.* (2012),
234 avaliando o desempenho de quatro híbridos de milho cultivados em déficit hídrico no estágio
235 vegetativo, constataram a redução na altura das plantas. Plantas submetidas a restrição hídrica
236 reduzem a abertura estomática e o crescimento, promovendo a redução no alongamento de
237 órgãos como caule (BENGOUGH *et al.*, 2011). O decréscimo da altura das plantas pode estar
238 relacionado ao nível de ácido abscísico (ABA), um hormônio que retarda o crescimento vegetal,
239 cuja concentração aumenta em plantas sob falta de água (SHARP; LENOBLE, 2002).

240 Para a variável fenologia (FEN) foi observada interação significativa entre os fatores
241 genótipo e regime hídrico. O desdobramento do regime hídrico dentro de cada híbrido
242 demonstrou que BRS1055 e DKB390 sob restrição hídrica apresentaram desenvolvimento
243 fenológico mais lento. A fenologia e produção da biomassa de parte aérea têm importantes
244 interações com a aquisição de recursos do solo (LYNCH, 2013).

245 Entre os híbridos estudados, BRS1010 apresentou maior valor para biomassa seca de
246 parte aérea (BA), assim como as plantas cultivadas em conforto hídrico (Tabela 1). Em
247 experimento realizado por Clemente (2017), não houve interação significativa entre híbridos e
248 regime hídrico para o caractere biomassa seca de parte aérea, demonstrando que a utilização
249 deste caractere na seleção de híbridos tolerantes pode não ser eficiente, mas pode apresentar
250 grande contribuição na identificação da severidade do estresse. Bonfim-Silva *et al.* (2011), ao
251 avaliarem o milho em estágio V4 e V5, observaram menor biomassa seca das plantas quando
252 em restrição hídrica (30% da capacidade de campo), o que permite inferir que para esses
253 híbridos, o caractere biomassa de seca de parte aérea revelou baixa tolerância à seca em seu
254 desenvolvimento inicial. De acordo com Liu *et al.* (2010), uma das primeiras respostas ao
255 déficit hídrico é a redução da abertura dos estômatos e a diminuição da taxa fotossintética,
256 devido a diminuição da captura de CO₂.

257

258 *Variáveis de Raiz*

259 Houve interação significativa entre híbridos (H) e regime hídrico (RH) para biomassa
260 seca de raiz (BR), área de superfície de raiz (ASR), volume de raiz (VR); assim como do regime
261 hídrico (RH) para comprimento de raiz (CR) e D_{95} . Diferença significativa também se registrou
262 entre híbridos (H) para as variáveis CR, BR, ASR e VR (Tabela 2).

263 O híbrido BRS1010 apresentou maior valor para comprimento de raiz (CR) (Tabela 2).
264 O comprimento máximo das raízes é afetado pelas condições ambientais, mas também
265 influenciado pela genética (WIJEWARDANA *et al.*, 2015). Para o milho foi demonstrado em
266 trabalho desenvolvido por Ali *et al.* (2016), que maior comprimento de raiz proporciona um
267 aumento na tolerância à seca, sendo este então considerado um ótimo caractere a ser observado
268 na escolha de híbridos tolerantes a restrição hídrica. Martins (2012), ao estudar a tolerância do
269 milho à seca, sugere o comprimento de raiz como um indicador que melhor diferencia as
270 linhagens tolerantes das sensíveis ao estresse hídrico. Para o regime hídrico (RH), observa-se
271 que as plantas em conforto hídrico apresentaram uma média de CR 17,96 % maior comparado
272 àquelas sob restrição. Este resultado corrobora com os encontrados por Zhan *et al.* (2015), ao
273 registrar em plantas de milho que a restrição hídrica diminuiu significativamente o comprimento
274 de raiz dos híbridos estudados.

275 A biomassa seca de raízes (BR) diferiu entre os híbridos e dentro de cada regime hídrico
276 (Tabela 2). No tratamento de conforto hídrico, os híbridos BRS1010 e o BRS1055 apresentaram
277 maior BR, todavia, para restrição hídrica, o híbrido BRS1010 foi superior. Este relato diverge
278 de Clemente (2017), que afirmou que a capacidade de produzir fotoassimilados é comprometida
279 quando híbridos sensíveis são submetidos à condição de estresse, levando a uma significativa
280 redução na produção de massa seca, tanto da parte aérea quanto da raiz. Somente para o híbrido
281 BRS1055 houve diferença quanto à condição regime hídrico; no conforto hídrico a BR foi
282 39,45% maior quando comparada a restrição. Provavelmente, os maiores valores de biomassa
283 seca de raiz encontrados na condição com restrição hídrica estão relacionados à grande alocação
284 de carbono às raízes. Ainda assim, Santos *et al.* (2012) afirmam que tal fato depende da
285 intensidade e duração do déficit hídrico, assim como do estágio em que ele ocorre.

286 Para área de superfície de raiz (ASR), na condição de conforto hídrico, os híbridos
287 BRS1010 e BRS1055 apresentaram maiores valores, enquanto na condição de restrição o
288 híbrido BRS1010 foi superior. Este resultado discorda com o encontrado por Magalhães *et al.*
289 (2015), que verificaram maiores valores de ASR para o genótipo BRS1055 mantido sob
290 condições de restrição hídrica e não verificando diferença entre os híbridos quando mantidos
291 sob conforto hídrico. Somente o híbrido BRS1055 apresentou diferença de ASR quanto ao
292 regime hídrico imposto, sendo que a média para condição de conforto hídrico foi 37,23%
293 superior à condição de restrição. Assim como o comprimento das raízes, a área de superfície de
294 raiz também é utilizada para caracterizar o sistema radicular e avaliar seu tamanho funcional

295 (COSTA *et al.*, 2002). Essas características são úteis para prever a capacidade de absorção de
296 nutrientes e o desempenho sob condições de restrição hídrica (WIJEWARDANA *et al.*, 2015).

297 O diâmetro médio de raiz (DMR) não foi influenciado pelas fontes de variação testadas
298 neste estudo, o que pressupõe ser esta uma característica de pouca variabilidade em tais
299 condições, sofrendo pouca influência ambiental e genotípica. Os resultados obtidos nesse estudo
300 não correspondem àquele relatado por Cantão *et al.* (2008), que verificaram maior proporção de
301 raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm em seu estudo com linhagens de milho tolerantes à seca
302 cultivadas em campo.

303 Para volume de raízes (VR) ocorreu diferença significativa para híbrido dentro de cada
304 regime hídrico (Tabela 2). Para a condição conforto hídrico, BRS1010 e o BRS1055
305 apresentaram os maiores valores de VR, quando em restrição hídrica o híbrido BRS1010
306 apresentou maior VR.

307 As plantas em restrição hídrica apresentaram D₉₅ de 65,44 cm e sob conforto hídrico
308 D₉₅ de 60,30 cm, demonstrando que, independentemente do genótipo, as plantas em restrição
309 exploram uma profundidade 8,52% maior no perfil do solo em relação àquelas mantidas em
310 condição de conforto hídrico (Tabela 2). Trabalho realizado por Fan *et al.* (2016) relata que a
311 zona de maior distribuição de raízes de milho estimada por D₉₅ situa-se entre 50-100 cm, o que
312 condiz com os resultados obtidos no presente trabalho. De acordo com Monshausen e Gilroy
313 (2009), as raízes das plantas de diferentes espécies são capazes de detectar gradientes de
314 umidade e ajustar seu crescimento na exploração de regiões com maior disponibilidade em
315 água, por meio do fenômeno denominado hidrotropismo. No entanto, Cole e Mahall (2006) não
316 constataram o crescimento das raízes em direção a locais com disponibilidade de água, mesmo
317 em solo com gradientes de umidade muito acentuados, o que sugere que a variável em questão
318 não seria um indicador apropriado para distinguir híbridos quanto à tolerância ao déficit hídrico.

319 A relação raiz/parte aérea da biomassa seca, assim como diâmetro de raiz, não foi
320 influenciada pelas fontes de variação testadas neste estudo. Para as plantas cultivadas em
321 restrições e conforto hídrico, as médias da relação raiz/parte aérea foram 2,18 e 1,83
322 respectivamente.

323 As variáveis SPAD, TF, CC, BPA, CR, BR, ASR e D₉₅ responderam de forma
324 significativa ao déficit hídrico, contudo DMR, VR, R/PA e CRA mantiveram-se inalteradas
325 independentemente da condição hídrica, sendo consideradas características constitutivas do
326 híbrido (KAMOSHITA *et al.*, 2008).

327 A análise de variância multivariada (MANOVA) não foi significativa ($p < 0,05$) para a
328 interação híbridos e regime hídrico, indicando que os fatores atuam de forma isolada ao
329 considerar a análise de forma multivariada (Tabela 3).

330 As duas primeiras variáveis canônicas (VC) explicaram 81,46% da variação observada;
331 o que permite distinguir de maneira satisfatória a diferença entre os tratamentos por um gráfico

332 de dispersão bidimensional, observando-se a formação de quatro grupos distintos (Figura 1). O
333 primeiro grupo formado pelos híbridos BRS1010 e BRS1055 em conforto hídrico. O segundo
334 grupo também sob conforto hídrico foi composto pelo híbrido DKB390. O terceiro agrupamento
335 foi formado pelos tratamentos DKB390 e BRS1055 sob restrição hídrica e último grupo pelo
336 tratamento BRS1010 sob restrição hídrica.

337 A variável canônica 1 (VC1) explicou 66,04% da variação obtida, sendo que as
338 características com maior contribuição foram SPAD, fenologia, temperatura foliar e o diâmetro
339 médio de raiz (Tabela 4). Considerando-se a alta correlação negativa destas variáveis com a
340 VC1, a dispersão gráfica indica que todos os híbridos quando submetidos à restrição hídrica
341 tenderam a apresentarmaiores valores para SPAD, temperatura foliar, diâmetro médio de raiz e
342 o desenvolvimento fenológico mais lento uma vez que, estão posicionados no quadrante
343 negativo (esquerda) do eixo da VC1. Sousa *et al.* (2018), ao estudar a aplicação da multivariada
344 no estudo do déficit hídrico em milho, afirma que diversas características relevantes podem ser
345 incluídas na seleção de híbridos tolerantes à seca, como índice SPAD, temperatura da folha,
346 análise de crescimento da planta, profundidade e volume de raízes. Estas características podem
347 estar correlacionadas com rendimento de culturas (ALI *et al.*, 2017).

348 A segunda variável (VC2) canônica explicou 15,42% da variação entre os tratamentos e
349 os caracteres de maior relevância foram biomassa seca de raiz, comprimento de raiz, área de
350 superfície de raiz, volume de raiz e relação raiz/parte aérea. Ao estudar déficit hídrico em sorgo,
351 Bibi *et al.* (2012), verificaram através de análise multivariada que maior comprimento de raiz e
352 maior comprimento da parte aérea, associados com menor potencial hídrico foliar, podem ser
353 utilizados como critérios de seleção para a tolerância a seca em sorgo na fase vegetativa. As
354 médias desses atributos se apresentaram superiores no híbrido BRS1010 com restrição hídrica
355 em relação aos demais híbridos avaliados.

356

357 **CONCLUSÕES**

358 Índice SPAD, temperatura foliar, comprimento de caule, biomassa seca de parte aérea,
359 comprimento de raiz, biomassa seca de raiz, área de superfície de raiz e D95 apresentaram-se
360 como indicadores resposta ao déficit hídrico. Os indicadores resposta que melhor explica a
361 diferença entre híbridos nos regimes hídricos avaliados foram: índice SPAD, temperatura foliar,
362 fenologia e diâmetro médio de raiz.

363

364 **AGRADECIMENTOS**

365 Os autores agradecem ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo- Empresa
366 Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPMS-EMBRAPA) na pessoa do pesquisador Dr. Paulo
367 César Magalhães, pela realização das análises no sistema WinRHIZO.

368

369 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

370 ABENDROTH, L. J.; ELMORE, R. W.; BOYER, M. J.; MARLAY, S. K. *Corn growth and*
371 *development*. PMR 1009 ed. Iowa: Iowa State University Extension, Ames, 2011. 50 p.

372

373 ADEBO, F.; OLAOYE, G. Growth indices and grain yield attributes in six maize cultivars
374 representing two era of maize breeding in Nigeria. *Journal of Agricultural Research and*
375 *Development*, Nairobi, v. 14, n. 2, p. 11–25, 2015.

376

377 ALI, F.; AHSAN, M.; ALI, Q.; KANWAL, N. Phenotypic Stability of *Zea mays* Grain Yield
378 and Its Attributing Traits under Drought Stress. *Frontiers in plant science*, Lausanne, v. 8, p.
379 1397, 2017.

380

381 ALI, M. L.; LUETCHENS, J.; SINGH, A.; SHAVER, T. M.; KRUGER, G. R.; LORENZ, A. J.
382 Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their
383 association with grain yield under water-deficit conditions in the field. *Euphytica*, Wageningen,
384 v. 207, n. 1, p. 79–94, 2016.

385

386 ARAUS, J. L.; SERRET, M. D.; EDMEADES, G. Phenotyping maize for adaptation to drought.
387 *Frontiers in physiology*, Lausanne, v. 3, p. 1-20, 2012.

388

389 BEIRAGI, M. A.; EBRAHIMI, M.; MOSTAFAVI, K.; GOLBASHY, M.; KHORASANI, S. K.
390 A study of morphological basis of corn (*Zea mays* L.) yield under drought stress condition using
391 correlation and path coefficient analysis. *Journal of Cereals and Oilseeds*, Lagos, v. 2, n. 2, p.
392 32–37, 2011.

393

394 BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B.; HALLETT, P.; VALENTINE, T. Root elongation,
395 water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip
396 traits. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

397

398 BERGAMASCHI, H.; MATZENUER, R. O milho e o clima. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar,
399 2014. 84 p.

400

401 BIBI, A.; SADAQAT, H.; TAHIR, M.; AKRAM, H. Screening of sorghum (*Sorghum bicolor*
402 var Moench) for drought tolerance at seedling stage in polyethylene glycol. *The Journal of*
403 *Animal & Plant Sciences*, Lahore, v. 22, n. 3, p. 671–678, 2012.

404

405 BONFIM-SILVA, E. M.; DA SILVA, T. J. A.; CABRAL, C. E. A.; KROTH, B. E.;
406 REZENDE, D. Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico. *Revista*
407 *Caatinga*, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 180-186, 2011.

408 BURTON, A.L.; BROWN, K.M.; LYNCH, J.P. Phenotypic diversity of root anatomical and
409 architectural traits in *Zea* species. *Crop Science*, v. 53, p. 1042–1055, 2013.

410

411 CANTÃO, F. R. D. O.; DURÃES, F. O. M.; DE OLIVEIRA, A. C.; SOARES, Â. M.;
412 MAGALHÃES, P. C. Morphological attributes of root system of maize genotypes contrasting in
413 drought tolerance due to phosphorus stress. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v.
414 7, n. 02, p. 113–127, 2010.

415

416 CLEMENTE, D. I. *Estresse hídrico sobre caracteres morfofisiológicos e agrônômicos em*
417 *populações de milho*. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Agronomia, Universidade
418 Federal de Goiás, Jataí, 2017.

419

420 COLE, E. S.; MAHALL, B. E. A test for hydrotropic behavior by roots of two coastal dune
421 shrubs. *New phytologist*, Lancaster, v. 172, n. 2, p. 358–368, 2006.

422

423 COOPER, M.; GHO, C.; LEAFGREN, R.; TANG, T.; MESSINA, C. Breeding drought-tolerant
424 maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *Journal of Experimental Botany*,
425 Oxford, v. 65, n. 21, p. 6191–6204, 2014.

426

427 COSTA, C.; DWYER, L. M.; ZHOU, X.; DUTILLEUL, P.; HAMEL, C.; REID, L. M.;
428 SMITH, D. L. Root morphology of contrasting maize genotypes. *Agronomy Journal*, Madison,
429 v. 94, n. 1, p. 96–101, 2002.

430

431 FAN, J.; MCCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate
432 agricultural crops. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 189, p. 68–74, 2016.

433

434 FONSECA, T. M. ; MAGALHÃES, P. C. Interferência do déficit hídrico na produtividade e acúmulo de
435 sólidos solúveis em genótipos de milho contrastantes a seca.. **In:** SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO
436 CIENTÍFICA PIBIC/BIC JÚNIOR, 12, 2017, Sete Lagoas. *Anais do SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO*
437 *CIENTÍFICA PIBIC/BIC JÚNIOR*, 12. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2017. v. 1. p. 1-1.

438

439 KAMOSHITA, A.; RODRIGUEZ, R.; YAMAUCHI, A.; WADE, L. Genotypic Variation in
440 Response of Rainfed Lowland Rice to Prolonged Drought and Rewatering. *Plant Production*
441 *Science*, Tokyo, v. 7, n. 4, p. 406–420, 1 jan. 2004.

442
443 KAMOSHITA, A.; BABU, R. C.; BOOPATHI, N. M.; FUKAI, S. Phenotypic and genotypic
444 analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed
445 environments. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 109, n. 1-3, p. 1-23, 2008.
446
447 KAPPES, C.; CAMILLO DE CARVALHO, M. A.; MITSUO YAMASHITA, O.; NETO DA
448 SILVA, J. A. Influência do nitrogênio no desempenho produtivo do milho cultivado na segunda
449 safra em sucessão à soja. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 39, n. 3, 2009.
450
451 LAVINSKY, A. O.; MAGALHÃES, P. C.; ÁVILA, R. G.; DINIZ, M. M.; DE SOUZA, T. C.
452 Partitioning between primary and secondary metabolism of carbon allocated to roots in four
453 maize genotypes under water deficit and its effects on productivity. *The Crop Journal*, Madison,
454 v. 3, n. 5, p. 379–386, 1 out. 2015.
455
456 LIU, Y.; SUBHASH, C.; YAN, J.; SONG, C.; ZHAO, J.; LI, J. Maize leaf temperature
457 responses to drought: Thermal imaging and quantitative trait loci (QTL) mapping.
458 *Environmental and Experimental Botany*, Oxford, v. 71, n. 2, p. 158–165, 2010.
459
460 LYNCH, J. P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize
461 root systems. *Annals of Botany*, London, v. 112, n. 2, p. 347–357, 2013.
462
463 MAGALHAES, P.; LAVINSKY, A.; AVILA, R.; ALVES, J.; MELO, M.; GOMES JUNIOR,
464 C.; MELO, H. *Caracterização do sistema radicular e dos componentes da produtividade em*
465 *quatro genótipos de milho cultivados sob déficit hídrico*. Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de
466 Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), , 2015. Disponível em:
467 <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1012076>>. Acesso em: 14 ago.
468 2018.
469
470 MAGALHÃES, P. C.; DE SOUZA, T. C.; DE ALBUQUERQUE, P. E. P.; KARAM, D.;
471 MAGALHÃES, M. M.; CANTÃO, F. R. D. O. Caracterização ecofisiológica de linhagens de
472 milho submetidas à baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. *Revista Brasileira de*
473 *Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 8, n. 03, p. 223-232, 2009.
474

475 MARTINS, A. O. *Inferências genético-fisiológicas da tolerância à seca em milho*. 2012. 122 f.
476 Tese (Doutorado) – Curso de Genética e Melhoramento de Plantas, Centro de Ciências e
477 Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
478 Campos dos Goytacazes, 2012.
479
480 MONSHAUSEN, G. B.; GILROY, S. The exploring root—root growth responses to local
481 environmental conditions. *Current opinion in plant biology*, London, v. 12, n. 6, p. 766–772,
482 2009.
483
484 MUTAVA, R.; PRASAD, P.; TUINSTRA, M.; KOFOID, K.; YU, J. Characterization of
485 sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.
486 123, n. 1, p. 10–18, 2011.
487
488 R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for
489 Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016. < URL <https://www.R-project.org/>. >
490
491 RUFINO, C. de A.; TAVARES, L. C.; VIEIRA, J.; DÖRR, C.; VILLELA, F.; BARROS, A.
492 Desempenho de genótipos de milho submetidos ao déficit hídrico no estágio vegetativo.
493 *Magistra*, Cruz das Almas, v. 24, n. 3, p. 217–225, 2012.
494
495 SANTOS, D. dos; GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; FIOREZE, S. L.; JUNIOR, M.; EURIDES,
496 K. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de
497 vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.8,
498 p. 836–842, 2012.
499
500 SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. The global biogeography of roots. *Ecological monographs*,
501 Washington v. 72, n. 3, p. 311–328, 2002.
502
503 SHARP, R. E.; LENOBLE, M. E. ABA, ethylene and the control of shoot and root growth
504 under water stress. *Journal of experimental botany*, Oxford, v. 53, n. 366, p. 33–37, 2002.
505
506 SOUSA, R. S. de; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; PEREIRA, D. R. Identification of
507 drought-tolerant corn genotypes by multivariate analysis. *Pesquisa Agropecuária Tropical*,
508 Goiânia, v. 48, n. 3, p. 204–211, 2018.
509

510 TEIXEIRA, F. F.; GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; ANDRADE, C. L. T. de;
511 LEITE, C. E. P.; PARENTONI, S. N.; GUIMARÃES, P. E. de O.; GUIMARÃES, L. J. M.;
512 SILVA, A. R.; BASTOS, E. A. Evaluation of maize core collection for drought tolerance. *Crop*
513 *Breeding and Applied Biotechnology*, Londrina, v. 10, n. 4, p. 312–320, 2010.
514
515 WERTHERLEY, P. E. Studies in the water relations of cotton plants. I. The field measurement
516 of water deficit in leaves. *New phytologist*, Lancaster, v. 49, p. 81–87, 1950.
517
518 WIJEWARDANA, C.; HOCK, M.; HENRY, B.; REDDY, K. R. Screening corn hybrids for
519 cold tolerance using morphological traits for early-season seeding. *Crop Science*, Madison, v.
520 55, n. 2, p. 851–867, 2015.
521
522 ZHAN A, SCHNEIDER H, LYNCH JP. Reduced Lateral Root Branching Density Improves
523 Drought Tolerance in Maize. *Plant Physiol*, v. 168, n. 4, p.:1603-15, 2015.
524
525 ZHU, J.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Root cortical aerenchyma improves the drought
526 tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant, cell & environment*, Oxford, v. 33, n. 5, p. 740–749,
527 2010.
528
529

530 **Tabela 1.** Resumo dos quadrados médios e testes de médias no estudo de três híbridos (H)
 531 cultivados em dois regimes hídricos (RH) e suas interações (RH*H) para indicadores de parte
 532 aérea. Janaúba - MG, 2017.
 533

FV	CRA %		SPAD Un. SPAD		TF °C	
	Quadrados médios					
H	303,55 ^{ns}		25,06 ^{ns}		8,15 ^{ns}	
RH	28,40 ^{ns}		5259,96**		59,95**	
H*RH	32,60 ^{ns}		13,91 ^{ns}		2,55 ^{ns}	
Média	88,65		20,33		33,22	
	Médias de tratamento					
H						
BRS1010	88,35 a		20,52 a		33,27 a	
BRS1055	85,25 a		19,22 a		32,62 a	
DKB390	93,34 a		21,24 a		33,78 a	
RH						
C	89,28 a		11,78 b		32,31 b	
R	88,02 a		28,88 a		34,13 a	
R*H						
	C	R	C	R	C	R
BRS1010	89,95 aA	86,76 aA	12,05 aB	28,99 aA	32,20 aB	34,41 aA
BRS1055	84,58 aA	85,91 aA	9,88 aB	28,57 aA	32,08 aB	33,15 aA
DKB390	93,30 aA	91,39 aA	13,41 aB	29,07 aA	32,65 aB	34,91 aA
	CC cm		FEN dias V5		BPA g	
	Quadrados médios					
H	3,45 ^{ns}		0,68 ^{ns}		0,06**	
RH	40,80**		10,12**		0,03*	
H*RH	27,53**		1,79*		0,01 ^{ns}	
Média	17,15		41,48		0,26	
	Médias de tratamento					
H						
BRS1010	16,73 a		41,58 a		0,31 a	
BRS1055	17,47 a		42,00 b		0,26 ab	
DKB390	17,24 a		42,00 b		0,214 b	
RH						
C	17,90 a		41,11 b		0,28 a	
R	16,39 b		41,86 a		0,24 b	
R*H						
	C	R	C	R	C	R
BRS1010	18,06 abA	15,40 bB	41,33 aA	41,58 aA	0,33 aA	0,29 aB
BRS1055	18,88 aA	16,06 abB	40,66 aB	42,00 aA	0,31 aA	0,21 bB
DKB390	16,75bA	17,75 aA	41,33 aB	42,00 aA	0,21 bA	0,21 bB

534 Regime hídrico (RH): conforto hídrico (C) e restrição hídrica (R). Indicadores avaliados: conteúdo
 535 relativo de água (CRA), índice SPAD (SPAD), temperatura foliar (T.F), comprimento do caule (CC), e
 536 biomassa seca de parte aérea (BA). Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas
 537 nas linhas (interações) não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). P< 0,01 (**), P< 0,05 (*),
 538 P>0,05 (^{ns}).
 539
 540
 541

542 **Tabela 2.** Resumo dos quadrados médios e testes de médias no estudo de três híbridos (H)
 543 cultivados em dois regimes hídricos (RH) e suas interações (RH*H) para indicadores de raiz em
 544 milho. Janaúba - MG, 2017.

545

FV	CR Cm		BR g		ASR cm ²		DMR mm	
Quadrados médios								
H	20564401,1**		0,27**		294042,69**		0,01 ^{ns}	
RH	3619774,8*		0,01 ^{ns}		25416,06 ^{ns}		0,01 ^{ns}	
H*RH	2188687,1 ^{ns}		0,07*		44715,36*		0,007 ^{ns}	
Média	3140,93		0,45		406,81		0,59	
Médias de tratamento								
H								
BRS1010	4227 a		0,56 a		0,56 a		0,56 a	
BRS1055	3105 b		0,48 a		0,48 a		0,61 a	
DKB390	2090 c		0,32 b		0,32 b		0,64 a	
RH								
C	3399 a		0,47 a		428,51 a		0,57 a	
R	2882 b		0,43 a		285,12 a		0,60 a	
H*RH								
	C	R	C	R	C	R	C	R
BRS1010	4577 Aa	3877Aa	0,59 aA	0,53 aA	571 aA	500 aA	0,57 Aa	0,56 Aa
BRS1055	3658 Aa	2552 Bb	0,56 aA	0,40 abB	469 aA	341 bB	0,55 Aa	0,61 Aa
DKB390	1964 Ba	2217 Ba	0,27 bA	0,37 bA	247 bA	314 bA	0,59 Aa	0,64 Aa
FV	VR cm ³		D95 cm		R/PA			
Quadrados médios								
H	27,05**		42,61 ^{ns}		2,01 ^{ns}			
RH	0,54 ^{ns}		356,04*		1,61 ^{ns}			
H*RH	6,07*		131,29 ^{ns}		0,07 ^{ns}			
Média	4,30		62,87		2,00			
Médias de tratamento								
H								
BRS1010	5,52a		64,48a		2,05a			
BRS1055	4,33b		62,70a		2,62a			
DKB390	3,07c		61,42a		1,87a			
RH								
C	4,40a		60,30b		1,83a			
R	4,20a		65,44a		2,18a			
H*RH								
	C	R	C	R	C	R	C	R
BRS1010	5,79 aA	5,24 aA	64,19 Ab	68,26 Aa	1,78 Aa	2,05 Aa		
BRS1055	4,90 aA	3,75 bA	59,56 Aa	64,78 Aa	2,14 Aa	2,62 Aa		
DKB390	2,52 bA	3,61 bA	57,15 Aa	63,27 Aa	1,64 Aa	1,87 Aa		

546 Regime hídrico (RH): conforto hídrico (C) e restrição hídrica (R). Indicadores avaliados: comprimento de
 547 raiz (CR), biomassa seca de raiz (BR), área de superfície de raiz (ASR), diâmetro médio de raiz (DMR),
 548 volume de raiz (VR), profundidade acima do qual 95% das raízes foram localizadas no tubo (D95), razão
 549 de biomassa seca raiz/parte aérea (R/PA). Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas e
 550 maiúsculas nas linhas (interações) não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). P≤ 0,01 (**),
 551 P≤0,05 (*), P≤0,05 (^{ns}).

552

553 **Tabela 03** - Análise de variância multivariada para características quantitativas avaliadas em
 554 híbridos de milho cultivados em dois regimes hídricos. Janaúba-MG, 2017.
 555

FV	Df	Pillai	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
Hibrido	2	1,4591	3,7089	32	44	<0,01**
Regime Hídrico	1	0,9505	25,1919	16	21	<0,01**
Bloco	2	1,3073	2,5949	32	44	<0,01**
HibridoXRegime Hídrico	2	0,9931	1,3562	32	44	0,17 ^{ns}

556 $P \leq 0,01$ (**), $P \leq 0,05$ (*), $P > 0,05$ (^{ns}).

557

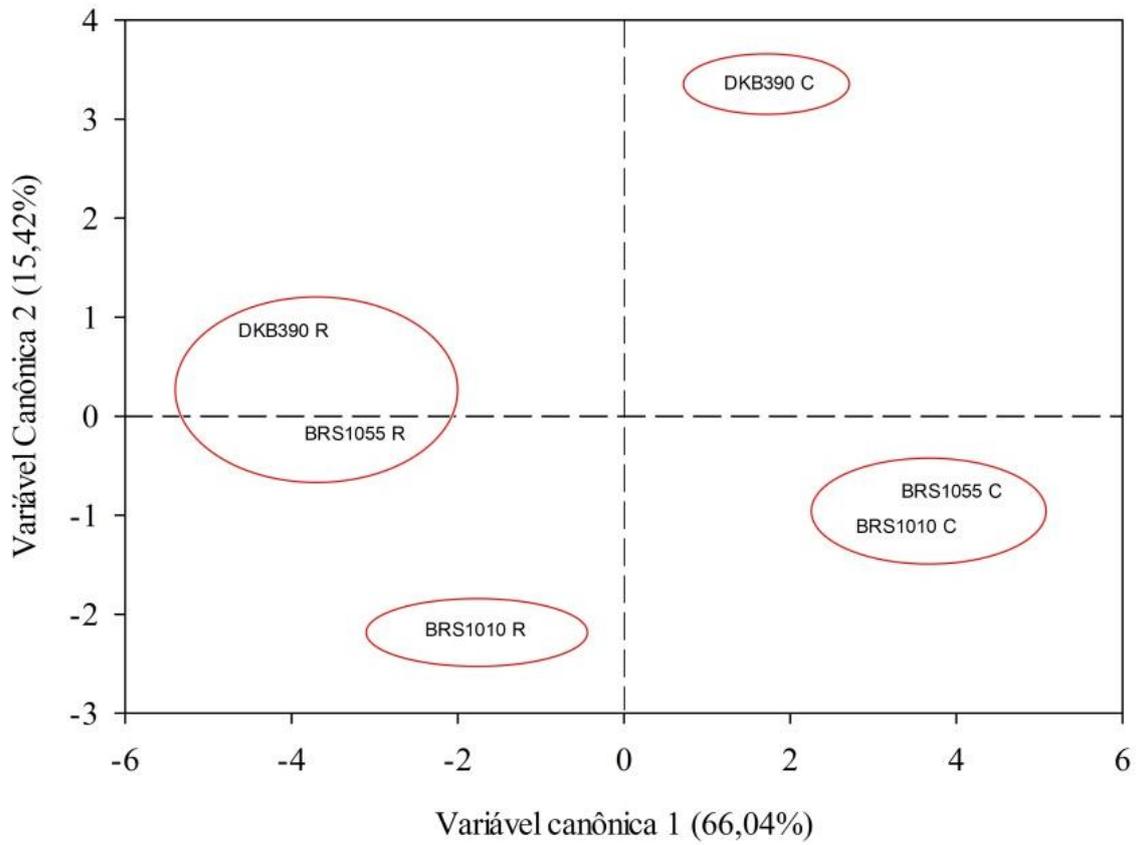
558 **Tabela 04** - Correlações de Pearson entre as variáveis estudadas e os escores das duas primeiras
 559 variáveis canônicas no estudo de híbridos comerciais de milho cultivados sob dois regimes
 560 hídricos Janaúba-MG, 2017.

561

Descritores quantitativos	Variável canônica	
	1	2
Índice SPAD	-0,98	-0,18
Comprimento de caule	0,41	0,32
Conteúdo relativo de água	0,10	0,64
Biomassa seca de parte aérea	0,68	-0,62
Temperatura Foliar	-0,84	-0,14
Fenologia V5	-0,93	0,01
D95	-0,54	-0,46
Biomassa seca de raiz	0,41	-0,89
Comprimento de raiz	0,51	-0,82
Área de superfície de raiz	0,43	-0,86
Volume de raiz	0,34	-0,91
Diâmetro médio de raiz	-0,75	0,44
Relação Raiz/Parte aérea	0,07	-0,81

562

563 **Figura 1** - Dispersão gráfica de variáveis canônicas VC1 e VC2 no estudo de três híbridos de
564 milho e dois regimes hídricos. Janaúba-MG, 2017



565

**ARTIGO 2 - ARQUITETURA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA
RADICULAR EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB DUAS CONDIÇÕES
HÍDRICAS**

Artigo redigido conforme normas da Revista Caatinga

ARQUITETURA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR EM HÍBRIDOS DE MILHO SOB DUAS CONDIÇÕES HÍDRICAS

RESUMO: Por ser uma mesófito, o milho é uma planta sensível ao déficit hídrico, podendo sofrer redução no rendimento de biomassa e grãos dependendo da intensidade e duração do déficit hídrico durante o seu ciclo e também do hídrico utilizado. As raízes desempenham papel-chave na aquisição de água estando sua morfologia relacionada à adaptação da planta em ambientes com restrição hídrica. O objetivo do presente estudo foi verificar se o déficit hídrico interfere no desenvolvimento do sistema radicular em híbridos de milho. Sementes dos híbridos BR1055 e DKB-390 (tolerantes à seca) e BRS1010 (sensível à seca) foram germinadas em vasos com delineamento em blocos casualizado em fatorial 3 x 2. O ensaio foi realizado em casa de vegetação em dois regimes hídricos; conforto hídrico e restrição hídrica. O solo utilizado foi um neossolo quartzarênico misturado com um fertilizante comercial. As características da raiz foram avaliadas quando as plantas possuíam cinco folhas. Sob restrição hídrica os híbridos responderam de forma diferenciada para arquitetura e desenvolvimento de raiz, nas características ângulo de raiz nodal no primeiro (ARNV1) e no segundo verticilo (ARNV2), número de verticilos no mesocótilo (NVM), biomassa seca de raiz, diâmetro de raiz, densidade de comprimento de raiz e área de superfície de raiz. DKB390 em restrição hídrica apresentou maior ARNV1, menor número de raízes nodais no verticilo 2 e este híbrido expressou menor DCR nas diferentes profundidades, independentemente do regime hídrico. ARNV1, ARNV2 e NVM foram as características que mais contribuíram para a variação obtida no sistema radicular do milho sob déficit hídrico.

Palavras-chave: *Zea mays* L. BRS1010. BRS1055. DKB390.

ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT OF THE RADICAL SYSTEM IN MAIZE HYBRIDS UNDER TWO WATER CONDITIONS.

ABSTRACT: Being a mesophyte, corn is a plant sensitive to water deficit, and may suffer a reduction in the yield of biomass and grains depending on the intensity and duration of the water deficit during its cycle and also of the genotype used. The roots play a key role in the acquisition of water and its morphology is related to the adaptation of the plant in environments with water restriction. The objective of the present study was to verify if the water deficit interferes in the development of the root system in maize hybrids. Seeds of BR1055 and DKB-390 (drought tolerant) and BRS1010 (drought tolerant) hybrids were germinated in a randomized block design in

a 3 x 2 factorial design. The experiment was carried out in greenhouse at two water regimes; water comfort and water restriction. The soil was Quartzeneic Neosol mixed with a commercial fertilizer. Root characteristics were evaluated when the plants had 5 leaves. Under water restriction the hybrids responded differently to root architecture and development, in the characteristics nodal root angle in the first (ARNV1) and in the second whirlpool (RNAV2), number of verticillum in the mesocotyl (NVM), root dry biomass, diameter of root, root length density and root surface area. DKB390 in water restriction presented higher RNAV1, lower number of nodal roots in verticillum 2 and this hybrid expressed lower DCR in the different depths, independent of the water regime. ARNV1, ARNV2 and NVM were the characteristics that contributed most to the variation obtained in the root system of maize under water deficit.

Keywords: *Zea mays* L. BRS1010. BRS1055. DKB390.

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um dos mais importantes cereais no mundo, depois do arroz e do trigo. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a área de 2018/2019 dedicada à produção de milho no mundo está prevista em 184 milhões de hectares e rendimento médio de 5,72 toneladas por hectare.

Considerando o seu potencial produtivo, o rendimento em grãos nas regiões semiáridas é baixo devido à irregularidade pluviométrica e à ocorrência de veranicos em estádios críticos de desenvolvimento da cultura. Portanto, o desenvolvimento de cultivares toleranta à seca tem sido explorado em muitos programas de melhoramento para essa cultura. Neste cenário, sendo as raízes o órgão responsável pela aquisição de água passam a receber importância de destaque devido à provável relação da sua estrutura na adaptação das plantas a ambientes com restrição hídrica (LYNCH; CHIMUNGU; BROWN, 2014; PAEZ-GARCIA, 2015).

A plasticidade fenotípica do crescimento e desenvolvimento das raízes em resposta à mudança da umidade do solo oferece oportunidades para explorar a variabilidade natural para identificar características estratégicas da raiz. (KANO *et al.*, 2011). Assim, a identificação e a compreensão de atributos fenotípicos do sistema radicular associados à tolerância à seca são essenciais nos estudos para tolerância ao déficit hídrico (LYNCH; CHIMUNGU; BROWN, 2014).

Variações morfoanatômicas na raiz podem refletir em mecanismos de absorção e conservação eficiente da água (ZHU; BROWN; LYNCH, 2010; GE *et al.*, 2012). No milho, foi

demonstrado que maior comprimento de raiz (ALI *et al.*, 2016) e menos raízes laterais (ZHAN; SCHNEIDER; LYNCH, 2015) aumentam a tolerância a restrição hídrica.

Há substancial variação genética e fenotípica para a arquitetura de raiz, o que dá oportunidade para seleção de híbridos com características diferenciais. Poucos estudos, no entanto, exploram órgãos subterrâneos como objeto de estudo visando à seleção para déficit hídrico devido à dificuldade de acesso e de mensuração da sua estrutura. De herança poligênica, a tolerância ao déficit hídrico decorre da ação conjunta e inter-relacionadas de características de expressão quantitativa, que são influenciadas pelo meio ambiente de crescimento (CRUZ, 2006). Segundo Tobar-Tosse *et al.* (2015), para obtenção de genótipos superiores é necessário considerar a ação conjunta de características que combinem as múltiplas funções expressas na unidade experimental.

Na avaliação de características de tolerância à seca, se faz necessário o emprego de métodos multivariados, pois possibilita que o estudo seja feito considerando grande número de características simultaneamente, contribuindo efetivamente para identificação de genótipos para serem utilizados nos programas de melhoramento. Dentre esses métodos, pode ser utilizada a análise por variáveis canônicas (SUDRÉ *et al.*, 2007).

A plasticidade na tolerância do milho a limitação hídrica pode manifestar-se em fases distintas do seu desenvolvimento, tendo sido relatadas as respostas ao déficit hídrico em alguns estádios fenológicos. No entanto, estudos sobre o efeito do déficit hídrico no estágio vegetativo e sua influência no desenvolvimento da planta de milho ainda são limitados (RUFINO *et al.*, 2018).

O objetivo deste trabalho foi estudar se a condição hídrica interfere nos estádios iniciais de desenvolvimento do sistema radicular em híbridos de milho, quanto à sua arquitetura e crescimento aos 10 cm de profundidade e a densidade de comprimento de raiz no perfil da rizosfera.

MATERIAL E MÉTODOS

Híbridos comerciais de milho com rendimento contrastante ao cultivo sob restrição hídrica (DKB 390 e BRS 1055 tolerantes; BRS1010 sensível) foram avaliados quanto à resposta ao déficit de água na fase vegetativa do seu ciclo.

O experimento foi desenvolvido na Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes), *campus* de Janaúba-MG, no semiárido brasileiro, no período de julho a setembro de 2017 por três ciclos consecutivos com data de implantação espaçada de uma semana entre eles. Em cada ciclo os híbridos foram cultivados em vasos tubulares sob dois regimes hídricos, isto é, conforto (C) e

restrição (R), perfazendo seis tratamentos, num delineamento em blocos casualizados com quatro repetições em fatorial 3x2. O modelo estatístico adotado foi:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + b_k + d_{(ij)k} + e_{(ij)kl}, \text{ Em que:}$$

- y_{ijkl} é o valor observado na parcela que recebeu o híbrido i e regime hídrico j no bloco k e ciclo l
- μ é a média geral
- α_i é o efeito no nível i do fator a (Híbrido)
- β_j é o efeito no nível j do fator b (Regime hídrico)
- $(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos níveis i do fator a e nível j do fator b
- b_k é o efeito do bloco k
- $d_{(ij)k}$ é o efeito da interação entre a combinação do nível i do fator A, e nível j do fator B com o bloco k
- e_{ijkl} é o erro experimental na parcela que recebeu o híbrido i e regime hídrico j no bloco k e ciclo l.

Tubos de policloreto de polivinila (PVC) com dimensões de 1,0 m x 0,1m, foram revestidos internamente com filme de polietileno transparente de alta densidade, preenchidos com solo classificado como Neossolo Quartzarênico e tampados na sua parte inferior com tampa contendo uma perfuração.

No dia do plantio os vasos destinados ao conforto hídrico receberam água até a capacidade de campo (1,640 L) e os tubos correspondentes a restrição hídrica receberam 30% desse volume (0,490 L). Em cada tubo foram plantadas duas sementes a 5 cm de profundidade. No quarto dia após o plantio, cada tubo recebeu solução composta por 2,6 g fertilizante organomineral – Bravo Agrolatino (composição por litro: 8,5 g de N; 8,5 mg de P_2O_5 ; 8,5 mg de K_2O ; 0,5 mg de Fe; 0,5 mg de Mn, 0,5 mg de B, 0,2 mg de Cu, 1,00 mg Zn, 0,10 mg de Mo), diluídos em 100 mL de água.

A partir da adubação até a colheita, as plantas sob restrição hídrica não receberam mais água, enquanto o tratamento sob conforto hídrico foi mantido sob capacidade de campo. Os vasos foram mantidos na posição vertical no interior de casa-de-vegetação com telado antiafídeo e recobertos nas laterais com placas de poliestireno expansivo (isopor) a fim de atenuar a incidência de radiação. Para diminuir a evaporação na superfície exposta do substrato, a abertura superior de cada tubo foi recoberta com filme de polietileno transparente onde se abriu pequena fenda para

exposição da parte aérea emergente. Ao atingirem o estágio de emergência (VE) realizou-se o desbaste deixando-se uma planta por unidade experimental.

Variações do ambiente interno do telado foram obtidas com um medidor portátil Termohigroanemoluxímetro (Instrutemp - São Paulo, SP), em que se registrou no período a temperatura média de 35,85°C; irradiância de 1979 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e umidade relativa de 36,77%. As plantas foram colhidas quando se encontravam no estágio V5, quando então foram realizadas as avaliações do sistema radicular.

Na colheita, o sistema radicular foi cortado em seções de 10 cm de profundidade e cada uma foi retirada uma alíquota com volume de 100 cm^3 composta de solo e raízes, de onde se extraiu a massa úmida e seca. Cada amostra dos 10 cm de solo foi, então, lavada individualmente com água corrente separando as raízes que, então, foram conservadas em solução de etanol 70% e armazenadas sob refrigeração. As amostras foram analisadas no sistema WinRHIZO Pro 2007a (Régent Instr. Inc.), acoplado a um scanner profissional Epson XL 10000, equipado com unidade de luz adicional (TPU) e definição de 400 dpi, como descrito por Costa *et al.* (2002). Para tanto, cada amostra foi disposta em uma cuba de acrílico de 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, contendo água destilada, sendo avaliada em cada fração a densidade de comprimento de raiz (DCR – cm cm^{-3}), a área de superfície de raiz (ASR – cm^2) o diâmetro médio de raiz (DMR – mm) e volume de raiz (VR – cm^3).

Na fração do solo em que se encontrava o mesocótilo (primeiros 10 cm do tubo), após a lavagem cuidadosa das raízes foi avaliado o ângulo de inserção das raízes nodais no primeiro e segundo verticilos (ARNV) pelo método descrito por Trachsel *et al.* (2011), sendo também contabilizados o número de raízes nodais no primeiro e segundo verticilos (RNV) e número de verticilos no mesocótilo (NVM). Nestas mesmas raízes, foram avaliados separadamente nas raízes nodais (N) e raiz seminal principal (P) a DCR, ASR, DMR e VR. As amostras foram então levadas para a estufa para determinação de biomassa seca da raiz (BR g planta^{-1}).

Após confirmada a normalidade e homogeneidade de variâncias, os dados foram submetidos à análise de variância univariada e quando significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$), foram desdobrados pelo teste Tukey aos níveis de 1% e 5% de significância. Também foi aplicada a análise de variância multivariada (MANOVA) com o objetivo de verificar o agrupamento das respostas das plantas aos fatores de tratamento, considerando todo o conjunto de variáveis analisadas. Foi utilizada a função manova do pacote *stats*, com aplicação do teste de Pillai ao nível de 5% de significância. Posteriormente os dados foram submetidos à análise de variáveis canônicas (VC) com auxílio do pacote *candisc*. Todas as análises foram conduzidas com o software R (R CORE TEAM, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os caracteres de raiz relacionado à arquitetura aos 10 cm de profundidade, o número de raízes nodais no verticilo 2 (RNV2) apresentou resposta significativa para os híbridos (H) e regime hídrico (RH) (Tabela 1). O ângulo de raiz no verticilo 1 (ARNV1) diferiu entre os híbridos e regime hídrico, enquanto que ângulo de raiz no verticilo 2 (ARNV2) e número de verticilos no mesocótilo (NVM) foram influenciados exclusivamente pelo regime hídrico.

Tabela 1. Resumo dos quadrados médios e testes de comparações múltiplas para a arquitetura de raízes nodais aos 10 cm de profundidade, em híbridos de milho cultivado sob dois regimes hídricos. Janaúba - MG, 2017.

FV	ARNV1	ARNV2	NRS	NVM	RNV1	RNV2						
Quadrados médios												
H	398,28*	102,50 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,12 ^{ns}	3,24*						
RH	1307,24 *	311,32*	0,16 ^{ns}	6,68**	1,18 ^{ns}	1,85 ^{ns}						
H*RH	294,64 ^{ns}	151,60 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,24 ^{ns}	2,46 ^{ns}	4,57*						
Média Geral	34,66	35,56	2,09	2,31	2,62	3,70						
Médias de tratamento												
Híbridos												
BRS1010	35,83 ab	34,98	2,00	2,38	2,89	3,61 ab						
BRS1055	29,48 b	33,52	2,33	2,33	2,61	4,17 a						
DKB390	38,66 a	38,18	1,95	2,22	2,39	3,33 b						
Regime Hídrico												
C	29,74 b	33,16 b	2,14	2,66 a	2,49	3,88						
R	39,58 a	37,96 a	2,03	1,96 b	2,78	3,51						
Interação												
	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R
BRS1010	31,22	40,44	31,25	38,70	2,00	2,00	2,78	2,00	2,56	3,22	3,22 bA	4,00 aA
BRS1055	28,45	30,52	34,44	32,59	2,22	2,44	2,67	2,11	2,22	3,00	4,55aA	3,77ab A
DKB390	29,56	47,78	33,78	42,59	2,22	1,67	2,56	1,78	2,66	2,11	3,88abA	2,77 bB

Regime hídrico (RH): conforto (C) e restrição (R). ARNV1: ângulo de raiz no verticilo 1; ARNV2: ângulo de raiz no verticilo 2; NRS Número de raízes seminais; NVM: número de verticilos no mesocótilo; RNV1: número de raízes nodais no verticilo 1; RNV2: número de raízes nodais no verticilo 2. Médias seguidas de mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey . $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*), $P > 0,05$ (^{ns}).

O híbrido DKB390 apresentou maior ARNV1 quando comparado aos demais híbridos, independentemente do regime hídrico. O ângulo de raiz é um caractere que possui componente genético e tem sido usado na triagem inicial para características de raiz em programas de

melhoramento de cereais (UGA; OKUNO; YANO, 2011). Trachsel *et al.* (2013), afirmam que híbridos tolerantes ao déficit hídrico apresentam ângulos mais íngremes de inserções das raízes, caracterizando raízes mais profundas. Para Mace *et al.* (2012), híbridos com ângulos de crescimento acentuados são superiores para aquisição de água sob seca uma vez que, conseguem alcançar a água armazenada nas camadas mais profundas do solo. No milho, tem sido demonstrado que plantas com ângulo de crescimento de raiz mais íngreme, tendem a apresentar raízes mais profundas (ALI *et al.*, 2016).

Maiores ARNV1 e ARNV2 foram observados nas plantas cultivadas sob restrição hídrica, independentemente do híbrido. O inverso ocorreu para o número de verticilos presentes no mesocótilo (NVM), para os quais maiores quantidades foram registradas nas plantas em conforto hídrico. Uga *et al.* (2013) demonstraram que ao alterarem a sua estrutura para aumento no ângulo de crescimento radicular, plantas adeptas a estratégia de evitar a seca, conseguiam explorar água em camadas mais profundas do solo, o que permitiria melhoras significativas na taxa fotossintética e no rendimento de grãos. De acordo com Lynch (2013), ângulos de crescimento de raízes íngremes aumentam a captura de N sob condições de lixiviação, bem como a captação de água sob seca. Estes resultados suportam a inclusão do ângulo radicular como critério de seleção em programas de melhoramento de milho. O NVM influencia os ângulos superficiais de crescimento, que por sua vez, está relacionado à arquitetura de raiz e consequente aquisição de recursos do solo como a água (LYNCH; BROWN, 2012). De acordo com Miguel *et al.* (2013), múltiplos verticilos de raízes expandem a faixa vertical de exploração do solo.

Sob conforto hídrico, o híbrido BRS1055 superou em número de raízes nodais no verticilo 2 o BRS1010 (Tabela 1). Sob restrição, contudo, BRS1010 superou o DKB390, que expressou o menor número o número de raízes verticilo 2. Grande número de raízes nodais pode provocar uma competição entre estas pelos recursos do solo, bem como por recursos metabólicos, resultando em redução do alongamento celular e gasto metabólico em condição de restrição hídrica (LYNCH, 2013). As raízes nodais são importantes na captura de recursos do solo, Gao e Lynch (2016), ao avaliarem o número de raízes nodais em plantas de milho também cultivadas em mesocosmos, verificaram que plantas cultivadas em restrição hídrica apresentaram menor número de raízes nos verticilos, maior teor relativo de água e maior rendimento que híbridos com maior número de raízes nos verticilos. Estes mesmos autores afirmam que a reduzida quantidade de raízes nodais melhora a aquisição de água sob estresse hídrico, aumentando a exploração do solo em profundidade sendo, portanto, uma adaptação positiva das plantas ao estresse hídrico.

Para o desenvolvimento de raízes, verificou-se resposta significativa ($p < 0,01$) para híbridos (H) e regime hídrico (RH) para a variável densidade de comprimento de raiz (DCR) nodal na profundidade de 10 cm (Tabela 2). Para efeito isolado de híbrido, foi observada resposta

significativa para biomassa de raiz (BR) e volume de raiz (VR) em ambos os tipos de raízes (nodal e seminal principal) e também área de superfície de raiz (ASR) foi significativo para raiz seminal principal. Houve efeito isolado de regime hídrico em raízes nodais para todas as variáveis avaliadas (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo dos quadrados médios e testes de comparações múltiplas para o desenvolvimento de raiz aos 10 cm de profundidade em híbridos de milho cultivados sob 2 regimes hídricos. Janaúba - MG, 2017.

FV	BR (g)		DMR (mm)		DCR (cm cm ⁻³)		VR (cm ³)		ASR (cm ²)													
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P												
H	0,00*	0,00**	0,05 ^{ns}	0,00 ^{ns}	139495,2**	44911,7 ^{ns}	0,45**	0,16**	0,45**	0,16**												
RH	0,012**	0,00 ^{ns}	0,51**	0,00 ^{ns}	665135,4**	3015,7 ^{ns}	1,09**	0,00 ^{ns}	1,09**	0,00 ^{ns}												
H*RH	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	80964,8*	2598,5 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,00 ^{ns}												
Média Geral	0,051	0,028	0,59	0,48	0,24	0,18	0,45	0,28	34,65	24,01												
Híbridos	Médias de tratamento																					
BRS1010	0,06 a	0,03 a	0,55	0,49	0,33	0,16	0,61 a	0,33 a	47,29 a	26,94 a												
BRS1055	0,05 ab	0,03 a	0,57	0,48	0,25	0,18	0,45 ab	0,36 a	35,45 ab	29,57 a												
DKB390	0,03 b	0,01 b	0,66	0,47	0,13	0,12	0,02 b	0,18 b	20,42 b	15,02 b												
RH																						
C	0,06 a	0,02	0,50 b	0,49	0,37	0,17	0,60 a	0,29	49,37 a	24,87												
R	0,03 b	0,02	0,69 a	0,46	0,11	0,13	0,31 b	0,28	19,36 b	23,12												
Interação																						
	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R		
BRS1010	0,07	0,04	0,03	0,03	0,48	0,64	0,49	0,48	0,54	aA	0,15	aB	0,19	0,13	0,81	0,43	0,36	0,31	68,0	26,6	29,0	24,9
BRS1055	0,08	0,03	0,03	0,03	0,49	0,67	0,45	0,50	0,41	aA	0,10	aB	0,22	0,14	0,66	0,25	0,36	0,34	54,7	16,2	31,4	27,7
DKB390	0,03	0,02	0,02	0,01	0,54	0,80	0,46	0,48	0,17	bA	0,08	aA	0,12	0,12	0,33	0,26	0,16	0,19	25,4	14,9	14,2	16,0

Híbrido (H). Regime hídrico (RH): conforto (C) e restrição (R). N: raiz nodal; P: raiz seminal principal. BR: Biomassa seca de raiz; DMR: Diâmetro médio de raiz; DCR: Densidade de comprimento de raiz; VR: Volume de raiz; ASR: Área de superfície de raiz. Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas (interações) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). $P < 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*), $P > 0,05$ (^{ns}).

Aos 10 cm de profundidade, o híbrido DKB390 expressou a menor biomassa de raízes nodais e raiz seminal principal dentre os híbridos avaliados, independentemente do regime hídrico (Tabela 2). Comportamento semelhante foi observado para a variável volume de raiz e para área de superfície de raiz. No milho, a maioria das raízes não embrionárias no sistema radicular são raízes nodais, contribuindo com 60-80% de biomassa de raízes (GAO; LYNCH, 2016). Tal informação justifica o fato do híbrido DKB390 apresentar menor biomassa e volume, pois este apresentou um menor número de raízes nodais quando comparado aos demais.

O efeito do regime hídrico em raízes nodais resultou na diminuição dos valores de biomassa, volume e área de superfície de raiz nas plantas sob restrição hídrica, enquanto sob conforto hídrico ocorreu decréscimo no diâmetro médio dessas raízes (Tabela 2). Zhao *et al.* (2018), verificaram menores pesos secos das raízes de milho, na fase vegetativa, quando cultivadas em restrição hídrica. O carbono gasto na respiração radicular corresponde a um alto consumo energético pela planta, desta forma, acredita-se que um número reduzido de raízes, ou mesmo o aumento do tecido aerênquima sejam formas de adaptação das plantas ao déficit hídrico. Por isso, menor biomassa e volume de raiz foram observados em condição de restrição hídrica.

A redução na área de superfície de raiz em condição de restrição hídrica pode estar relacionado a dano provocado na região de ápice da raiz pela seca do solo. De acordo com Lavinsky *et al.* (2016), considerando que esta região atua no geotropismo e protege o meristema de danos através da secreção de mucilagem na borda das células, é possível que sob déficit hídrico, essa região de ápice de raiz tenha sido reduzida deixando o meristema desprotegido. Como resultado, houve uma menor substituição das células danificadas da ponta da raiz pelo centro quiescente, o que levou a uma redução na área da superfície das raízes dos híbridos cultivados em restrição hídrica.

As plantas do híbrido DKB390 cultivadas em conforto hídrico diferiram significativamente dos demais híbridos, apresentando menor DCR (Tabela 2). Lavinsky *et al.* (2015), contudo, não verificaram diferença entre híbridos cultivados na capacidade de campo em relação ao DCR. O híbrido DKB390 foi o único que não diferiu estatisticamente para esta variável nos diferentes regimes hídricos, os demais híbridos apresentaram maior DCR quando cultivados em conforto hídrico. Uma quantidade menor de raízes nos primeiros 50 cm do perfil do solo (BOLAÑOS; EDMEADES; MARTINEZ, 1993) é característica de adaptação às condições de seca. A maior densidade de comprimento de raízes é uma estratégia eficaz adotada pela planta para melhorar a aquisição de recursos do solo (CHEN, 2017). Vários estudos em cereais, contudo, demonstram que o déficit hídrico reduz a densidade do comprimento das raízes e inibe o crescimento de novas raízes nodais (ROSTAMZA; RICHARDS; WATT, 2013; STEINEMANN *et al.*, 2015).

Houve efeito isolado do híbrido para a variável densidade de comprimento de raiz (DCR) para as profundidades 20, 30, 40, 50 e 60 cm (Tabela 3). Para o efeito de híbrido, aos 20 cm de profundidade, o DKB390 apresentou menores valores de DCR e nas profundidades seguintes, até 60 cm, enquanto o BRS1010 mostrou maiores valores para esta variável (Figura 1). Até agora pouca evidência foi apresentada para a associação de tolerância à seca com um aumento da DCR nas camadas superficiais do solo. De acordo com Hund, Ruta e Liedgens (2009), não é apenas um sistema radicular mais profundo, mas também um DCR reduzido nas camadas superficiais do solo que estão relacionados à tolerância da seca. Como o solo seca na superfície, a água pode estar disponível em perfis mais profundo do solo que muitas espécies agrícolas não são adaptadas para

alcançar. Neste caso, híbridos com menor densidade de comprimento de raiz em camadas de solo superficiais e aumento de DCR em camadas médias e profundas foi proposto como uma estratégia de crescimento eficiente em ambientes onde a água pode estar disponível para as culturas mais profundamente no solo (WASSON *et al.*, 2012). A capacidade de desenvolver raízes profundas é atualmente a característica mais aceita para melhorar a resistência à seca, mas a variação genética tem sido relatada para uma série de características que podem afetar a resposta ao déficit hídrico (GOWDA *et al.*, 2011).

Tabela 3. Resumo dos quadrados médios e testes de comparações múltiplas para densidade de comprimento de raiz em diferentes profundidades do sistema radicular, em híbridos de milho cultivados sob dois regimes hídricos. Janaúba - MG, 2017.

FV	GL	Densidade de Comprimento de Raiz (cm)						
		20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm
H	2	687963,27**	538484,96**	300212,01**	436485,19*	506972,90**	106646,52 ^{ns}	54566,81 ^{ns}
RH	1	7302,15 ^{ns}	8027,80 ^{ns}	42921,32 ^{ns}	143068,43 ^{ns}	100599,42 ^{ns}	4269,14 ^{ns}	4323,03 ^{ns}
H*RH	2	101917,00 ^{ns}	56140,16 ^{ns}	45512,50 ^{ns}	37966,25 ^{ns}	87858,97 ^{ns}	10543,47 ^{ns}	470,28 ^{ns}
Média		609,95	581,61	475,55	412,36	339,11	192,17	124,75

Híbrido (H). Regime hídrico (RH). (^{ns}): não significativo; (*): significativo a 5% e (**): significativo à 1% pelo teste F.

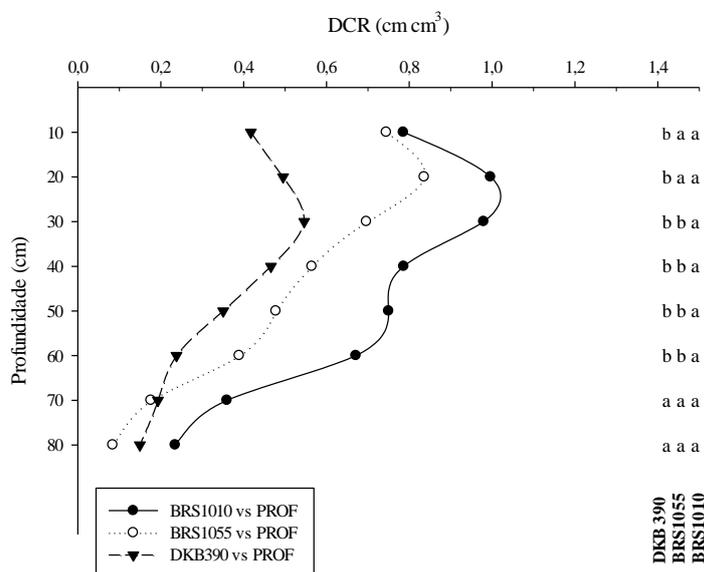


Figura 1. Densidade de comprimento de raiz em diferentes profundidades da rizosfera de híbridos de milho. Médias seguidas de mesma letra em híbridos não diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de significância.

Sob situação de restrição hídrica à medida que a disponibilidade de água aumentou com a profundidade, o DCR diminuiu (Figura 2). De maneira geral, em restrição hídrica, nas camadas mais superficiais (20 a 40 cm), foram verificados maiores DCR e menor disponibilidade de água, o que indica uma maior absorção de água pelas raízes nestas profundidades. A absorção de água foi afetada pelo comprimento da raiz na zona entre 20 e 80 cm para ambos os tratamentos. Tais resultados corroboram com os de Hund, Ruta e Liedgens (2009), que também verificaram que a relação entre DCR e extração total de água variou dependendo do regime hídrico e a absorção de água foi afetada pela densidade de comprimento da raiz na zona entre 20 e 70 cm para ambos os tratamentos.

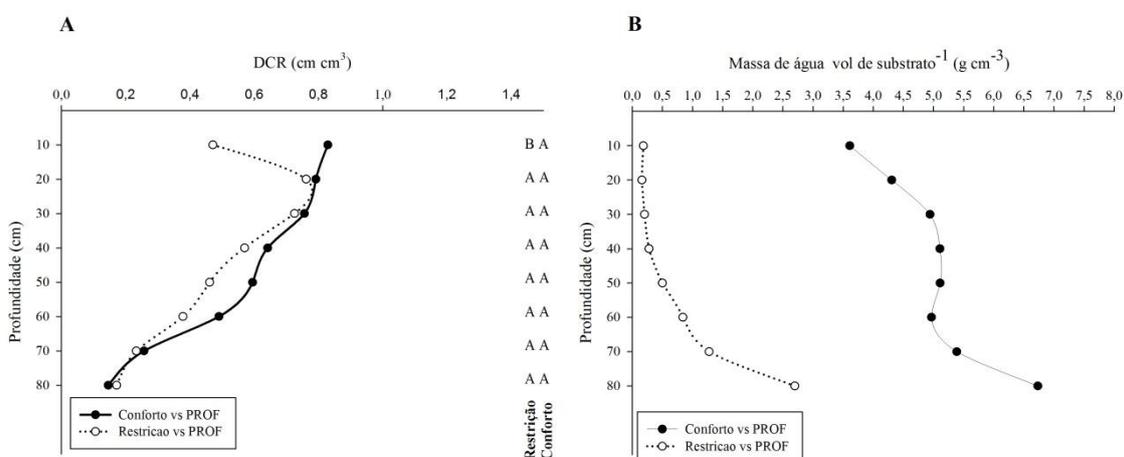


Figura 2. Densidade do comprimento da raiz em diferentes profundidades na rizosfera do milho (A) e massa de água no solo nas diferentes profundidades (B), sob dois regimes hídricos.

A análise de variância multivariada (MANOVA) não indicou efeito significativo ($p \leq 0,05$) para a interação híbridos e regime hídrico (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância multivariada no estudo de híbridos de milho cultivados em dois regimes hídricos. Janaúba-MG, 2017.

FV	Df	Pillai	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
Híbrido	2	1,39994	2,333	12	12	0,078259 ^{ns}
Regime Hídrico	1	0,94645	14,7277	6	5	0,004835**
Bloco	2	1,1462	1,3425	12	12	0,308981 ^{ns}
HXRH	2	1,37893	2,2203	12	12	0,090752 ^{ns}

$P \leq 0,01$ (**), $P < 0,05$ (*), $P > 0,05$ (^{ns}).

A análise de variáveis canônicas (VC) indicou que as duas primeiras variáveis canônicas foram suficientes para explicar 93,8% da variação observada, permitindo representá-las em um gráfico de dispersão bidimensional (Figura 3). Este valor de explicação é superior ao mínimo recomendado por Cruz *et al.* (2012), o que indica que é possível explicar de maneira satisfatória o comportamento manifestado entre os tratamentos considerados nesta avaliação.

Em estudo realizado por York, *et al.* (2018), os métodos multivariados identificaram fenômenos difíceis de serem mensurados que podem levar à variação em vários fenômenos simultaneamente. De acordo com esses autores, a aplicação desses métodos em populações reprodutoras e ao mesmo tempo medir o desempenho da cultura permitirá inferir como os fenótipos da raiz contribuem para o rendimento em situação de estresse abiótico, como o déficit hídrico.

Na análise fundamentada por variáveis canônicas, a VC1 explicou 60,34% da variação obtida (Figura 3), tendo sido as características com maior contribuição o ângulo de raiz no verticilo 1, ângulo de raiz no verticilo 2 e número de verticilos no mesocótilo (Tabela 5).

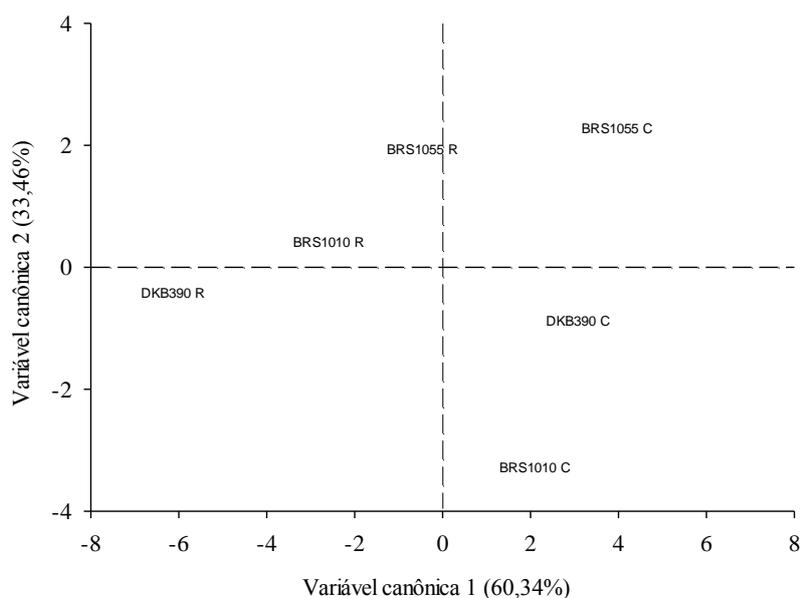


Figura 3. Escores canônicos padronizados para as duas primeiras variáveis canônicas, apresentadas de forma bidimensional, considerando três híbridos de milho e dois regimes hídricos. Janaúba-MG, 2017. R: restrição hídrica, C: conforto hídrico.

A dispersão gráfica (Figura 3) indica que o híbrido DKB390 em restrição hídrica se destacou com menores estimativas para a primeira variável canônica. De acordo com as correlações apresentadas na tabela 5, observa-se que este híbrido tendeu a apresentar maior ângulo de raízes nos verticilos 1 e no verticilo 2 e menor número de verticilos no mesocótilo. Isto ocorreu também para os demais híbridos cultivados com restrição hídrica. Já o contrário foi observado para os híbridos

cultivados em conforto hídrico, já que apresentaram escores positivos para a primeira variável canônica.

A segunda variável canônica absorveu 33,46% da variação entre os tratamentos e o caractere de maior peso foi número de raízes nodais no verticilo 2, sendo o híbrido BRS1055 que tendeu a apresentar as maiores estimativas. Ao contrário do observado para o híbrido BRS1010 cultivado em conforto hídrico. Recentemente, métodos multivariados foram utilizados para demonstrar uma influência positiva do número de raízes nodais e do ângulo de crescimento tanto na profundidade da raiz quanto no rendimento do trigo no campo em condições de restrição hídrica (Slack *et al.*, 2018).

Tabela 5. Correlações entre as duas primeiras variáveis canônicas e as seis características quantitativas avaliadas em híbridos comerciais de milho crescendo em dois regimes hídricos. Janaúba-MG, 2017.

Descritores quantitativos	Variável canônica	
	1	2
Ângulo de raiz nodal no verticilo 1	-0,947	-0,119
Ângulo de raiz nodal no verticilo 2	-0,837	0,132
Número de raízes seminais	0,663	0,479
Número de verticilos no mesocótilo	0,922	-0,382
Número de raízes nodais no verticilo 1	-0,022	0,104
Número de raízes nodais no verticilo 2	0,651	0,629

CONCLUSÕES

O híbrido DKB390 não diferiu em desenvolvimento de raiz nodal para a característica de densidade de comprimento de raiz em resposta ao regime hídrico empregado. As raízes nodais foram as que mais expressaram diferenças entre híbridos e regime hídrico nas variáveis estudadas. Dentre as variáveis analisadas para arquitetura de raiz, o número de raiz nodal no verticilo 2 no híbrido DKB390 foi a característica que mais expressou diferença entre os regimes hídricos estudados. A densidade de comprimento de raiz diferiu entre os híbridos avaliados nas camadas superficiais do perfil da rizosfera. Ângulo de raiz nodal no verticilo 1 e no verticilo 2 juntamente com número de verticilos no mesocótilo foram as características que mais contribuíram para expressar as diferenças entre os fatores de tratamento híbrido e regime hídrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPMS-EMBRAPA) na pessoa do pesquisador Dr. Paulo César Magalhães, pela realização das análises no sistema WinRHIZO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M.L. *et al.* Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. **Euphytica**, Wageningen, v. 207, n. 1, p. 79–94, 2016.

BOLAÑOS, J.; EDMÉADES, G.O.; MARTINEZ L. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptive physiological and phological traits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.31, n. 3-4, p. 269–286, 1993.

CHEN, X. *et al.* Phenotyping for the dynamics of field wheat root system architecture. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 37649, 2017.

CRUZ, C. D.; REGAZZI A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: UFV, 2012. v. 1.512p.

CRUZ, C. D. **Programa Genes - Estatística Experimental e Matrizes**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. v. 1. 285 p.

GAO, Y; LYNCH, J.P. Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays* L.). **Journal of experimental botany**, Oxford ,v. 67, n. 15, p. 4545-4557, 2016.

GE, T. *et al.* Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, Cracóvia, v.34, n. 3, p.1043-1053, 2012.

GOWDA, V.R.P. *et al.* Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 1-13, 2011.

HUND, A.; RUTA, N.; LIEDGENS, M. Rooting depth and water efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance. **Plant and Soil**, Western, v. 318, n. 1-2, p. 311- 325, 2009.

KANO, M. *et al.* Root plasticity as the key root trait for adaptation to various intensities of drought stress in rice. **Plant and Soil**, Western, v. 342, n. 1-2, p. 117–128, 2011.

LAVINSKY, A.O. *et al.* Partitioning between primary and secondary metabolism of carbon allocated to roots in four maize genotypes under water deficit and its effects on productivity. **The Crop Journal**, Madison, v.3, n. 5, p.379-386, 2015.

LAVINSKY, A.O. *et al.* Root system traits and its relationship with photosynthesis and productivity in four maize genotypes under drought. **Cereal Res Commun**, Budapest, v. 44, n. 1, p. 89–97, 2016.

LYNCH, J.P., CHIMUNGU, J.G.; BROWN, K.M. Root anatomical phenes associated with water acquisition from drying soil: targets for crop improvement, **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 65, n. 21, p. 6155–6166, 2014.

LYNCH, J.P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. **Annals of Botany**, London, v. 112, n. 2, p. 347–357, 2013.

LYNCH J.P.; BROWN KM. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. **Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences**, Hyderabad, v.367, n. 1595, p.1598-1604, 2012.

MACE, E.S. *et al.* QTL for nodal root angle in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) co-locate with QTL for traits associated with drought adaptation. **Theoretical and Applied Genetics**, Nova York, 124, n. 1, p. 97–109, 2012.

MIGUEL, M.A. *et al.* Basal root whorl number: a modulator of phosphorus acquisition in common bean (*Phaseolus vulgaris*). **Annals of Botany**, London, v. 112, n. 6, p. 973–982, 2013.

PAEZ-GARCIA, A. *et al.* Root Traits and Phenotyping Strategies for Plant Improvement. Fernando. **Plants**, Basel, v.4, n. 2, p.334-355, 2015.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016. < URL <https://www.R-project.org/>. > Acesso em 02/08/2018.

ROSTAMZA, M.; RICHARDS, R.A.; WATT, M. Response of millet and sorghum to a varying water supply around the primary and nodal roots. **Annals of Botany**, London, v. 112, n. 2, p. 439–446, 2013.

RUFINO, C. A. *et al.* Water Stress Influence on The Vegetative Period Yield Components of Different Maize Genotypes. *Agronomy*, Basel, v. 8, n. 8, 151, 2018.

SLACK, S. *et al.* Wheat shovelomics II: Revealing relationships between root crown traits and crop growth. **Bio Rxiv**, Nova York, p. 280917, 2018.

STEINEMANN, S. *et al.* Dynamic root responses to drought and rewatering in two wheat (*Triticumaestivum*) genotypes. **Plant and Soil**, Western, v. 391, n, 1-2, p. 139–152, 2015.

SUDRÉ, C. P. *et al.* Genetic resources of vegetable crops: a survey in the Brazilian germplasm collections pictured through papers published in the journals of the Brazilian Society for Horticultural Science. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 4, p. 496-503, 2007.

TOBAR-TOSSE, D. *et al.* Caracterização de genótipos de soja-hortaliça por análise de componentes principais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 7, p. 1214-1219, 2015.

TRACHSEL, S.*et al.* Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant and Soil**, Western, v. 341, n. 1-2, p. 75–87, 2011.

TRACHSEL, S. *et al.* Maize root growth angles become steeper under low N conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 140, p. 18–31, 2013.

UGA, Y. *et al.* Control of Root System Architecture by Deeper Rooting 1 Increases Rice Yield under Drought Conditions. **Nature Genetics**, Nova York, v. 45, n. 9, p. 1097-1102, 2013.

UGA, Y; OKUNO, K; YANO, M.D ro1, a major QTL involved in deep rooting of rice under upland field conditions. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, 62, n. 8, p. 2485-2494, 2011.

USDA. Circular Series on World Agricultural Supply and Demand Estimates-578. Available online: <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/waob/wasde//2010s/2018/wasde-06-12-2018.pdf> (accessed on 01 novembro 2018).

WASSON, A. P. *et al.* Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 63, n. 9, p. 3485–3498, 2012.

YORK, L. M.; SLACK, S.; BENNETT, M. J.; FOULKES, M. J. Wheat shovelomics I: A field phenotyping approach for characterising the structure and function of root systems in tillering species. **Bio Rxiv**, Nova York, p. 200875, 2018.

ZHAN, A.; SCHNEIDER, H.; LYNCH, P.J. Reduced lateral root branching density improves drought tolerance in maize. **Plant Physiology**, Minneapolis, v.168, p.1603-1615, 2015.

ZHAO, J. *et al.* Shoot and root traits in drought tolerant maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Journal of Integrative Agriculture**, Amsterdam, v. 17,p. 1093–1105, 2018.

ZHU, J.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 33, n. 5, p. 740-749, 2010.

CONCLUSÃO GERAL

Com os híbrido de milho BRS1010, BRS1055 e DKB390 submetidos à duas condições hídricas, pode-se concluir que as variáveis de parte aérea índice SPAD, temperatura foliar, comprimento de caule, biomassa seca de parte aérea apresentaram-se como indicadores resposta ao déficit hídrico. Em relação as avaliações realizadas em raízes, as raízes nodais foram as que mais expressaram diferenças entre híbridos e regime hídrico nas variáveis estudadas. Ângulo de raiz nodal no verticilo 1 e no verticilo 2 juntamente com número de verticilos no mesocótilo foram as características que mais contribuíram para expressar as diferenças entre os fatores de tratamento híbrido e regime hídrico. O híbrido DKB390 foi o que mais expressou diferença entre os regimes hídricos estudados para a característica número de raiz nodal no verticilo 2, o que indica resposta diferenciada entre os híbridos estudados para desenvolvimento de raízes quando submetidos a restrição hídrica.