

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

**DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB NÍVEIS DE
DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO
DE CERRADO**

JOÃO ANGELO SILVA NUNES

RONDONÓPOLIS-MT

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

**DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB NÍVEIS DE
DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO
DE CERRADO**

JOÃO ANGELO SILVA NUNES

Engenheiro Agrícola e Ambiental

Orientadora: Prof^a. Dra. EDNA MARIA BONFIM-SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
da Universidade Federal de Mato Grosso,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola.

RONDONÓPOLIS – MT

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586d Silva Nunes, João Angelo.
DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB
NÍVEIS DE DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA EM
LATOSSOLO VERMELHO DE CERRADO / João Angelo
Silva Nunes. -- 2014
83 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: Edna Maria Bonfim da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato
Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Rondonópolis, 2014.
Inclui bibliografia.

1. Zea Mays. 2. Compactação do Solo. 3. Manejo do Solo.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

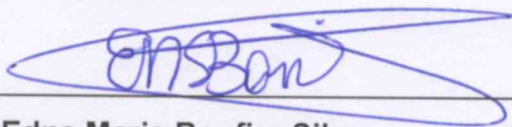
**Título: DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB
NÍVEIS DE DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA EM
LATOSSOLO VERMELHO DE CERRADO**

Autor: JOÃO ANGELO SILVA NUNES

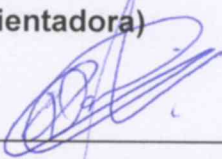
Orientadora: Profª Dra. EDNA MARIA BONFIM-SILVA

Aprovada em: 15 de dezembro de 2014

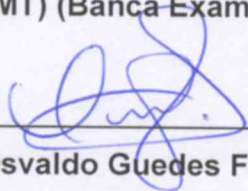
Comissão Examinadora:



Profª Dra. Edna Maria Bonfim-Silva
(ICAT/UFMT) (Orientadora)



ProfºDr Edicarlos Damacena de Souza
(ICAT/UFMT) (Banca Examinadora)



ProfºDr Osvaldo Guedes Filho
(ICAT/UFMT) (Banca Examinadora)

“Não reclame se a terra não é boa;
Que o clima não é favorável;
Não lhe cabe julgar a terra ou o tempo;
Tua missão é semear!”

Vade Bernaski

À Deus por todas as bênçãos pelas
quais me tens proporcionado.

À meus filhos Jean Filipe e Joanna,
amor incondicional.

À minha esposa Priscilla pelo
companheirismo e compreensão.

Meus pais, Maria Silva e José Nunes,
pelo esforço e apoio.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por suas bênçãos, auxílio e proteção. Sendo minha base nessa jornada.

Aos meus pais, pela força, pelo carinho, pelo exemplo de vida, pelo exemplo pessoal que são para mim de amor, perseverança, caráter e honestidade, amo muito vocês.

A minha esposa Priscilla, pela força, pelo encorajamento e pelo apoio irrestrito durante esses anos e na condução do experimento de dissertação.

A Profª Drª Edna Maria Bonfim da Silva, por sua orientação, pela sinceridade, pelo aprendizado, por estar sempre disposta a ajudar, pelas críticas construtivas, amizade e confiança depositada desde a graduação.

Ao Profº Drº Tonny José Araújo da Silva, pela sua dedicação, pelo voto de confiança, exemplo profissional, transmissão de conhecimentos, pela sua criatividade e amizade demonstrada durante esses anos.

A todos os meus professores dos cursos de graduação e pós-graduação pelo conhecimento transmitido e contribuição em minha formação acadêmica.

Aos companheiros de Pós-Graduação, Marcel, Julio e Ellen (pelo auxílio na implantação do experimento); Janaína e Kanashiro (não seja o cara, seja amigo dele), pelas conversas e trocas de experiências; Marcio e Renato; em especial a Samara e Christiane (pela grande ajuda na condução do experimento).

A Julyane Fonteneli, pela amizade construída e pela ajuda fundamental na condução e coleta do experimento.

Aos técnicos do laboratório de solo e aos técnicos administrativos da instituição pela disponibilidade.

A CAPES juntamente com a FAPEMAT pela concessão de bolsa de estudo, imprescindível para minha formação.

A Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Rondonópolis, pela oportunidade de conclusão do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste projeto.

Obrigado

DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO SOB NÍVEIS DE DENSIDADE E TENSÕES DE ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO DE CERRADO

RESUMO – O manejo inadequado do solo e da água pode ocasionar alterações nas características físicas do solo, resultando em prejuízos na produção agrícola. Assim, objetivou-se avaliar o efeito de níveis de densidade do solo e tensões de água no crescimento e nas características produtivas do milho (*Zea mays* L.) em condições controladas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário de Rondonópolis, em delineamento experimental com blocos casualizados, em arranjo fatorial 5^2 , sendo composto por combinações de densidades do solo (1,0; 1,2; 1,4; 1,6 e 1,8 Mg m^{-3}) e tensões de água no solo (10, 20, 30 40 e 50 kPa) resultando em 13 tratamentos, com quatro repetições. Foi utilizado um Latossolo Vermelho coletado de 0 a 0,2 m de profundidade. O solo da camada intermediária foi compactado com o auxílio de uma prensa hidráulica e os anéis da parte inferior e superior foram preenchidos com solo na densidade de 1,0 Mg m^{-3} . Os tensiômetros foram instalados na profundidade de 15 cm, permanecendo assim na região central da camada compactada. Foram realizadas avaliações aos 30, 45, 67 e 104 dias após a semeadura. No desenvolvimento inicial da cultura do milho houve efeito isolado para os níveis de densidade do solo. Nas quatro avaliações de diâmetro de colmo realizadas houve efeito isolado apenas para densidade do solo. Para o número de folhas, houve influência isolada nas duas primeiras avaliações realizadas, sendo que a partir dos 67 dias após a semeadura não se observou diferença significativa para os níveis de densidade e tensões de água no solo. Para altura e índice de clorofila, observou-se que no final do ciclo da cultura houve efeito isolado para as tensões de água no solo. A produção de massa seca da parte aérea e de raízes na cultura do milho foi limitada pelo aumento das tensões de água no solo, sendo que para a densidade do solo o limite crítico observado foi de 1,30 Mg m^{-3} . O aumento da densidade do solo foi mais prejudicial no desenvolvimento inicial das plantas de milho, enquanto no ciclo final de cultivo obteve-se maior efeito das tensões de água aplicadas ao solo, em relação as características vegetativas do milho.

Palavras-Chave: *Zea Mays*, Compactação do Solo, Manejo do Solo

CORN DEVELOPMENT UNDER BULK DENSITY LEVELS OF SOIL AND WATER TENSIONS IN OXISOL OF THE CERRADO

ABSTRACT – Inadequate management of soil and water can cause changes in the physical characteristics of the soil, resulting in losses in agricultural production. The objective was evaluate the effect of soil bulk density levels and water tensions in growth and yield characteristics of maize (*Zea mays* L.) under controlled conditions. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal University of Mato Grosso, Campus Rondonopolis, in experimental design with randomized blocks, in 5² factorial arrangement and is composed of combinations of bulk densities of soil (1.0, 1.2, 1.4, 1.6 and 1.8 Mg m⁻³) and water tensions in the soil (10, 20, 30, 40 and 50 kPa) resulting in 13 treatments with four replications. Was utilized an Oxisol collected from 0 to 0.2 m deep. The intermediate layer was of soil compacted with the aid of a hydraulic press and the rings of the bottom and upper part were filled with soil in the density of 1.0 Mg m⁻³. The tensiometers were installed at a depth of 15 cm, remaining in the central region of the compacted layer. Evaluations were carried out at 30, 45, 67 and 104 days after sowing. In the initial development of the maize crop was isolated effect for soil bulk density levels. In the four reviews of stem diameter was performed isolated effective for soil bulk density. For the number of leaves, was isolated influence in the two first evaluations carried out, and from 67 days after sowing there was no significant difference in the levels of bulk density and water tension in the soil. For height and chlorophyll index it was observed that at the end the crop cycle there was isolated effect of water tensions in the soil. The dry mass production the aerial part and roots in maize was limited by increased water tension in the soil, and for the soil bulk density the critical limit observed was 1.30 Mg m⁻³. The increased soil bulk density was more harmful in initial development of corn plants, while at the end the cultivation cycle was obtained higher effect of water tensions applied to the soil in relation to the vegetative characteristics of corn.

Keywords: *Zea Mays*, Soil Compaction, Soil Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista geral do experimento em casa de vegetação, aos 30 dias após a semeadura do milho.....	22
Figura 2. Quadrado do composto central em função dos níveis de densidade e tensões de água no solo	22
Figura 3. Parcela experimental aos 3 dias após a semeadura do milho, composta por 3 tubos de PVC cortados com altura de 0,1 m e com um diâmetro externo de 0,2 m e com um tensiômetro para determinação da umidade do solo.	24
Figura 4. Curva de retenção de água no solo, gerada pelo programa Soil Water Retention Curve para a densidade 1,0 (A), 1,2 (B), 1,4 (C), 1,6 (D) e 1,8 (E) Mg m^{-3}	26
Figura 5. Germinação total das sementes de milho 2B688PW aos 4 dias após a semeadura.	31
Figura 6. Unidade experimental com uma planta de milho, após desbaste final, aos 14 dias após a semeadura.	32
Figura 7. Termohigrômetro localizado na região central do experimento.....	33
Figura 8. Variação da temperatura durante o experimento em casa de vegetação no período de 13 de agosto a 27 de outubro de 2014. Rondonópolis-MT.	33
Figura 9. Variação da umidade relativa durante o experimento em casa de vegetação no período de 13 de agosto a 27 de outubro de 2014. Rondonópolis-MT.....	34
Figura 10. Determinação da altura de plantas de milho aos 45 dias após semeadura.	35
Figura 11. Determinação do diâmetro de plantas de milho com auxílio de paquímetro digital aos 45 dias após semeadura.	35
Figura 12. Número de folhas da cultura do milho em função da densidade do solo aos (A) 30 dias após a semeadura e (B) aos 45 dias após a semeadura.	37
Figura 13. Plantas de milho apresentando sintomas de deficiência de potássio aos 67 dias após a semeadura.	38
Figura 14. Altura de plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30, (B) 45 e (C) 67 dias após a semeadura.	41

Figura 15. Altura de plantas de milho em função da tensão de água no solo aos (A) 67 e (B) 104 dias após a semeadura.....	42
Figura 16. Diâmetro do colmo de plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30, (B) 45, (C) 67 e (D) 104 dias após a semeadura.....	46
Figura 17. Índice de clorofila em plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30 e (B) 45 dias após a semeadura.	48
Figura 18. Índice de clorofila em plantas de milho em função da tensão de água no solo aos 90 dias após a semeadura.....	49
Figura 19. Massa seca de folhas de milho em função da (A) densidade do solo e da (B) tensão de água no solo.	52
Figura 20. Massa seca de colmo em plantas de milho em função da (A) densidade do solo e (B) tensões de água no solo.	54
Figura 21. Massa seca do (A) pendão, da (B) espiga de plantas de milho em função da densidade do solo.....	56
Figura 22. (A) Diâmetro, (B) comprimento e (C) massa seca de sabugo em plantas de milho em função da densidade do solo.....	59
Figura 23. Massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da (A) densidade e (B) tensões de água no solo.	61
Figura 24. Disposição das raízes no perfil do solo das unidades experimentais nas densidades de (A) 1,0, (B) 1,2, (C) 1,4 (D) 1,6 e (E) 1,8 Mg m ⁻³	64
Figura 25. Massa seca de raízes de plantas de milho nas camada (A) de 0,1 a 0,2 m e (B) de 0,2 a 0,3 m de profundidade e massa seca de raízes (C) adventícias e (D) total, em função dos níveis de densidade do solo.....	65
Figura 26. Massa seca de raízes de plantas de milho nas camada (A) de 0,0 a 0,1 m de profundidade (B) massa seca de raízes adventícias e (D) massa seca re raízes total, em função das tensões de água.	69
Figura 27. Massa seca de total de plantas de milho em função dos (A) níveis de densidade e (B) tensões de água no solo.	72

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Cultura do milho	13
2.2 Compactação do solo	14
2.3 Disponibilidade hídrica e efeitos da irrigação na cultura do milho	17
2.4 Potencial matricial e curva característica no manejo da irrigação	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Número de folhas	37
4.2 Altura de plantas	40
4.3 Diâmetro do colmo	45
4.4 Índice de clorofila	47
4.5 Massa seca de folhas	51
4.6 Massa seca de colmo	54
4.7 Pendão, espiga e sabugo	56
4.8 Massa seca da parte aérea	60
4.9 Massa seca de raízes	63
4.10 Massa seca total	71
5 CONCLUSÕES	73
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais cultivada pelo homem. O mesmo se dá devido essa cultura ser uma importante fonte de nutrientes para homens e animais. De origem mexicana, essa cultura é uma gramínea da família *Poaceae*, tribo *Maydeae*, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* L. (Paterniani; Campos, 1999).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, tendo uma estimativa de produção de milho para a safra 2013/2014 em torno de 77.887,1 mil toneladas (Conab, 2014).

O cultivo intensivo juntamente com a mecanização e o manejo inadequado do solo promoveram a degradação da qualidade física dos solos, comumente identificados pelo aumento no nível de compactação (Piffer; Benez, 2005; Bergamin et al., 2010).

Segundo Freddi et al. (2009 a) houve correlação negativa entre as variáveis massa de matéria seca e o diâmetro radicular com a produtividade do milho irrigado, de acordo com os níveis de densidade do solo, mostrando que essas variáveis são bons indicadores da compactação do solo.

Por outro lado, trabalhos na literatura vêm apontando que de acordo com o nível de compactação do solo, os nutrientes podem estar presentes no sistema, porém de formas indisponíveis para as culturas, reduzindo assim o seu desenvolvimento e produção (Bonfim-Silva et al., 2011; Bonelli et al., 2011; Cabral et al., 2012).

O baixo conteúdo de água disponível para as culturas é considerada a maior causa de redução na produtividade agrícola em clima tropical. Quando as plantas cultivadas passam por um processo de estresse hídrico o seu crescimento e desenvolvimento é comprometido (Melo, 2006).

O cultivo do milho irrigado é de suma importância para aumentar a produção. Além disso, a produtividade dessa cultura, em condições irrigadas, pode ser superior em 30 a 40% em relação à área de sequeiro. Nessa situação, a cultura do milho pode ser uma opção bastante interessante principalmente na entre safra (Borges, 2003).

O movimento da água ocorre em função das diferenças de seu potencial total, movendo-se do ponto de maior para os de menor potencial. Portanto, o potencial da água no solo deve ser maior que o da planta, e este maior que o da atmosfera para que o fluxo de água seja mantido neste sistema (Coelho, 2013), sendo assim, necessário o controle do potencial matricial do solo.

Estudos comprovam as vantagens de considerar a tensão de água na gestão de umidade do solo, estimando-a com tensiômetros (Kang et al., 2004; Wang et al., 2007). A tensão de água em que o solo deve ser mantido para uma cultura específica podem ser realizadas em solos com diferentes propriedades físicas (Doerge; Thompson, 1995).

Diante desse contexto, objetivou-se avaliar o efeito de níveis de densidade e tensões de água no solo nas características vegetativas e produtivas do milho em condições controladas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do milho

O milho (*Zea mays*) é uma espécie diplóide e alógama, pertencente à família Poacea (Gramineae), originado aproximadamente de sete a dez mil anos atrás no México e na América Central. É considerado uma das plantas cultivadas mais antigas e um dos vegetais superiores mais estudados, possuindo caracterização genética mais detalhada dentre as espécies cultivadas (Guimarães, 2007).

A história de produção do milho tem crescido anualmente, principalmente devido às atividades de avicultura e suinocultura, onde o milho pode ser consumido diretamente ou ser utilizado na fabricação de rações e destinado ao consumo de animais (Marchi, 2008).

Atualmente, os maiores produtores mundiais de milho são os Estados Unidos, com, aproximadamente, 36,9% do total (safra 2013/14), China (22%) e Brasil (7,5%), sendo também os três maiores consumidores desta cultura (Embrapa, 2013).

O milho é uma das plantas cultivadas mais importantes atualmente, e a espécie mais produzida nos países em desenvolvimento. Seu cultivo se dá em locais com clima tropical, subtropical e temperado e em altitudes desde o nível do mar até altitudes superiores a 3000 metros. Devido à sua alta adaptabilidade a diversos ambientes, o milho é o cereal mais cultivado no mundo (Filgueira, 2007).

A produção de milho no Brasil tem-se caracterizado em duas épocas de semeaduras. A semeadura de verão, ou primeira safra, que é realizada

tradicionalmente durante o período chuvoso, e mais recentemente, temos a produção obtida na safrinha, ou segunda safra. A safrinha refere-se ao milho de sequeiro, semeado entre fevereiro ou março, quase sempre depois da soja precoce, predominantemente na região Centro-Oeste e nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais (Coelho, 2013).

O período de crescimento e desenvolvimento do milho é limitado pela disponibilidade hídrica, temperatura e luminosidade. A cultura do milho necessita que os índices dos fatores climáticos, especialmente a precipitação pluviométrica atinjam níveis considerados ótimos, para que o seu potencial genético de produção se expresse ao máximo (Cruz et al., 2006).

2.2 Compactação do solo

A compactação do solo pode ser definida como um processo dinâmico e gradual, onde ocorre a alteração estrutural e uma reorganização das partículas e de seus agregados, resultando no aumento da densidade do solo e redução da porosidade total e da macroporosidade do solo, sendo o resultado da reorganização proporcional as cargas ou pressões exercidas (Stone et al., 2002; Souza et al., 2008).

A densidade do solo pode ser definida como a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110° C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e poros. A densidade do solo, geralmente, aumenta com a profundidade do perfil, pois as pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes provocam o fenômeno de compactação e/ou adensamento, reduzindo a porosidade (Santana, 2009).

O processo de aumento da densidade do solo, quando oriundo de processos pedogenéticos é denominado de adensamento (Camargo, 1983), e quando da atividade agrícola, devido ao manejo inadequado do solo de compactação. Nesse caso, é dado pela alteração da estrutura do solo, que promove uma reorganização das partículas e dos agregados, de modo a diminuir o espaço poroso (Richart et al., 2005).

Uma das principais causas da compactação do solo corresponde ao tráfego de máquinas agrícolas, afetando principalmente a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração (Raper, 2005).

Dentre os efeitos prejudiciais da compactação do solo, destacam-se: a redução da infiltração de água no solo, do movimento de ar, da retenção de água e da disponibilidade de nutrientes no solo, a redução da penetração e da ramificação das raízes por excessiva resistência mecânica e aeração deficiente (Freddi et al., 2009 a).

O aumento na compactação reduz o crescimento de raízes devido ao aumento na resistência à penetração, podendo ocasionar perdas de produtividade nos cultivos agrícolas, por restringir o reservatório de água e nutrientes às raízes (Clark et al., 2003), a resistência do solo à penetração é um parâmetro dinâmico, que depende da densidade do solo, do teor de umidade e do tipo de solo.

A elevação da densidade do solo prejudica o desenvolvimento das plantas, ocasionando aumento da resistência mecânica à penetração de raízes, altera a movimentação de água e nutrientes e a difusão de oxigênio e outros gases (Sanchez, 2012), dependente do espaço poroso. Solos com maior porosidade têm menor densidade, e dessa maneira, todos os fatores que interferem no espaço poroso irão interferir na densidade do solo (Machado; Favaretto, 2006).

A densidade do solo é afetada por sistemas de manejo do solo que alteram o espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando nas propriedades físico-hídricas importantes como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (Secco, 2003).

O arranjo das partículas sólidas do solo, em vários tipos de agregados, forma a estrutura do solo, que apresenta porosidade. Segundo Curi et al. (1993), a porosidade do solo corresponde ao volume do solo não ocupado por partículas sólidas, incluindo todo o espaço poroso ocupado pelo ar e água. Este volume

resulta na porosidade total do solo, subdividida em macroporos e microporos (Sanchez, 2012).

A porosidade depende, principalmente, da textura e da estrutura dos solos. A porosidade de um solo pode ser definida como o volume de vazios ou, ainda, o espaço do solo não ocupado pela matrix (conjuntos dos componentes orgânicos e inorgânicos). Esta é a relação entre a proporção de espaços que podem ser ocupados por líquidos e ar em relação ao espaço ocupado pela massa de solo (Santana, 2009).

A porosidade do solo e a relação entre a macroporosidade e microporosidade são fatores importantes para a avaliação da estrutura do solo. A microporosidade está relacionada com o armazenamento de água no solo, influenciando o desenvolvimento das plantas, especialmente nas épocas críticas de suprimento hídrico (Veiga, 2005). Em solo compactado, o número de macroporos é reduzido, os microporos são em maior quantidade e a densidade também é maior (Jimenez et al., 2008).

Vários autores têm relatados os efeitos negativos que a compactação excessiva do solo tem ocasionado no desenvolvimento da cultura do milho, tanto no crescimento vegetativo, de raízes e produção de grãos (Foloni et al., 2003; Freddi et al., 2007 a; Bergamin et al., 2010; Secco et al., 2009).

A compactação modifica o comprimento, o diâmetro e a distribuição das raízes da cultura do milho no solo (Shierlaw; Alston, 1984), sendo que esta alteração tem interferência no crescimento das plantas e na taxa de absorção de nutrientes (Cabral et al., 2012) além de influenciar na dinâmica da água no solo.

Foloni et al. (2003) observaram que o sistema radicular das plantas de milho não foi capaz de romper uma camada compactada de solo com densidade de $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$. Já, Rosolem et al. (1999) observaram redução no crescimento radicular a partir da densidade de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$. Freddi et al. (2006) observaram que valores de resistência mecânica a penetração variando de 0,90 a 2,00 MPa e uma

umidade gravimétrica entre 0,163 e 0,207 kg kg⁻¹ não diminuíram a produtividade do milho.

Silva et al. (2006) ao estudarem a resposta da cultura do milho em diferentes densidades do solo observaram que as plantas tiveram crescimentos relativos intermediários, tendo sido observada para esta cultura tendência de incremento em altura até próximo à densidade do solo de 1,2 Mg m⁻³, iniciando, a partir dessa densidade, decréscimo nessa característica.

2.3 Disponibilidade hídrica e efeitos da irrigação na cultura do milho

O milho é uma espécie que utiliza grande quantidade de água durante o ciclo de desenvolvimento, devido ao seu elevado rendimento de massa seca. Trata-se, no entanto, de uma cultura eficiente no uso de água, medida pela massa seca produzida por unidade de água utilizada. O elevado consumo de água não é devido apenas ao alto rendimento de massa seca, mas também pelo fato de tratar-se de um cereal de estação estival. Isto significa que a maior demanda de água pela planta coincide com a maior demanda evaporativa da atmosfera (Embrapa, 2013).

Segundo Pavinato et al. (2008) nos últimos anos têm aumentado significativamente o cultivo do milho sob irrigação, promovendo algumas alterações nas formas de manejo das lavouras, principalmente pelo planejamento de uso intensivo das áreas para compensação do alto investimento, com maior número de cultivos e culturas envolvidas.

Esta expansão das lavouras irrigadas tem exigido maior investimento em pesquisas, com intuito de suprir a demanda de conhecimento com relação ao manejo de irrigação e alcançar produtividades altas e consequentemente obter bom retorno econômico (Coelho, 2013).

As oscilações nas safras de milho, das principais regiões produtoras do Brasil, estão associadas à disponibilidade de água, sobretudo no período crítico

da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (Bergamaschi et al., 2004).

A deficiência no conteúdo de água disponível para as culturas é considerada a maior causa de redução na produtividade agrícola em clima tropical. Quando as plantas cultivadas passam por um processo de estresse hídrico o seu crescimento e desenvolvimento é comprometido (Melo, 2006).

Segundo Silva e Marouelli (1998) a deficiência de água normalmente é o fator mais limitante para a obtenção de produtividade elevada e produtos de boa qualidade, mas o excesso também pode ser prejudicial. Nesse caso, o uso da irrigação deve ser devidamente manejado, de forma que a quantidade de água aplicada não provoque dano à cultura (Scalco et al., 2002).

Bergamaschi et al. (2006) ao estudarem os efeitos do déficit hídrico na cultura do milho observaram que o maior impacto é sobre o rendimento de grãos quando ocorre na sua fase de florescimento. Estes concluíram que a adoção de uma umidade de 60% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo permite aumentar a eficiência de uso da irrigação.

Freddi et al. (2009 b) verificaram que o aumento da densidade do solo influenciou positivamente a variação do conteúdo de água disponível do solo, fato justificado pela redução da macroporosidade e redistribuição dos tamanhos dos poros. Todavia, houve limitação pelo conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração foi superior a 2,15 MPa e a porosidade de aeração foi menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

2.4 Potencial matricial e curva característica no manejo da irrigação

O manejo da irrigação permite a manutenção da umidade do solo em níveis adequados à cultura. Um dos métodos para a determinação da época de irrigação é a medição da tensão de água no solo, sendo um método muito usado em países com maior nível tecnológico e consiste em determinar de forma direta

ou indireta a tensão de água no solo diariamente, através de tensiômetros, ou da curva característica de água no solo via teor de água (Porto, 2012).

A determinação do conteúdo de água no solo é uma ferramenta de fundamental importância para a prática de irrigação, pois permite a correta quantificação da lâmina de água a ser aplicada para atender as necessidades da cultura (Carribeiro, 2010).

O fluxo de água no interior do solo pode ocorrer tanto no sentido de cima para baixo (drenagem profunda), como no sentido de baixo para cima (ascensão capilar), dependendo do gradiente de potencial do solo, sendo necessário para isto o conhecimento de suas características hídricas, da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica (Reichardt; Timm, 2004).

A curva característica de retenção de água no solo quantifica e representa o conteúdo de água que pode ser retido em um solo submetido a um determinado potencial mátrico, sendo o nome que se dá ao resultado gráfico da variação do conteúdo de água do solo em função do potencial mátrico (Schlichting, 2012).

Na descrição do comportamento físico-hídrico de solos a equação de van Genuchten (1980) é provavelmente mais utilizada em todo o mundo. Seu modelo de ajuste proposto foi adotado universalmente e permite relacionar, com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica, sendo um método consistente e objetivo para análise de dados (Dexter, 2004).

A curva de retenção de água do solo é uma característica do solo, sendo variável de solo para solo e de local para local. Assim, a identificação das características de grandes áreas deverá envolver repetições que apresentem médias representativas (Klar, 1984), sendo assim, com a mudança dos níveis de compactação de um solo, torna-se necessário a determinação da curva característica para cada densidade de solo.

Na prática, a medida direta do potencial matricial da água do solo, em condições de campo, é adequada e indicada apenas para potenciais que variam

de 0 a - 0,85 atm (85 kPa) (Feltrin, 2009). No entanto, apesar dos limites de água no solo poderem variar desde a capacidade de campo até o ponto de murcha permanente, esta estreita faixa do potencial matricial que é coberta pelo tensiômetro constitui a faixa de interesse do manejo de irrigação para a maioria dos solos agrícolas brasileiros (Reichardt; Timm, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal de Mato Grosso, no município de Rondonópolis-MT, com coordenadas geográficas, localizadas na Latitude 16°27'54.98" Sul e uma Longitude 54°34'41.75" Oeste e altitude de 284 m. A cultura utilizada foi a do milho variedade 2B688PW. O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com cinco níveis densidades de solo: 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 Mg m⁻³ e cinco tensões de água no solo: 10, 20, 30, 40, 50 kPa, em arranjo fatorial 5², perfazendo assim um total de 13 tratamentos (1,0 x 10; 1,0 x 30; 1,0 x 50; 1,2 x 20; 1,2 x 40; 1,4 x 10; 1,4 x 30; 1,4 x 50; 1,6 x 20; 1,6 x 40; 1,8 x 10; 1,8 x 30; 1,8 x 50) (Mg m⁻³ x kPa), e quatro repetições (Figura 1), resultando um total de 52 parcelas experimentais. Esse delineamento é um fatorial fracionado com base no composto central (Figura 2) (Littel; Mott, 1975).

O clima em Rondonópolis é tropical, caracterizado por ser um clima quente e úmido, com duas estações definidas: uma chuvosa no verão, e outra seca no inverno. A classificação do clima é Aw de acordo com a Köppen. Rondonópolis tem uma temperatura média anual de 24.8 °C, e uma pluviosidade média anual é 1527 mm.



Figura 1. Vista geral do experimento em casa de vegetação, aos 30 dias após a semeadura do milho.

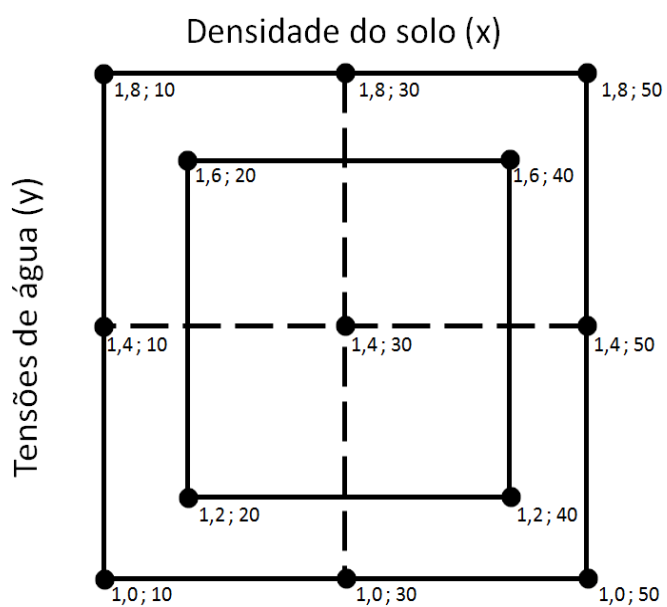


Figura 2. Quadrado do composto central em função dos níveis de densidade e tensões de água no solo

Foi utilizado um Latossolo Vermelho (Embrapa, 2013), coletado na profundidade de 0-0,2 m em área sob vegetação de Cerrado na cidade de Rondonópolis-MT. As caracterizações químicas e granulométricas (Tabela 1) foram realizadas de acordo com Embrapa (1997).

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do Latossolo na camada de 0-0,2 m de profundidade.

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H	SB	CTC	V	M.O.	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³				%	g dm ⁻³		g kg ⁻¹	
4,1	2,4	28	0,3	0,2	1,1	4,2	0,6	5,9	9,8	22,7	549	84	367

A saturação por bases foi elevada para 60% (Souza; Lobato, 2004), sendo que após a aplicação de calcário dolomítico (PRNT 80,3%) no solo o mesmo ficou incubado por um período de 30 dias.

Os vasos foram confeccionados com a utilização de tubos de PVC (policloreto de vinila) de 0,2 m de diâmetro externo com uma espessura de 2,5 mm e com 0,1 m de altura, foram sobrepostos três anéis, ficando assim cada parcela experimental com uma altura de 30 cm (Figura 3).

Os anéis sobrepostos foram fixados uns aos outros com a utilização de fita adesiva. Na parte inferior de cada vaso foi fixada uma tela antiafídeos com o auxílio de câmara de ar de carro. Essa tela teve como finalidade evitar perdas de solo. Cada unidade experimental foi acondicionada sobre pratos plásticos (30 cm de diâmetro) para evitar a perda de água pelo sistema.

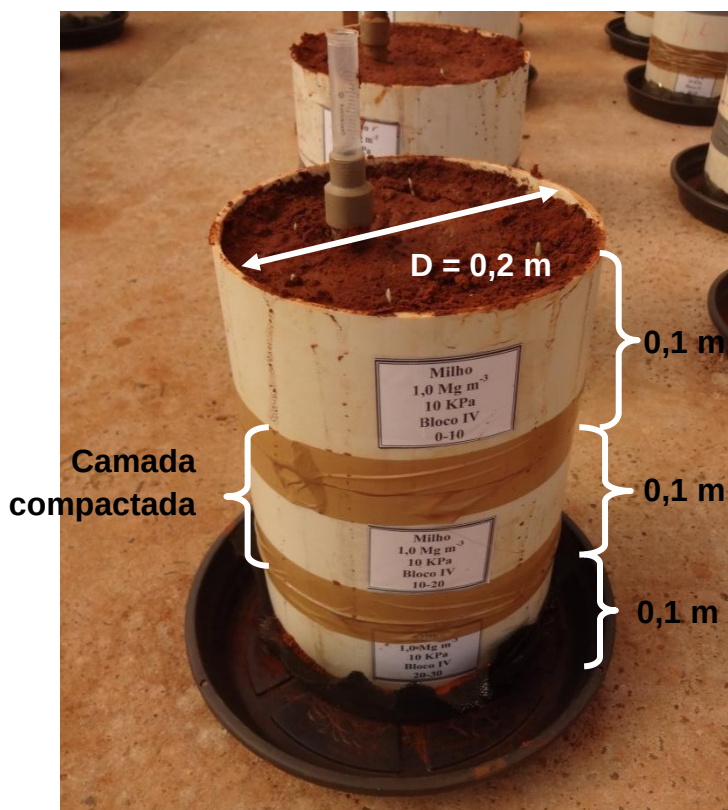


Figura 3. Parcela experimental aos 3 dias após a semeadura do milho, composta por 3 tubos de PVC cortados com altura de 0,1 m e com um diâmetro externo de 0,2 m e com um tensiômetro para determinação da umidade do solo.

Antes da compactação do solo foi realizado adubação com fósforo e potássio em todo volume de solo de cada parcela experimental. Esta adubação foi realizada com finalidade de garantir uma distribuição homogênea desses nutrientes em todo o perfil do solo, mesmo após a compactação. Essa adubação foi realizada por ocasião da semeadura.

Foi realizada adubação com fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O), de 150 e 250 $mg\ dm^{-3}$, sendo os mesmos fornecidos por meio da adubação com cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente.

O solo foi compactado com o auxílio de uma prensa hidráulica P15 ST, marca Bovenau®. Os anéis da parte inferior e superior foram preenchidos com solo na densidade de $1,0\ Mg\ m^{-3}$, enquanto que os anéis centrais foram preenchidos com solo compactado nos níveis de densidades aplicados nos

tratamentos (1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 Mg m⁻³), tendo assim uma camada compactada de 10 cm.

Foi realizada também a aplicação dos mesmos tratamentos de densidades do solo em anéis volumétricos com volume de 50 cm³, (diâmetro de 4,90 cm e altura de 2,66 cm) com a finalidade de determinação da curva de retenção de água no solo, bem como determinação da micro, macro e porosidade total do solo em função dos níveis de densidade de cada um dos tratamentos.

A equação 1 foi utilizada para determinação da massa de solo seco a ser utilizado em cada nível de compactação, a partir da relação de densidade, ou seja, da massa do solo seco e volume total.

$$Ds = \frac{MS}{VT} \quad (1)$$

onde:

MS – Massa do solo seco (Mg);

VT - Volume total do anel (m³);

Ds - Densidade do solo (Mg m⁻³).

Foram determinadas 5 curvas de retenção de água no solo (Figura 4). Desse modo, traçou-se uma curva para cada nível de densidade do solo avaliada. Os anéis volumétricos foram vedados em sua parte inferior com a utilização de ligas de borrachas e tecido TNT (tecido não tecido), em seguida foram dispostos em recipiente com água até dois terços de sua altura, permanecendo nessas condições por um período de 24 horas para saturação do solo, em seguida foram colocados na câmara de Richards onde foram aplicadas as tensões de 7, 20, 28, 33, 50, 100, 200, 500 e 1500 kPa.

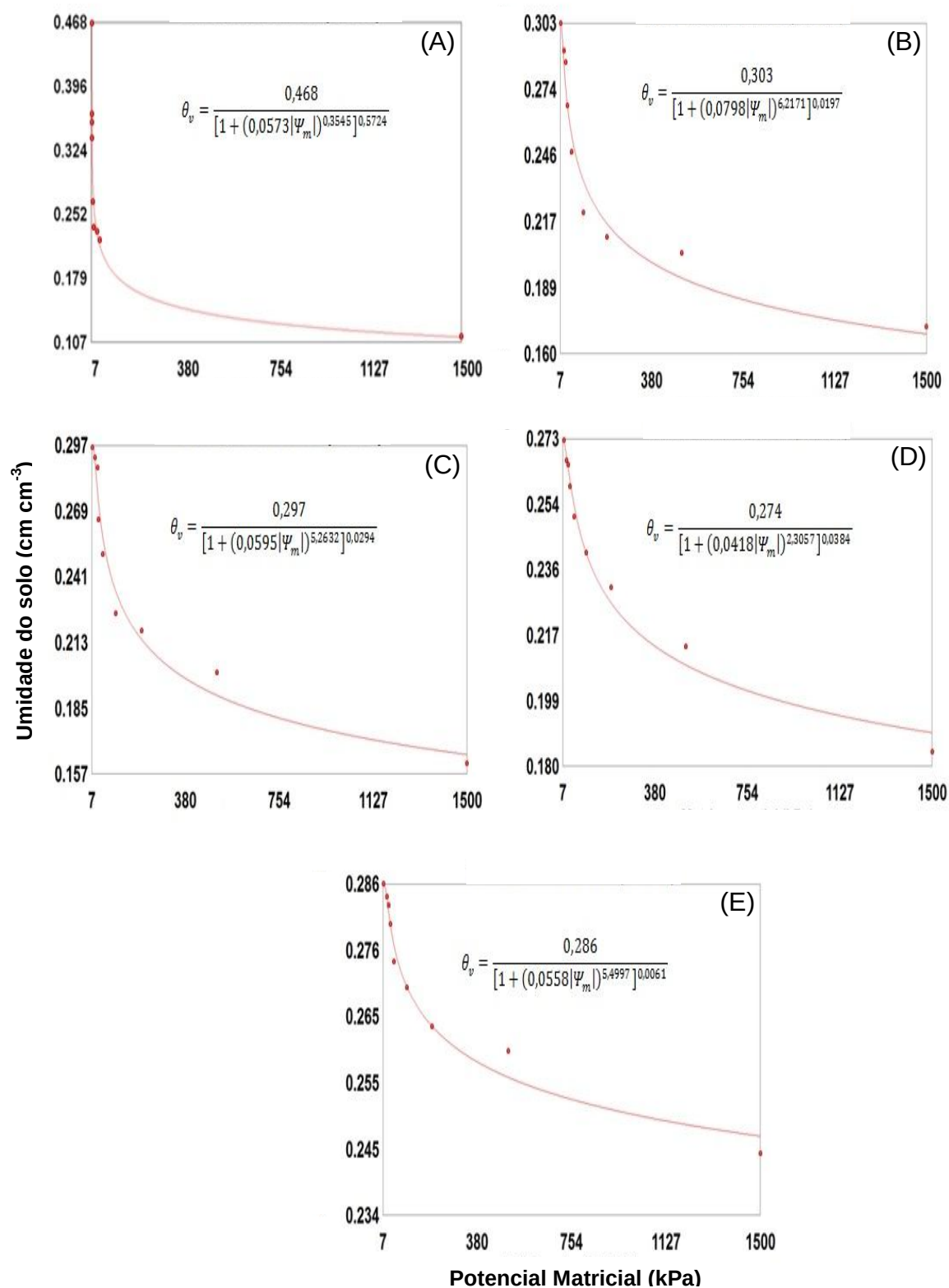


Figura 4. Curva de retenção de água no solo, gerada pelo programa Soil Water Retention Curve para a densidade 1,0 (A), 1,2 (B), 1,4 (C), 1,6 (D) e 1,8 (E) Mg m⁻³.

Os resultados de retenção de água foram interpolados pela equação de van Genuchten (1980) (eq. 2), com o auxílio do programa computacional Soil Water Retention Curve (versão 3.0), desenvolvido por Dourado Neto et al. (2000), que descrevem o comportamento da umidade do solo em função da tensão (Tabela 2).

$$\theta_v = \theta_r \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

Onde:

θ_v - umidade a base de volume, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r - umidade residual, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s - umidade de saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Ψ_m - Potencial matricial, em cm;

α, m, n - parâmetros do modelo.

Tabela 2. Valores dos parâmetros determinados pelo programa computacional Soil Water Retention Curve para cada densidade do solo.

Ds	θ_r	θ_s	A	M	N
1,0	0,000	0,468	0,0573	0,5724	0,3545
1,2	0,000	0,303	0,0798	0,0197	6,2171
1,4	0,000	0,297	0,0595	0,0294	5,2632
1,6	0,000	0,274	0,0418	0,0384	2,3057
1,8	0,000	0,286	0,0558	0,0061	5,4997

A manutenção da umidade do solo foi realizada por meio de tensiômetro instalado nos vasos de forma que houvesse o controle a umidade nas camadas compactadas a uma profundidade de 15 cm.

A instalação dos tensiômetros foram realizadas com o auxílio de trado de rosca, com diâmetro (1/2 polegada) semelhante ao dos tensiômetros permitindo uma boa fixação dos mesmos ao solo. Foram instalados tensiômetros em todas as repetições dos tratamentos, compreendendo um total de 52 unidades

experimentais. Para a instalação dos tensiômetros, os mesmos foram deixados por um período de 48 horas com as cápsulas submersas em água destilada, para a retirada de ar da cápsula porosa.

O monitoramento da tensão de água no solo foi realizado utilizando-se um tensímetro digital com a sensibilidade de 0,1 kPa. O manejo de água (momento e volume de irrigação) foi realizado com base na avaliação da tensão de água no solo. A irrigação foi realizada sempre que cada tensiômetro atingia a tensão proposta.

O volume de água aplicada por irrigação foi calculada com base na curva de retenção de água no solo, sendo que toda irrigação realizada foi realizada elevando-se a umidade do solo à capacidade de campo (10 kPa) (Bernardo et al., 2006).

Com os valores das tensões observadas, foram calculadas as umidades correspondentes, utilizando a curva de retenção de água no solo, sendo calculado o volume de reposição por meio da equação 3.

$$V = (\theta_{cc} - \theta_{atual}) \times 9000 \quad (3)$$

Onde:

V - volume de água, em cm³;

θ_{cc} - umidade na capacidade de campo, em cm³ cm⁻³;

θ_{atual} - umidade na tensão de irrigação, em cm³ cm⁻³;

9.000 - volume do vaso, em cm³.

De acordo com a densidade do solo foi realizada uma correção na equação 3, onde nas densidades de 1,2 a 1,8 Mg m⁻³ se utilizou a equação 4.

$$V = ((\theta_{cc_{1,0}} - \theta_{atual_{1,0}}) \times 6000) \times ((\theta_{cc_{int}} - \theta_{atual_{int}}) \times 3000) \quad (4)$$

Onde:

V - volume de água, em cm³;

$\theta_{cc1,0}$ - umidade na capacidade de campo (camadas superior e inferior), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

$\theta_{atual1,0}$ - umidade na tensão de irrigação (camadas superior e inferior), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

6000 - volume de solo no vaso (camadas superior e inferior), em cm^3 .

$\theta_{cc_{int}}$ - umidade na capacidade de campo (camada compactada), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

$\theta_{atual_{int}}$ - umidade na tensão de irrigação (camada compactada), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

3000 - volume de solo no vaso (camada compactada), em cm^3 .

Para a determinação da porosidade total (eq 5), macroporosidade (eq 7) e microporosidade (eq 6) na camada compactada do vaso foi utilizada a metodologia de acordo com Embrapa (1997), onde a determinação da macroporosidade e microporosidade do solo se deu com a aplicação de uma tensão de 6 kPa na câmara de Richards. A determinação da densidade de partículas foi realizada pelo método do balão volumétrico, obtendo se um valor de $2,33 \text{ g cm}^{-3}$.

Porosidade total

$$\alpha_s = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) \quad (5)$$

Onde:

α_s - porosidade total;

D_s - densidade do solo;

D_p - densidade de partículas.

Microporosidade

$$Mi = \frac{m_{60} - m_s}{V_t} \quad (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) \quad (6)$$

Onde:

M_i - Microporosidade;

$m_{60} - m_s$ – volume de água da amostra após ser submetida a uma tensão de 60cm de coluna de água e subtraída pela massa da amostra seca;

V_t - volume da amostra.

Macroporosidade

$$M_a = \alpha_s - Mi \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} \quad (7)$$

Para a determinação da resistência do solo a penetração foi utilizado o penetrômetro de mesa para solos MA 933, com um sistema de aquisição de dados penetrógrafo da versão 1010/03, com diâmetro da ponta de 3 mm, calibrado para o funcionamento em 30 mm/mim, de modo que se obteve os dados em kgf, sendo convertido posteriormente para MPa e o equipamento funcionou por 30 segundos de execução. Onde foram realizadas 3 repetições por parcela de solo. A resistência do solo a penetração foi determinada para cada densidade do solo, na umidade correspondente a tensão de 10 kPa (Freddi et al., 2007 a) sendo realizada em anéis volumétricos de 50 cm³.

Tabela 3 – Valores para macro, micro, porosidade total (cm³ cm⁻³) e resistência do solo a penetração (MPa) para as densidades do solo avaliadas.

Ds	Porosidade Total	Microporosidade	Macroporosidade	Resistência a Penetração
1,0	0,57	0,30	0,27	0,19
1,2	0,48	0,27	0,22	0,26
1,4	0,40	0,26	0,14	1,14
1,6	0,31	0,21	0,11	2,22
1,8	0,23	0,22	0,01	6,76

No dia 14 de julho de 2014 foi realizada a semeadura do milho nas unidades experimentais, foram semeadas 20 sementes a uma profundidade de 3 cm. A germinação das plântulas de milho tiveram inicio no dia 17 de julho, sendo que no dia 18 de julho ja havia ocorrido a germinação em todas as parcelas experimentais (Figura 5).



Figura 5. Germinação total das sementes de milho 2B688PW aos 4 dias após a semeadura.

Devido ao número de sementes plantadas ao terceiro dia após o início da germinação foi realizado o primeiro desbaste, deixando um total de 5 plantas por vaso. O segundo desbaste foi realizado no dia 23 de julho, ficando assim, duas plantas por vaso. O ultimo desbaste foi realizado no dia 25 de julho, ficando assim a uma planta por unidade experimental (Figura 6).

A adubação nitrogenada foi realizada em três parcelas (50 mg dm^{-3}), sendo a primeira aos sete dias após a emergência (DAE), a segunda aos 30 DAE e a terceira aos 60 DAE, compreendendo os estádios vegetativos V3, V8 e V12, respectivamente. Foi realizada adubação com nitrogênio com uma dose total de 150 mg dm^{-3} , sendo fornecida pela adubação com ureia. Sendo determinada a data de adubação nitrogenada por meio do estágio vegetativo da cultura.

Realizou-se a adubação com micronutrientes em aplicação única aos sete dias após a emergência da planta, utilizando-se $1,39 \text{ mg dm}^{-3}$ de H_3BO_3 ; $2,61 \text{ mg dm}^{-3}$ de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $7,79 \text{ mg dm}^{-3}$ de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e $0,36 \text{ mg dm}^{-3}$ de MoO_3 .



Figura 6. Unidade experimental com uma planta de milho, após desbaste final, aos 14 dias após a semeadura.

Nos dias 13 e 28 de agosto, 19 de setembro e 27 de outubro foram realizadas avaliações do desenvolvimento da cultura do milho, assim como produção de massa de matéria seca na ocasião do corte. Na avaliação realizada no dia 13 de agosto teve como finalidade avaliar o desenvolvimento da cultura do milho com relação apenas aos níveis de densidade do solo, enquanto as posteriores foram avaliadas também o efeito das tensões de água no solo.

Os tratamentos de tensão de água no solo foram realizados a partir dos 30 dias após a semeadura, sendo a irrigação realizada por meio de copo graduado, com a finalidade de elevação da umidade do solo a capacidade de campo, sempre que a umidade do solo atingia a tensão necessária para a irrigação de cada tratamento. O acompanhamento das tensões de água no solo foram realizados duas vezes ao dia, sendo uma no período matutino e outra no vespertino, com início as 8:00 e 14:00 horas, respectivamente.

Aos 30 dias após a semeadura do milho, momento no qual se iniciou os tratamentos de irrigação por meio de tensões de água no solo, foi instalado na região central das parcelas experimentais um termohigrômetro a uma altura de

1,50 m para determinação da variação diária de temperatura e umidade relativa do ar (Figura 7).



Figura 7. Termohigrômetro localizado na região central do experimento.

No termohigrômetro foram realizadas leituras diárias durante o período matutino, com a finalidade de determinar as temperaturas e umidades relativas do dia anterior, sendo observada uma temperatura média de 31,51°C e uma umidade relativa média de 60,13% (Figuras 8 e 9).

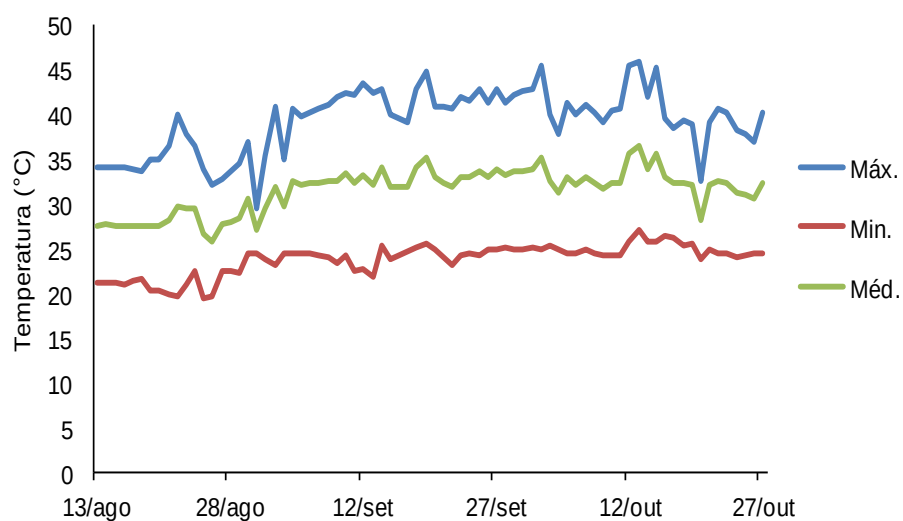


Figura 8. Variação da temperatura durante o experimento em casa de vegetação no período de 13 de agosto a 27 de outubro de 2014. Rondonópolis-MT.

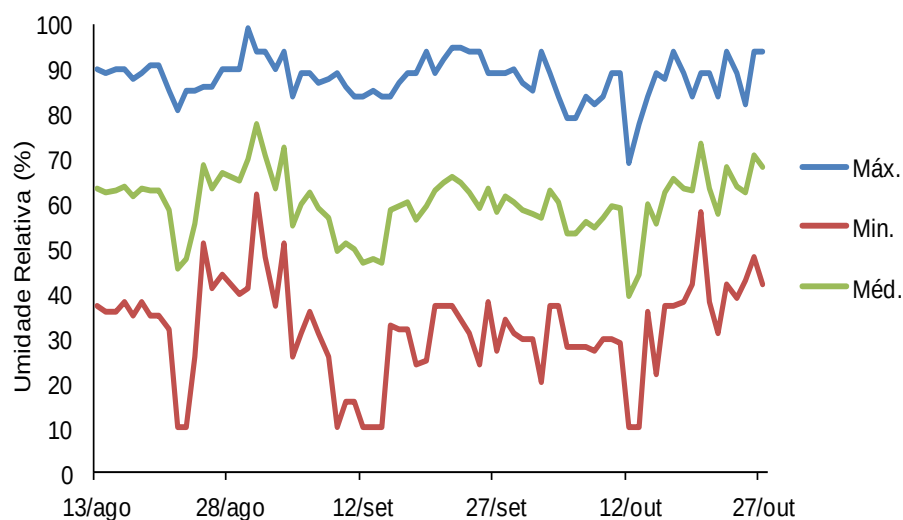


Figura 9. Variação da umidade relativa durante o experimento em casa de vegetação no período de 13 de agosto a 27 de outubro de 2014. Rondonópolis-MT.

A determinação do índice de clorofila foi realizada com o medidor portátil de clorofila Falker, com o uso desse clorofilômetro tem-se valores indiretos do teor de clorofila na folha, de forma não destrutiva. As leituras foram realizadas no terço médio da lâmina foliar da primeira e segunda folha totalmente expandidas. Foram realizadas 3 leituras por parcela experimental.

A altura das plantas de milho foram determinadas com utilização de trena métrica graduada (Figura 10) e o diâmetro de colmos com utilização de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm (Figura 11).



Figura 10. Determinação da altura de plantas de milho aos 45 dias após semeadura.



Figura 11. Determinação do diâmetro de plantas de milho com auxílio de paquímetro digital aos 45 dias após semeadura.

As plantas de milho foram colhidas aos 104 dias após a semeadura. Foram separadas as folhas e colmos das espigas. Sendo realizada medição da altura de plantas, contagem do número de folhas, diâmetro do colmo e índice de clorofila.

Todo material vegetal colhido foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas. Posteriormente, todo material foi pesado em balança

de precisão para a determinação de produção de massa seca da parte aérea (espigas, folhas e colmos).

As raízes foram separadas de acordo com a camada de solo (0-10, 10-20, 20-30 cm de profundidade), foram lavadas em água corrente para retirada de todo solo presente na mesma, em seguida foi realizada uma secagem em ambiente aberto e posteriormente acondicionadas em sacos de papel e levadas a estufa de circulação forçada de ar a 65°C por um período de 72 horas.

As variáveis avaliadas após a coleta do experimento foram diâmetro de espigas e sabugos, comprimento de sabugo, massa seca de folhas, massa seca do colmo, massa seca de pendão, massa seca de raízes, massa seca de espiga, massa seca de sabugo e massa seca total.

Todos os resultados receberam tratamento estatístico, com análise em superfície de resposta por meio do *Statistical Analysis System* (SAS, 2002). Inicialmente foi realizada a análise de variância para as combinações das densidades e tensões de água no solo e, em função da significância da interação dessas doses no teste F.

Nos casos em que as interações densidades do solo x tensão de água não foram significativas, efetuou-se o estudo de regressão de primeiro e segundo graus, por meio do comando GLM. Utilizou-se o nível de significância de 5% em todos os testes estatísticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Número de folhas

Nas avaliações, realizadas aos 30 (Figura 12 A) e 45 (Figura 12 B) dias após a semeadura, houve diferença significativa para a variável número de folhas de plantas de milho, em função das densidades de solo, observando-se regressão linear decrescente e quadrática, respectivamente. Desta forma, aos 30 dias após a semeadura, na densidade de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ obteve-se uma produção de 7,95 folhas por planta. Aos 45 dias após a semeadura, houve acréscimo no número de folhas de plantas de milho até a densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, em relação aos níveis de densidade do solo.

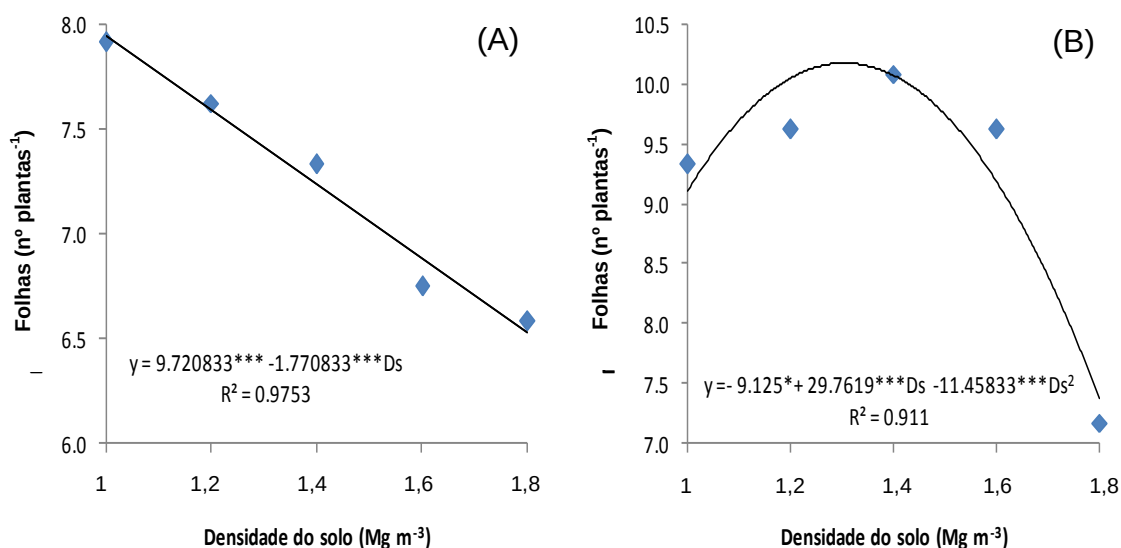


Figura 12. Número de folhas da cultura do milho em função da densidade do solo aos (A) 30 dias após a semeadura e (B) aos 45 dias após a semeadura.

Aos 67 dias após semeadura não houve diferença significativa para nenhum dos fatores avaliados (Tabela 4). Isto ocorreu devido as plantas de milho nesse período terem se equiparado em seu estágio fisiológico vegetativo. Outro fator que pode ter sido determinante para que não se observasse diferença significativa para esta variável foi a deficiência de potássio apresentada pelas plantas (Figura 13).



Figura 13. Plantas de milho apresentando sintomas de deficiência de potássio aos 67 dias após a semeadura.

Tabela 4 - Número folhas de plantas de milho em função dos níveis de densidade e tensões de água no solo.

Avaliações (DAS)	Densidade do solo				
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
67	13	14	13	13	11
	Tensões de água				
	10	20	30	40	50
45	9	10	9	9	9
67	12	13	12	14	13

O número de folhas no final do ciclo da cultura do milho não foi influenciado pela densidade do solo, pois isso é provavelmente uma característica determinada pela genética da planta (Cortez et al., 2007).

Bonfim-Silva et al. (2011) ao estudarem compactação do solo na cultura do trigo em Latossolo do Cerrado, coletado na mesma área do presente estudo, assim como Fagundes (2012) com a cultura da cana-de-açúcar, inferiram que o número de folhas foi influenciado pelas densidades do solo aos 51 e 93 dias após a emergência das plantas, onde a maior produção de folhas foi observada na densidade do solo de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$. Os valores encontrados por esses autores em que a densidade do solo proporciona maior número de folhas estão bem próximos do observados na segunda avaliação do presente estudo.

Trabalho realizado por Bonfim-Silva et al. (2013) ao avaliarem duas cultivares de trigo (BRS Guamirim e IAC 350), também em Latossolo Vermelho, observaram efeito isolado da compactação independente da cultivar utilizada com um modelo de regressão linear decrescente. Esses resultados são semelhante aos observados na avaliação realizada no milho aos 35 dias após a semeadura.

Em nenhuma das quatro avaliações realizadas se observou diferença significativa na produção de folhas em função das tensões de água no solo. Segundo Santos e Carlesso (1998) a sensibilidade do desenvolvimento das folhas ao déficit hídrico pode mudar durante o dia, ou nas diferentes estações do ano. Podendo fatores relacionados ao clima terem influenciados nos resultados dessa variável, pois durante a condução do experimento se obteve com frequência temperaturas acima de 35°C , bem como umidade relativa muito baixa.

Brito et al. (2013), estudando a resposta do milho doce ao estresse hídrico, aos 90 dias após a semeadura, também observaram não haver diferença significativa para o número de folhas em função das lâminas de água aplicadas. Todavia, a medida que se aumentou a umidade do solo houve um acréscimo da área foliar para a cultura. Segundo Taiz e Zeiger (1991) a limitação foliar pode ser considerada como uma primeira reação das plantas em relação ao déficit hídrico.

Herrero e Johnson (1981) trabalhando com milho, demonstraram que, em condições de déficit hídrico, há um acentuado declínio na expansão das folhas, diferindo do resultado do presente estudo.

4.2 Altura de plantas

A altura de plantas se diferenciou estatisticamente aos 30, 45 e 67 dias após a semeadura em função dos níveis de densidade do solo, com ajuste a modelo de regressão linear decrescente aos 30 dias e à regressão quadrática aos 45 e 67 dias após a semeadura.

Aos 35 dias após a semeadura no nível de densidade de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ a média da altura de plantas avaliadas foi de 106,95 cm, sendo esta a maior altura de plantas dentro do intervalo experimental (Figura 14 A), havendo um decréscimo de 21,39% no comprimento das plantas avaliadas na densidade do solo de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ (84,08 cm).

Aos 45 (Figura 14 B) dias após a semeadura à altura de plantas se diferenciou de forma isolada apenas em função das densidades do solo aplicadas, enquanto que aos 67 dias após a semeadura houve efeito isolado para os níveis de densidade (Figura 14 C) e tensões de água no solo (Figura 15 A).

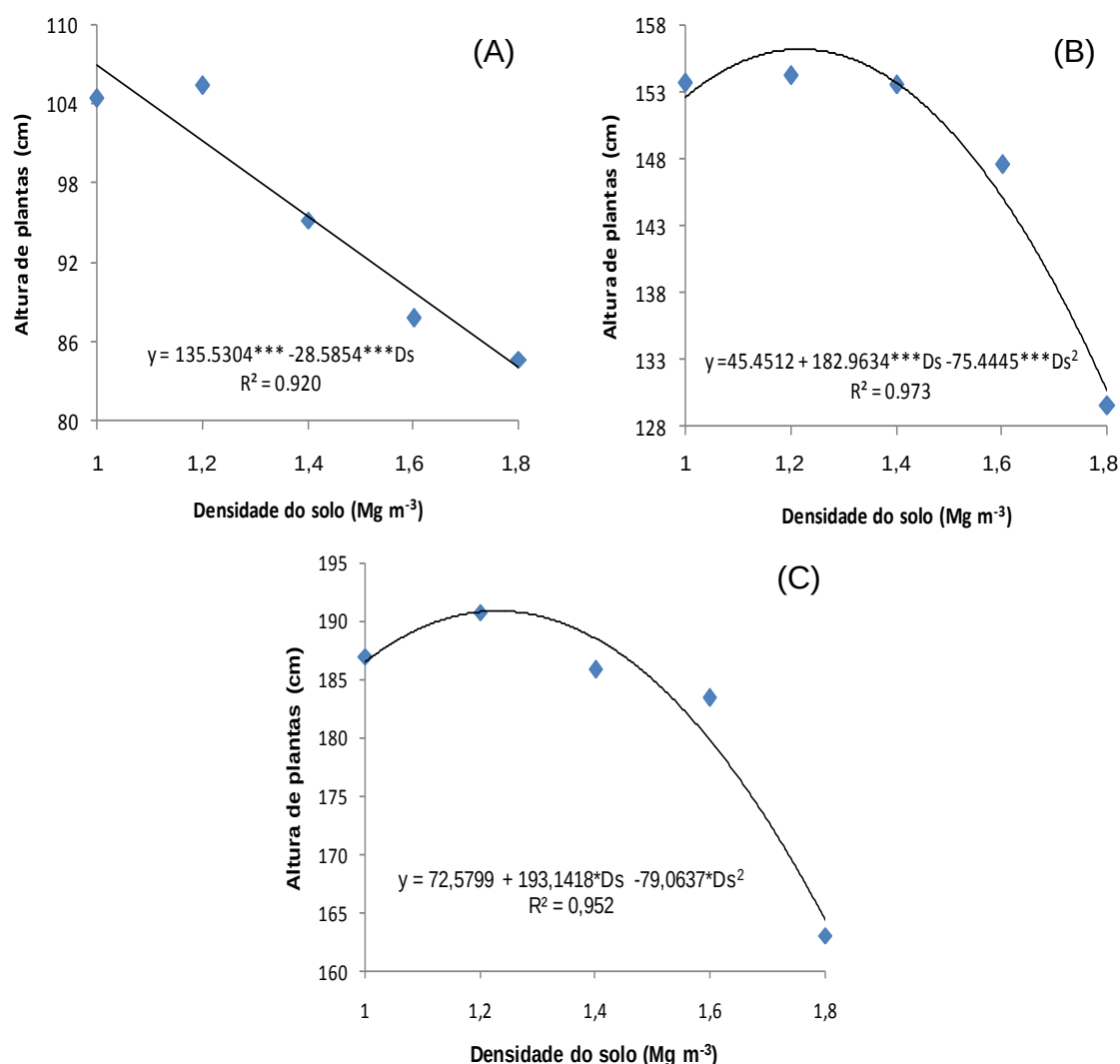


Figura 14. Altura de plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30, (B) 45 e (C) 67 dias após a semeadura.

Na ocasião da colheita, aos 104 dias após a semeadura, os resultados referentes a altura de plantas diferenciou-se das avaliações anteriores, pois além de não haver interação entre a densidade do solo e as tensões de água, houve efeito isolado apenas para as tensões de água aplicadas.

Tanto na avaliação realizada aos 67 dias após a semeadura, quanto aos 104 dias, na ocasião da colheita, o crescimento das plantas de milho respondeu negativamente ao aumento das tensões de água no solo, observando assim regressão linear decrescente, ou seja, a tensão que proporcionou maiores alturas de plantas de milho dentro do intervalo experimental foi a de 10 kPa. Havendo

assim um decréscimo de 10,06 e 7,06% para a altura de plantas de milho na tensão de água no solo de 50 kPa nas avaliações realizadas aos 67 (Figura 15 A) e aos 104 (Figura 15 B) dias após a semeadura, respectivamente.

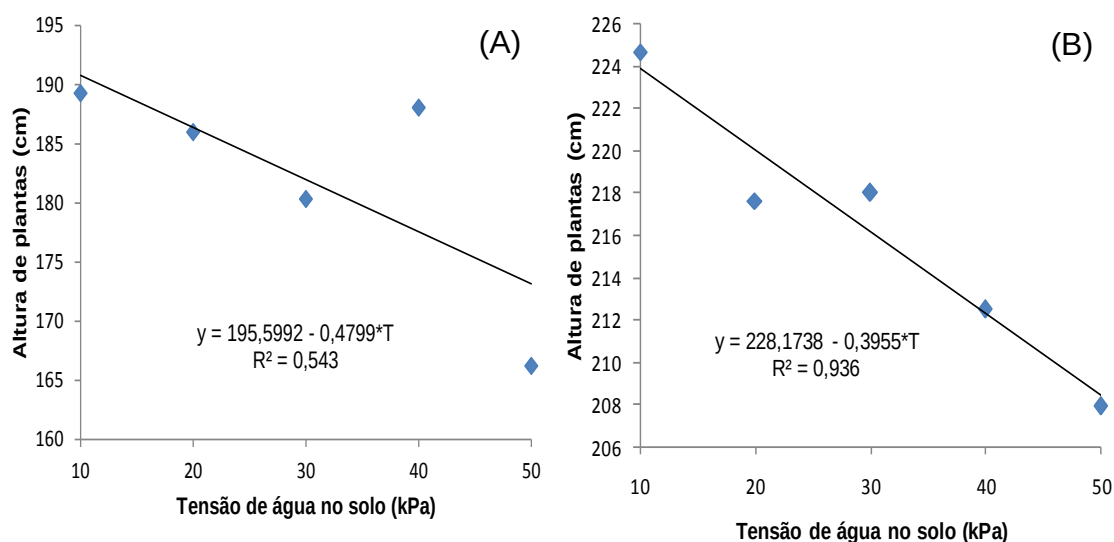


Figura 15. Altura de plantas de milho em função da tensão de água no solo aos (A) 67 e (B) 104 dias após a semeadura.

Em relação à densidade do solo à altura de plantas de milho aos 30 dias após a semeadura tiveram ajustes a modelos de regressão diferentemente das avaliações aos 45 e 67 dias após a semeadura, sendo linear e quadrático, respectivamente. Observou-se ainda no presente estudo que aos 45 e 67 dias após a semeadura a densidade do solo que proporcionou maiores alturas de plantas foi a de 1,21 e 1,22 Mg m^{-3} , respectivamente.

Na ocasião do corte não houve diferença significativa, provavelmente devido ao fato de que o sistema radicular das plantas de milho nas primeiras avaliações ainda não haviam rompido a camada compactada, obtendo assim um sistema radicular mais desenvolvido, tendo maior profundidade de exploração do solo e, como consequência, maior absorção de água e nutrientes (Valicheski et al., 2012).

A diferença dos valores observados nas avaliações aos 45 e 67 dias após a semeadura, são menores ao se comparar as densidades do solo entre 1,0 e 1,6

Mg m^{-3} . Havendo maior diferença entre a altura de plantas com relação a densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$.

Semelhante aos resultados obtido por Souza et al. (2008) aos 21 dias de cultivo e Foloni et al. (2003) aos 40 dias de cultivo, que observaram que apenas a máxima densidade do solo ($1,67 \text{ Mg m}^{-3}$) diferiu das demais de forma significativa e após 40 dias de cultivo do milho, houve redução de crescimento da parte aérea de duas cultivares na densidade de solo correspondente a $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente, influenciando na altura das plantas de milho. Segundo estes autores, o estágio de desenvolvimento das plantas, na ocasião da avaliação, e a condição de cultivo influenciaram na resposta do crescimento aéreo, reforçando relatos sobre a dificuldade de se generalizar conclusões quanto ao desenvolvimento das plantas em solos compactados (Freddi et al., 2007 a)

Com uma resistência a penetração acima de $1,14 \text{ MPa}$, observou-se redução na altura de plantas em todas as avaliações realizadas, apesar de aos 30 dias após a semeadura a equação de regressão expressar uma linha de tendência linear decrescente, observa-se maiores médias na densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ com relação a densidade de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$, com resistências a penetração de $0,19$ e $0,26 \text{ MPa}$, respectivamente. Dados semelhantes aos de Freddi et al. (2007 a) e Freddi et al. (2009 a), porém estes autores obtiveram seus resultados em experimentos de campo.

Ao se observar o gráfico da figura 15 A, pode-se observar que os valores médios de altura de planta na tensão de água no solo de 40 kPa , estão dispersos com relação a linha de tendência proporcionada pela equação de regressão. Provavelmente, por não possuir combinação com densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, responsável pelas menores alturas médias de plantas de milho em todas as avaliações, sendo a única densidade do solo a apresentar diferença significativa para altura de plantas aos 67 dias após a semeadura.

Os valores de altura de plantas de milho para a tensão de água no solo de 40 kPa , são semelhantes aos observados quando se utilizou de uma tensão de

20 kPa, sendo que as tensões de 40 e 20 kPa possuem as mesmas combinações de densidade do solo (1,2 e 1,6 Mg m⁻³). Nas avaliações realizadas, independente do ajuste da curva de regressão, a densidade do solo de 1,2 Mg m⁻³, proporcionou maiores médias observadas para a altura de plantas de milho, sendo assim, provavelmente, mesmo não havendo interação significativa para tensão de água e densidade do solo para a altura de plantas de milho, houve uma relação para esta variável em função da combinação de tratamentos aplicados.

Schlichting (2012) ao estudar o desenvolvimento da cultura do milho em condições controladas sob doses de nitrogênio e tensões de água no solo, observou que a tensão de água no solo teve efeito isolado para esta variável, sendo que a tensão de 16,15 kPa proporcionou maiores plantas de milho, a divergência de valores encontrados por este autor dos apresentados neste trabalho podem estar relacionados com o volume de solo utilizado na unidade experimental, assim como, os valores de tensões de água no solo adotadas para determinação do momento de irrigação, determinando assim diferentes turnos de rega.

Por outro lado, Rivera-Hernández et al. (2009) ao avaliarem a produção de milho doce em resposta a tensões de água no solo (5, 30, 55 e 80 kPa) e adubação com fósforo, observaram que há medida em que se diminuiu a umidade do solo, houve um menor crescimento de plantas, havendo uma diferença de 17,29% para a altura de plantas entre os tratamentos de 5 e 80 kPa, ou seja, com menores turnos de rega a cultura do milho tende a ter maior crescimento de plantas.

O crescimento das plantas de milho foram influenciadas pela quantidade de água e frequência com as quais foram realizadas seu fornecimento. Isso foi observado pela resposta da cultura as diferentes tensões de reposição de água (Rivera-Hernández et al., 2009).

Segundo Schlichting (2012) o crescimento da planta depende da água absorvida que causa a expansão celular, e o transporte de substâncias que

ocorre em meio aquoso, as plantas submetidas as maiores tensões de água no solo tiveram menor quantidade de água absorvida, resultando em menor altura de plantas.

4.3 Diâmetro do colmo

Para a variável diâmetro de colmo não houve interação entre a densidade do solo e as tensões de água avaliadas, havendo efeito isolado apenas para a densidade do solo nas quatro avaliações realizadas.

Aos 30 dias (Figura 16A) após a semeadura houve diferença no diâmetro de colmos da cultura do milho em função da compactação aplicada no solo. Observando-se uma regressão linear decrescente, enquanto aos 45 (Figura 16B), 67 (Figura 16C) e 104 (Figura 16D) dias, respectivamente após a semeadura, houve uma resposta quadrática de regressão, havendo assim diferença para o diâmetro do colmo de forma isolada apenas para os níveis de densidade do solo.

O maior diâmetro de colmo de plantas de milho aos 30 dias após a semeadura foi de 14,40 mm na densidade de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$, nas avaliações aos 45, 67 e 104 dias após a semeadura foram observados maiores diâmetros de colmo nas densidades do solo de 1,23, 1,22 e $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente.

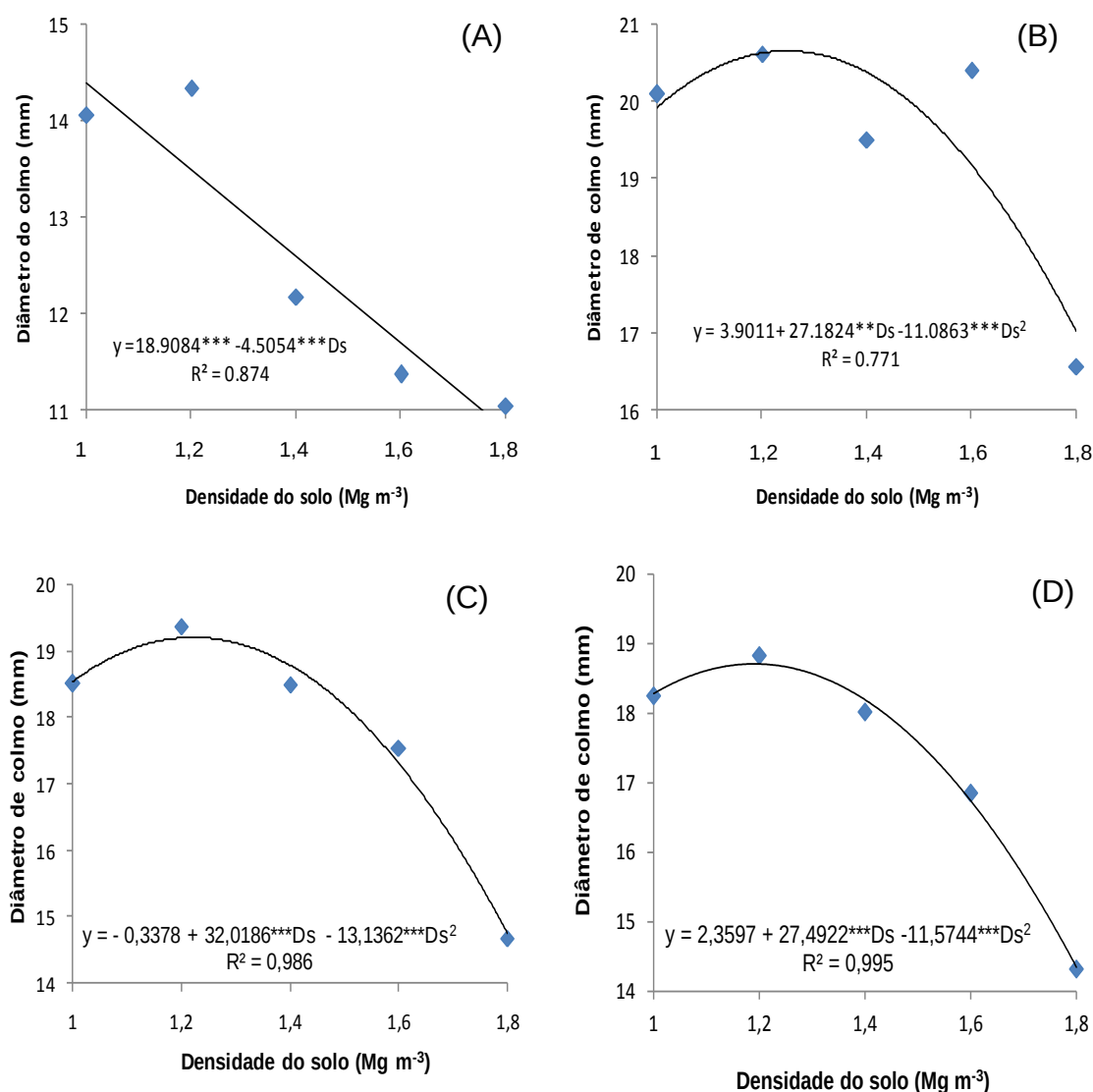


Figura 16. Diâmetro do colmo de plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30, (B) 45, (C) 67 e (D) 104 dias após a semeadura.

Freddi et al. (2009 a) observaram que os dois híbridos de milho, que com aumento da resistência do solo à penetração entre 0,87 e 2,15 MPa de um Latossolo Vermelho de textura média, na profundidade de 0–20 cm, submetido a um tensão de água de 10 kPa, reduziu linearmente o diâmetro do colmo em 13%, relacionando a menor com a maior resistência a penetração.

Com a diminuição de macroporos presente na camada compactada do solo, houve uma redução da quantidade de água disponível para plantas, independente da tensão de água utilizada, resultando provavelmente em menor

fornecimento de nutrientes para as plantas. Todavia, a redução da água disponível para as plantas, resulta em maior resistência a penetração.

Sendo uma das principais funções do colmo a reserva de carboidrato, pode-se inferir que a não produção de grãos de milho no presente estudo esta relacionado com a redução do carboidrato armazenado, sendo que a cada avaliação realizada houve redução no diâmetro do colmo, sendo que a maior parte das reservas de carboidrato das plantas foram utilizados na formação de novas folhas (Magalhães; Paiva, 1993).

Estudos com a cultura do milho, em campo (Rivera-Hernández et al., 2009) e em casa de vegetação (Schlichting, 2012) encontraram resultados divergentes dos aqui apresentados quanto as tensões de água no solo utilizadas para irrigação. Entre os motivos para essas divergências nos resultados pode vir desde a genética dos híbridos utilizados por estes autores (A-7573 e DKB 390 PRO, respectivamente), quanto as condições de estudo. A diferença de solo e de clima pode ser fator para explicar os resultados divergentes com os de Rivera-Hernández et al. (2009), enquanto que a divergência para os resultados observados por Schlichting (2012) podem estar relacionado com o volume de solo da unidade experimental.

Rivera-Hernández et al. (2009) aplicaram tratamentos que variaram de 5 a 80 kPa, havendo uma redução no diâmetro do colmo de 13,84%, enquanto Schlichting (2012) ao avaliar a cultura do milho sob níveis de nitrogênio e tensões de água em condições controladas, com solo coletado na mesma área e com a mesma dose de nitrogênio do presente estudo, observaram que, a, a tensão de 15 kPa proporcionou colmos maiores diâmetros.

4.4 Índice de clorofila

Aos 30 (Figura 17A) e 45 (Figura 17B) dias após a semeadura à cultura do milho foi influenciada significativamente pela densidade do solo, com ajuste a um modelo quadrático de regressão. Sendo que aos 30 dias houve diferença de resposta para o índice de clorofila com relação as outras variáveis avaliadas na

mesma data. Com maiores índices de clorofila na densidade do solo de 1,17 e 1,32 Mg m^{-3} , respectivamente.

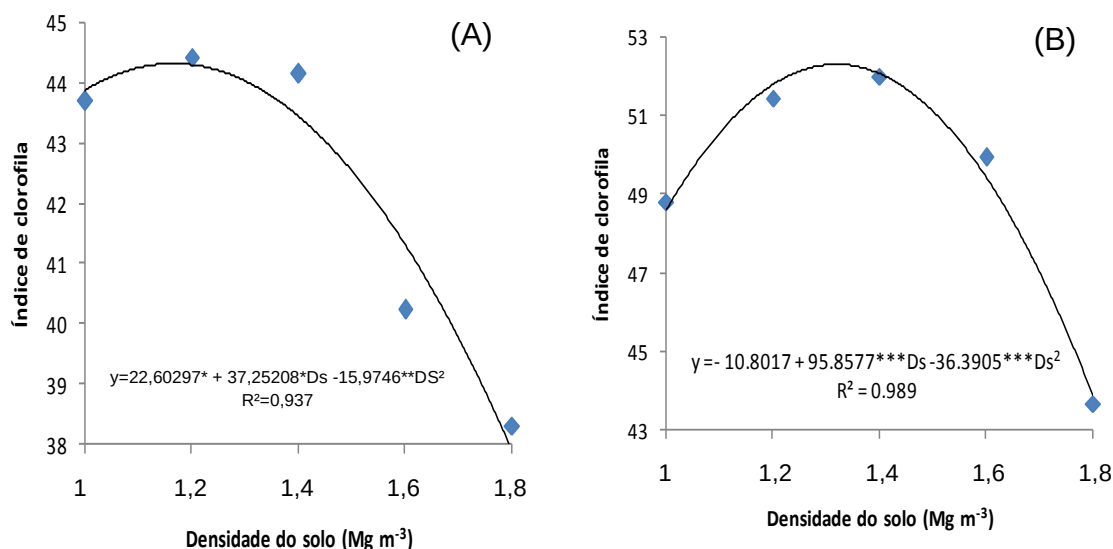


Figura 17. Índice de clorofila em plantas de milho em função da densidade do solo aos (A) 30 e (B) 45 dias após a semeadura.

Observou-se aos 30 dias após a semeadura, um índice de clorofila de 44,32, nas plantas de milho submetidas a uma compactação de solo referente a densidade de 1,8 Mg m^{-3} esse índice de clorofila caiu para 37,90. Porém, aos 45 dias após a semeadura, o índice de clorofila na densidade do solo de 1,80 Mg m^{-3} foi de 43,84, sendo que em todas as avaliações, os valores observados foram inferiores ao considerado adequado (58,0) por Argenta et al. (2003).

Houve proximidade dos melhores e piores resultados encontrados nas avaliações aos 30 e 45 dias após a semeadura, respectivamente. Demonstrando aumento do índice de clorofila a medida em que a planta alterava seu ciclo vegetativo, porém em avaliações realizada aos 90 dias após a semeadura, os valores de índice de clorofila foram bem inferiores aos das primeiras duas avaliações, resultados semelhantes aos de Argenta et al. (2003) e Fonseca et al. (2012).

Segundo dados de Argenta et al. (2001), o índice de clorofila tende a aumentar durante o estágio vegetativo da cultura do milho, com redução em seu estágio reprodutivo. Estes autores observaram ainda que no desenvolvimento

inicial da cultura do milho a uma baixa correlação entre o índice indireto de clorofila e o teor de nitrogênio na folha, provavelmente, pelo nitrogênio ser utilizado para produção de outras estruturas na planta e não para formação de clorofila.

Para a variável índice de clorofila, foi realizada uma avaliação aos 90 dias após a semeadura (Figura 18), foi observado que houve efeito isolado para a tensão de água no solo, com uma resposta de regressão quadrática. Analisando a curva de regressão observa-se maiores índices de clorofila na tensão de água de 32,10 kPa, proporcionando incremento de 8,34% com relação ao tratamento de 10 kPa, que foi o que se obteve menores valores de índice de clorofila.

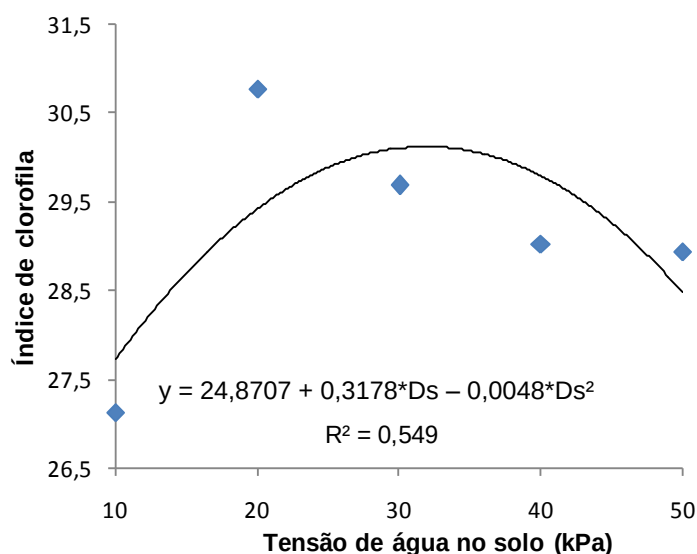


Figura 18. Índice de clorofila em plantas de milho em função da tensão de água no solo aos 90 dias após a semeadura.

O índice de clorofila, diferenciou-se das demais variáveis analisadas, com relação as duas primeiras avaliações, em que as variáveis número de folhas, altura de plantas e diâmetro de colmos, tiveram ajustes lineares de regressão na primeira avaliação e modelos quadráticos na segunda. Para o índice de clorofila houve ajuste ao modelo quadrático de regressão em ambas as avaliações realizadas.

A determinação do teor de clorofila pelo clorofilômetro apresenta algumas vantagens sobre o método de extração de clorofila. Destacando-se, que a leitura pode ser realizada em poucos minutos, o aparelho tem custo mínimo de manutenção, não há necessidade de envio de amostras para laboratório, com economia de tempo e dinheiro, e podem ser realizadas quantas amostras forem necessárias, sem destruição de folhas (Argenta et al., 2001).

Ao observar a figura 18, nota-se que na tensão de água de 10 kPa os valores de índice de clorofila foram inferiores a todos os demais tratamentos, desta forma, diferenciando de todas as outras variáveis avaliadas neste trabalho, onde a linha de tendência de acordo com a equação de regressão sempre teve ajuste a modelo linear decrescente. Segundo Marengo e Lopes (2007) existe uma alta correlação entre a intensidade do verde e o teor de clorofila com a concentração de nitrogênio na folha, sendo que o teor de nitrogênio da folha e a umidade do solo são fatores que afetam a atividade fotossintética dos vegetais.

Medeiros et al. (2005) constataram que houve redução no acúmulo de nitrogênio na parte aérea do arroz de terras altas BRS Liderança, em condições controladas, com o aumento dos níveis de compactação do solo, onde relataram que isso deve-se à redução da porosidade total limitando a aeração do solo, diminuindo a taxa de infiltração, condutividade hidráulica e o fluxo de água no solo. Essas características são essenciais para a absorção de água e de nutrientes pelas raízes, principalmente no que diz respeito ao nitrogênio, em que o contato íon-raiz ocorre predominantemente por fluxo de massa.

Desta forma, pode ser explicado o maior índice de clorofila para a tensão de água no solo de 20 kPa como momento de irrigação na cultura do milho, sendo que para esse tratamento, em seu fatorial fracionado, não houve combinação com a densidade do solo de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, que resultou em número insignificante de macroporos e maior resistência do solo a penetração, sendo que os maiores índices de clorofila foram observadas nas densidades do solo no intervalo entre os níveis de densidade que foram combinados com a tensão de 20 kPa.

Assim, com as células túrgidas, sujeitas a uma disponibilidade hídrica adequada, o produto da fotossíntese pode ser usado para transformar o CO₂ do ar em moléculas mais complexas que, após serem formadas, são transferidas às células dreno por meio do floema e com energia da pressão exercida pela solução (Taiz; Zeiger, 2009).

Kobaissi et al. (2013) ao estudarem dois solos característicos do Líbano, com duas densidades (1,25 e 1,45 Mg m⁻³) na cultura do milho irrigado e não irrigado, observaram que houve uma relação positiva com o sistema irrigado e com menor densidade do solo para a variável teor de clorofila total, ou seja, quando se tem uma disponibilidade de água adequada, juntamente com uma densidade do solo que não se trone limitante para o desenvolvimento da cultura, pode-se obter maiores índices de clorofila para a cultura do milho.

Cabral et al. (2012) constataram que houve redução na concentração de nitrogênio nas folhas dos capins Mombaça e Piatã com o aumento das densidades do solo e observaram a maior concentração de nitrogênio com o solo na densidade de 1,28 Mg m⁻³. Inferiram ainda que a compactação reduz a porosidade do solo e esta, por sua vez, altera a dinâmica de água no solo, que é o meio pelo qual os nutrientes são absorvidos e disponibilizados para as plantas.

Ainda em relação a absorção de nitrogênio, Bingham et al. (2010), observaram redução na absorção desse nutriente pela cevada na densidade do solo de 1,1 Mg m⁻³; contudo, quando se aumentou a dose de nitrogênio esse efeito desapareceu, demonstrando que a intensificação da adubação amenizou as consequências da compactação e supriu a necessidade de nitrogênio da planta.

4.5 Massa seca de folhas

Para a variável massa seca de folhas não houve interação entre as tensões de água e a densidade do solo. Havendo efeito isolado para ambos os tratamentos.

Ao analisar os efeitos da densidade do solo para esta variável observou-se um ajuste a modelo quadrático de regressão. A densidade do solo que proporcionou maior massa seca de folhas foi a de $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$, proporcionando uma massa de $37,19 \text{ g}$ por planta (Figura 19A). Porém ao observar os efeitos isolados da tensão de água para irrigação da planta, houve um ajuste linear decrescente. Ou seja, quando houve fornecimento de água para a planta com o solo mais seco, obteve-se menor massa seca de folhas.

Sendo assim, dentro do intervalo experimental, a tensão de 10 kPa foi a que proporcionou maiores valores de massa seca de folhas ($35,74 \text{ g}$ por planta), com um decréscimo de $12,38\%$ em relação ao momento de irrigação na tensão de 50 kPa (Figura 19B).

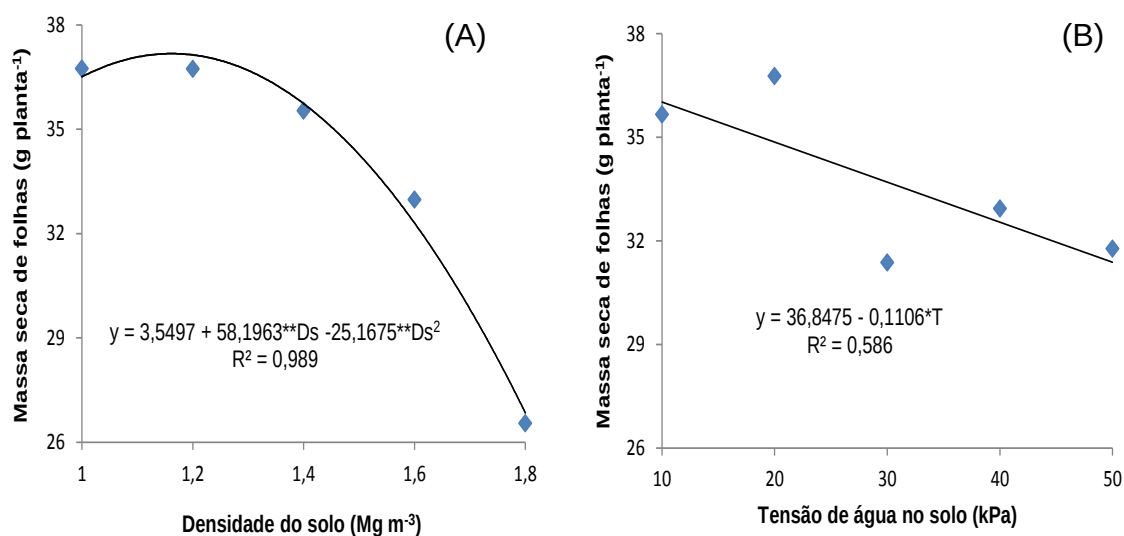


Figura 19. Massa seca de folhas de milho em função da (A) densidade do solo e da (B) tensão de água no solo.

Bonelli et al. (2011) ao avaliarem o desenvolvimento das gramíneas capins Piatã e Mobaça, observaram que as mesmas responderam de forma diferente das observadas no presente estudo, com relação aos níveis de densidade para a cultura do milho. Nesse estudo, os autores observaram que o capim piatã não sofreu efeito em função das densidades do solo, enquanto o mombaça se ajustou a regressão linear decrescente.

Esses resultados demonstram que as gramíneas podem responder de formas diferentes ao estresse ocasionado por elevados níveis de densidade do solo, de acordo com a cultura utilizada.

Na figura 19B pode-se observar uma alta dispersão entre as médias observadas e as médias estimadas pela equação de regressão, assim como maiores médias nas tensões de 20 e 40 kPa com relação as tensões de 10 e 30 kPa, respectivamente, mesmo com ajuste ao modelo de regressão linear decrescente.

Provavelmente, como já citado anteriormente, as tensões de 20 e 40 kPa, de acordo com o fatorial fracionado, não possuíram combinações com a densidade do solo de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, que entre os tratamentos aplicados foi o que ocasionou maior perda de massa seca de folhas. Em contrapartida, estas tensões foram combinadas com a densidade de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, que foi entre os tratamentos aplicados, o mais próximo da densidade de maior produção de massa seca de folhas de acordo com a equação e curva de regressão. Demonstrando assim, que mesmo não havendo interação entre os níveis de densidade e tensões de água no solo, houve uma relação entre ambos na produção de massa seca de folhas.

Brito et al. (2013) e Rivera-Hernández et al. (2009), analisando o crescimento de milho doce em função da água evapotranspirada e por tensões de água no solo, respectivamente, verificaram redução na fitomassa com menor reposição da água evapotranspirada e com maiores tensões de água, ou seja, com o solo com menor disponibilidade hídrica.

Uma importante observação a ser feita é que com irrigações com tensões de água no solo a partir de 5 kPa (Rivera-Hernaández et al., 2009), 10 kPa (adota neste experimento) e 15 kPa (Schlichting, 2012) a resposta da cultura do milho foi linearmente decrescente, independente da variação entre os tratamentos, assim como as maiores tensões de água aplicadas (80, 50 e 55, respectivamente).

Sendo assim, pode-se dizer que com a redução da disponibilidade hídrica as plantas de milho obtiveram redução de sua fitomassa, e que tal situação está

relacionada à tensão de turgor, que é necessária para que haja fluxo de material orgânico no interior da planta (Brito et al., 2013).

4.6 Massa seca de colmo

A variável massa seca de colmo não se diferenciou estatisticamente quanto a interação entre os níveis de densidade e tensão de água no solo. Dessa forma, houve efeito isolado para ambos os tratamentos aplicados.

Nesse contexto, a resposta das plantas de milho para as densidades de solo as quais foram submetidas, observou-se um ajuste ao modelo quadrático de regressão, com melhor desempenho na densidade de $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$, proporcionando uma produção de 80,64 g de massa seca de colmo por planta, com incremento de 29,02% (Figura 20A).

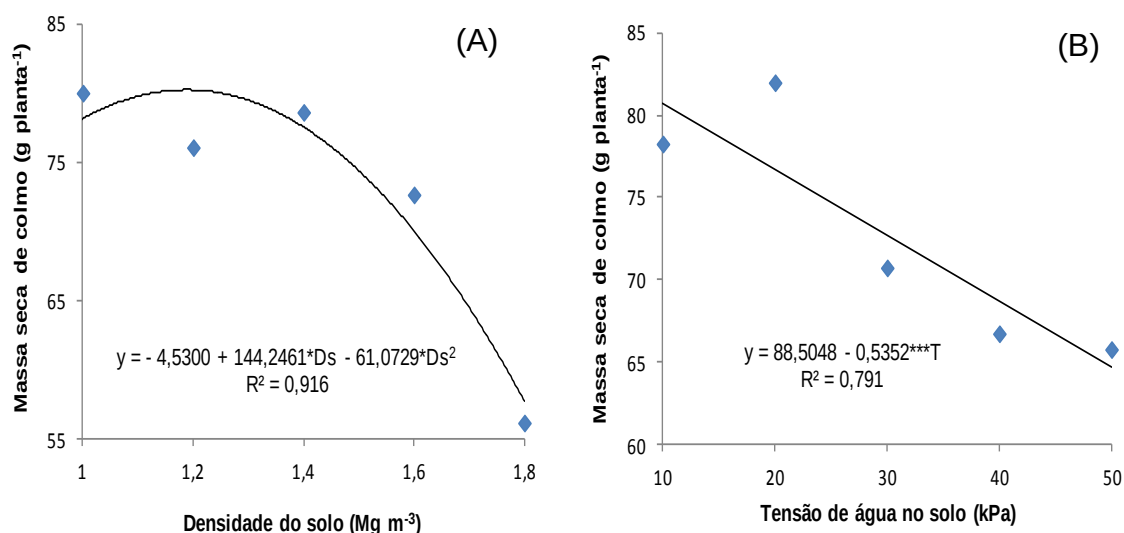


Figura 20. Massa seca de colmo em plantas de milho em função da (A) densidade do solo e (B) tensões de água no solo.

Porém, o ajuste observado para massa seca de colmo em função das tensões de água no solo para qual o milho foi submetido, foi linear decrescente. Dessa forma, dentro do intervalo experimental, a tensão de 10 kPa proporcionou maior massa seca de colmo com uma produção de 83,15 g por planta, sendo que na tensão de 50 kPa, houve um decréscimo de 25,74% na produção de massa seca de colmo (Figura 20B).

A cultura do milho se mostrou sensível ao aumento de densidade do solo, assim como o capim Marandu (Bonfim-Silva et al., 2012) e a cana-de-açúcar (Fagundes et al., 2014), enquanto que o capim Xaraés se mostrou resistente ao aumento dos níveis de densidade do solo até $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ (Bonfim-Silva et al., 2012). Sendo que a variedade de cana-de-açúcar RB931011, obteve-se valores de densidade do solo limitantes iguais aos da cultura do milho no presente estudo, mostrando a semelhança entre as variedades utilizadas nestas duas gramíneas como resposta ao aumento do nível de densidade do solo.

Mesmo na havendo diferença no diâmetro do colmo da cultura do milho em função das tensões de água aplicadas, observou-se que houve ajuste para massa seca de colmo, provavelmente houve esta diferença em função da altura de plantas, sendo que mesmo colmo com diâmetros estatisticamente iguais, houveram diferença no comprimento do mesmo.

Corroborando com os resultados obtidos, Rivera-Hernández et al. (2009) e Schlichting (2012) observaram que a medida em que se aumentou a tensão de água no solo, houve decréscimo na produção de massa seca de colmo da cultura do milho, observando uma redução de 32,88% em sua produção quando comparado as tensões de 5 e 55 kPa e um decréscimo de 25,53% ao se comparar as tensões de 15 e 55 kPa, respectivamente.

Enquanto que Brito et al. (2013) ao avaliarem a produção de massa seca de milho doce sob estresse hídrico, observaram que ao aumentar em 20% a lâmina de água evapotranspirada, tem-se um incremento de 47,55% em formação de fitomassa do caule.

Sendo assim, a massa seca do colmo é uma variável indicada para o estudo do estresse hídrico na cultura do milho, por serem sensíveis ao estresse ocasionado pelo déficit hídrico. Além de estar relacionado com armazenamento de carboidratos e transporte de solutos no interior da planta.

4.7 Pendão, espiga e sabugo

Para a variável massa seca de espiga e de sabugo, assim como massa seca, diâmetro e comprimento de sabugo não houve interação entre os níveis de densidade do solo e tensões de água. Havendo diferença significativa apenas para os níveis de densidade do solo aplicados. O ajuste de regressão observado para as variáveis foi o de modelo quadrático, com exceção do comprimento de sabugo que se ajustou a modelo linear decrescente.

A densidade do solo que proporcionou maior produção de massa seca de pendão foi de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, com uma produção de 3,54 g por planta (Figura 21A), com um incremento de 59,35%, entre a produção de massa seca de pendão nas densidades de 1,28 e $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$. Para massa seca de espiga foi observado maior produção (39,29 g por planta) na densidade de $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$, com um incremento de 43,05% ao se comparar a massa seca de espigas nas densidades de maior e de menor produção (Figura 21B).

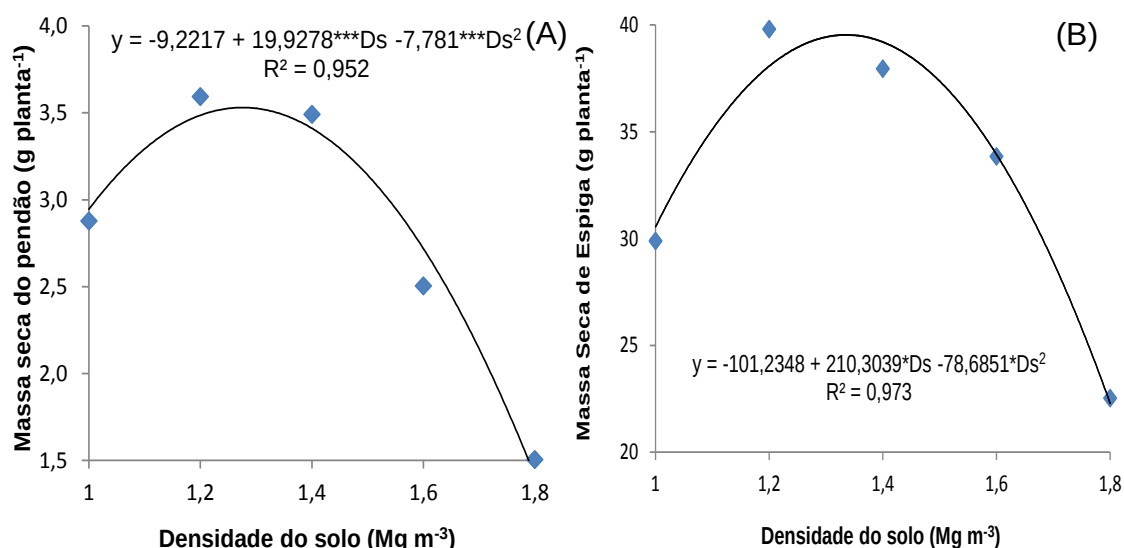


Figura 21. Massa seca do (A) pendão, da (B) espiga de plantas de milho em função da densidade do solo.

Apesar de serem observados valores de densidades limites diferentes entre a massa seca de espiga e a massa seca de pendão pode-se observar respostas semelhantes entre as duas variáveis. Esta resposta aos níveis de

densidade do solo pode ser explicada devido a ambas as variáveis serem órgãos reprodutivos das plantas de milho.

Silva et al. (2006) ao estudarem o crescimento de diferentes plantas cultivadas em vaso submetidas a níveis de densidade em Latossolo Vermelho de textura média, observaram que a produção de massa seca de frutificação da cultura do milho aos 76 dias após a semeadura teve ajuste a modelo quadrático de regressão com seus maiores resultados na densidade de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$. Os resultados observados por esses autores para densidade limite do solo foram inferiores aos observados no presente estudo para as variáveis massa seca de espiga e de pendão, sendo explicado pela diferença de dias na condução do experimento.

Os resultados do presente estudo em relação a tensão de água no solo como momento de irrigação, são divergentes dos encontrados por Rivera-Hernández et al. (2010), que ao avaliarem o desenvolvimento do milho híbrido A-7573 sob tensões de água no solo (5, 30, 55 e 80 kPa), observaram que houve efeito das tensões críticas para irrigação a partir de 30 kPa, com uma redução de 46% na produção de massa seca de espiga com palha comparando as tensões de 30 e 55 kPa.

Considerando as tensões de água como momento de irrigação, também diferem do presente estudo, os resultados encontrados por Schlichting (2012), que ao avaliarem a produção de massa seca do pendão e da espiga com palha, observou que as menores tensões proporcionaram as maiores médias para a massa seca do pendão. Verificou ainda uma redução de 32,30% na massa seca do pendão, comparando-se a menor tensão (15 kPa) com a maior tensão aplicada (55 kPa).

Esse mesmo autor observou também uma redução na massa da espiga com palha com o aumento das tensões, com um decréscimo de 64,21% quando comparadas a menor com a maior tensão de água no solo, sendo que a tensão de 15 kPa proporcionou maior massa da espiga com palha.

Segundo Sangoi e Salvador (1998) a intensidade da competição entre o pendão e a espiga está relacionada com as condições de ambiente e com o tipo de manejo empregado na cultura, sendo que restrições na disponibilidade hídrica é um fator que estimula a dominância apical do pendão sobre as espigas.

A massa seca (Figura 22C) e o diâmetro (Figura 22A) de sabugo ajustaram-se a modelo quadrático de regressão, enquanto o comprimento (Figura 22B) de sabugo ajustou-se a modelo linear decrescente. A densidade limite para massa seca e diâmetro do sabugo de acordo com a equação de regressão foi de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo que em ambos os casos, as melhores médias observas também foram na mesma densidade do solo ($1,6 \text{ Mg m}^{-3}$). Não houve interação significativa para os tratamentos aplicados. Havendo efeito isolado apenas para os níveis de densidade do solo.

De acordo com os resultados observados, sabugos com maiores comprimento tiveram menor influência na produção de massa seca de sabugo, sendo assim, a massa seca de sabugo foi influenciada pelo diâmetro dos sabugos. Deve-se ressaltar que houve pequena produção de grãos, independente do tratamento aplicado, havendo produção em algumas repetições e em outras não. Desta forma, não houve diferença em função dos níveis de densidade e tensões de água no solo, provavelmente a baixa produção esteve relacionada com as altas temperaturas observadas no interior da casa de vegetação.

A temperatura média geral foi de $31,51^{\circ}\text{C}$, entretanto durante todo o período houve temperaturas máxima acima de 35°C , sendo que em 41 ocasiões houve temperaturas acima de 40°C , com picos acima de 45°C em quatro ocasiões, podendo ter ocasionado a redução do número de fileiras, assim como o abortamento dos óvulos, resultando em uma pequena produção de grãos. Sendo que outro fator que pode ter sido determinante para não produção de grãos foi o volume de solo adotado.

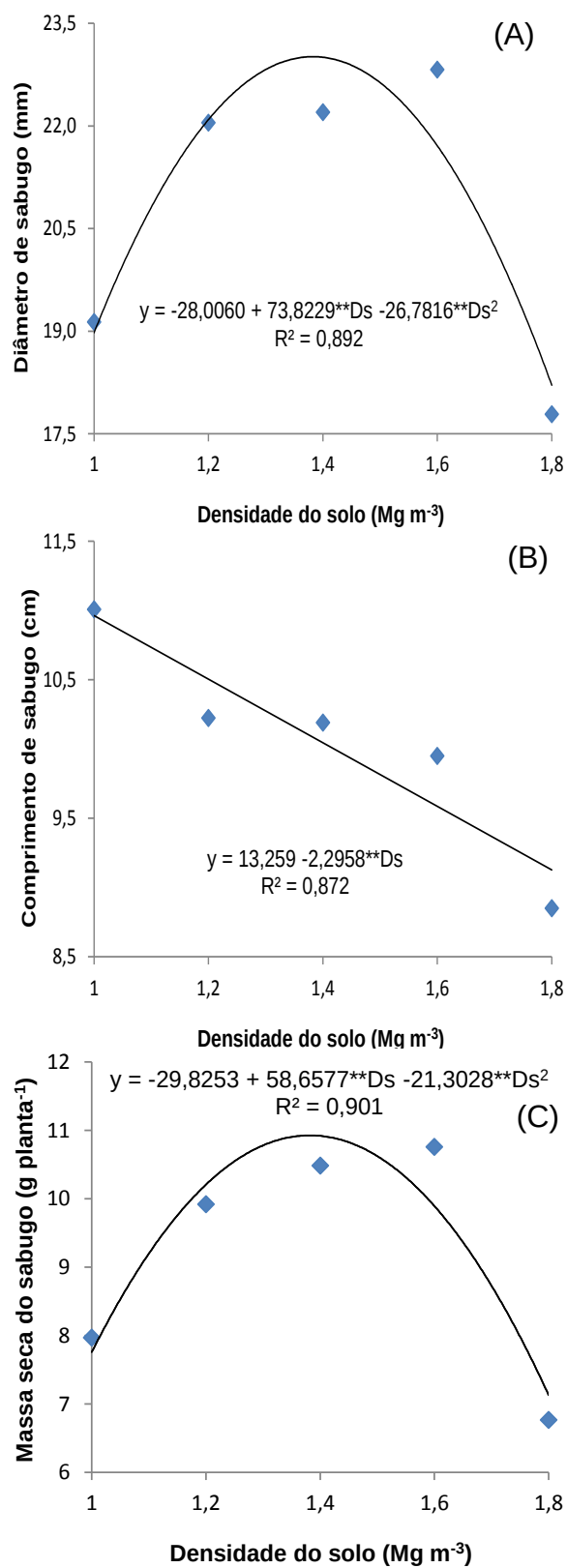


Figura 22. (A) Diâmetro, (B) comprimento e (C) massa seca de sabugo em plantas de milho em função da densidade do solo.

Tanto Freddi et al. (2007 b), quanto Freddi et al. (2009 a) ao avaliarem a produção de milho, em experimento a campo, com Latossolo Vermelho de textura média, observaram redução na produtividade a medida em que a resistência a penetração variou entre 1,65 e 4,81 MPa e foi superior a 2,15 MPa, respectivamente. Esses valores correspondem a densidades do solo entre 1,28 e 1,71 Mg m⁻³ e 1,46 Mg m⁻³, respectivamente. Entre as resistências a penetração do solo neste experimento, que também foi determinada a uma tensão de 10 kPa, apenas na densidade do solo de 1,8 Mg m⁻³ (6,76 MPa) que foi observado valores superiores a 4,81 MPa, a maior observada como limitante para produtividade da cultura do milho entre esses dois autores.

Os resultados observados por Freddi et al. (2007 b) e (2009 a), ajudam a fortalecer a hipótese de que os níveis de densidade aplicados, assim como a resistência a penetração resultante de cada densidade do solo, não foram fatores determinantes para restringir a produção de grãos de milho.

Assim como os resultados de Schlichting (2012), que com tensões de água no solo, em que houve produção de grãos, com experimento em casa de vegetação com solo coletado na mesma área do presente estudo, porém o volume de solo utilizado em cada unidade experimental (18 dm⁻³) e temperaturas no interior da casa de vegetação na condução do experimento foram divergentes do presente estudo, ajudando a fortalecer a hipótese de que a produção de grãos foi afetada pelas altas temperaturas e menores volume de solo presente em cada unidade experimental.

4.8 Massa seca da parte aérea

A variável massa seca da parte aérea não se diferenciou significativamente para a interação entre os níveis de densidades e tensões de água no solo. Observou-se efeito isolado para ambos os fatores avaliados.

Os níveis de densidade do solo influenciaram significativamente na produção de massa seca da parte aérea (Figura 23A), com sua máxima produção

na densidade do solo de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, proporcionando $159,45 \text{ g}$ de massa seca da parte aérea.

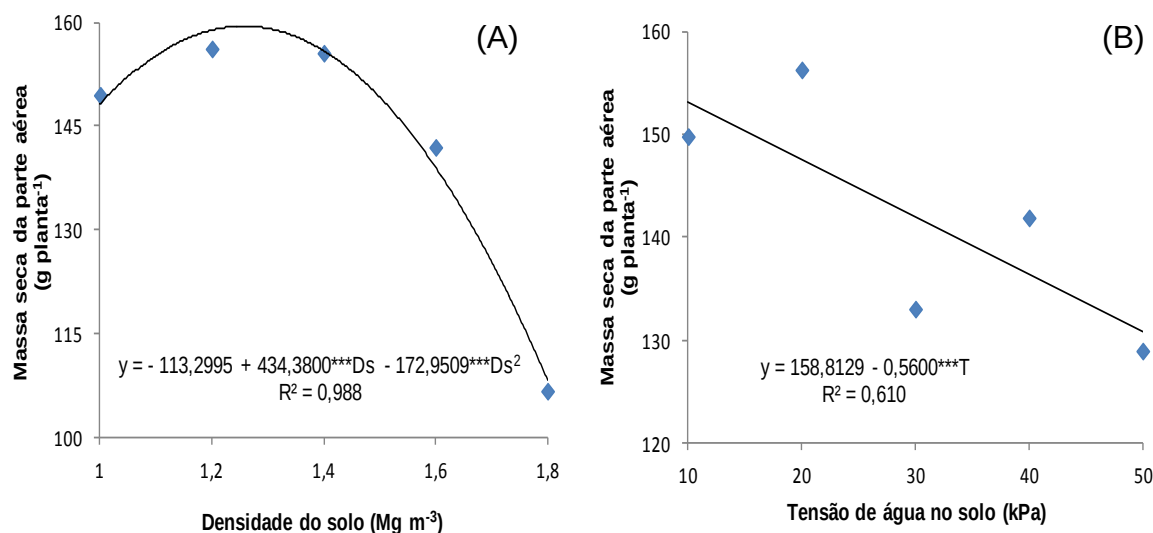


Figura 23. Massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da (A) densidade e (B) tensões de água no solo.

Com o aumento das tensões para irrigação, houve uma diminuição na produção de massa seca da parte aérea. Sendo assim, houve ajuste a modelo de regressão linear decrescente (Figura 23B). Dentro do intervalo experimental, a tensão de 10 kPa proporcionou maior biomassa da parte aérea, sendo que em comparação com a tensão de 50 kPa , houve um decréscimo de $14,62\%$.

Assim como os resultados observados por Silva (2004), o milho foi sensivelmente resistente ao aumento dos níveis de densidade do solo, Silva et al. (2006) também observaram efeito dos níveis de densidade do solo na produção de massa seca da parte aérea em um Latossolo Vermelho, em ambiente controlado, ajustando-se ao modelo quadrático de regressão, com máxima produção na densidade de $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$, observando maior sensibilidade que no presente estudo. Porém analisaram a produção de biomassa da parte aérea aos 76 dias após a semeadura, podendo ser fator determinante para a diferença para densidade limite.

Foloni et al. (2003) e Freddi et al. (2009 a), ambos ao avaliarem duas cultivares de milho em Latossolo Vermelho de textura média, em casa de

vegetação e a campo, respectivamente, observaram que uma variação entre 0,09-1,40 MPa e 0,85-2,15 MPa resultaram em redução na produção de massa seca da parte aérea, sendo que essas resistências do solo a penetração foram resultantes de densidades do solo entre 1,28-1,69 Mg m⁻³ e 1,37-1,47 Mg m⁻³ a uma umidade de 13,5% e tensão de água de 10 kPa, respectivamente.

Os valores observados nestes dois estudos demonstram que a densidade limite para produção de massa seca da parte aérea pode sofrer variação de acordo com o ambiente (se em casa de vegetação ou a campo), pois os resultados de Foloni et al. (2003) mesmo sendo linear de crescente foi bem próximo ao do presente estudo, 1,28 e 1,26 Mg m⁻³, respectivamente, valores abaixo do observado por Freddi et al. (2009 a), provavelmente, pela possibilidade de maior exploração pelo sistema radicular, que pode estar relacionado também com maior variabilidade da resistência a penetração do solo.

Outro fator importante a ser observado foi que tanto os resultados aqui apresentados, quanto os apresentados por Foloni et al. (2003), Silva et al. (2006) e Freddi et al. (2009 a) houve diferença na produção de massa seca da parte aérea de milho em função da densidade do solo, em todos estes trabalhos foi utilizado um Latossolo Vermelho de textura média, contrariando os resultados obtidos por Rodrigues et al. (2009) e Rodrigues et al. (2011), ambos trabalhando com Argissolo Vermelho Escuro de textura franco arenosa e Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa, ambos adubados com compostos orgânicos, não havendo influência significativa dos níveis de densidade do solo na produção de massa seca da parte aérea de milho em ambiente controlado.

Os solos com textura mais arenosa possuem menores áreas superficiais específicas, que resultam em menor troca catiônica, além de possuírem de forma geral maior quantidade de macroporos, o que pode ter ocasionado em menor sensibilidade na produção de massa seca da parte aérea ao se comparar com resultados obtidos em Latossolos Vermelhos de textura média.

Novamente as tensões de água no solo provavelmente sofreram influência das densidades de solo, mesmo não havendo interação entre ambos. A produção de massa seca da parte aérea nas tensões de água no solo de 20 e 40 kPa, foram superiores as produções nas tensões de 10 e 30 kPa, respectivamente. Porém para a massa seca da parte aérea esta resposta pode ser explicado pelos resultados obtidos nas variáveis massa seca de folhas e de colmo, que somadas formam a massa seca da parte aérea.

Rivera-Hernández et al. (2009) observaram uma redução na massa seca da parte aérea de plantas de milho quando submetidas a tensões crescentes de água no solo que variaram de 5 a 80 kPa, enquanto Brito et al. (2013) em condições de estresse hídrico, observaram que com um aumento do fornecimento da lâmina de irrigação em 20% da evapotranspiração de água pela cultura, houve um incremento de 12,77% na produção de fitomassa seca da parte aérea.

A diminuição do fornecimento de água afeta diretamente as características fisiológicas das plantas de milho, resultando em perda de produção de biomassa, independente do método de manejo de irrigação, é possível inferir que a cultura do milho é sensível a menores lâminas de água aplicadas.

4.9 Massa seca de raízes

A massa seca de raiz foi avaliada de acordo com as camadas de solo de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 m e raízes adventícias. Sendo que com a somatória das três camadas de raízes e as raízes aéreas obteve-se a massa seca total de raízes.

Não houve interação para raízes em nenhuma das camadas avaliadas, assim como, massa seca de raízes aéreas (adventícias) e de massa seca de raízes total. Havendo efeito isolado para as tensões de água e densidade do solo, assim como em experimento realizado por Rosolem et al. (1999).

A densidade do solo influenciou significativamente na produção de massa seca de raízes em todas as variáveis analisadas, com exceção da camada de 0,0 a 0,1 m de profundidade (Figura 24). Por outro lado, a irrigação por meio de tensões de água no solo não proporcionou diferença significativa na produção de massa seca de raízes nas camadas de 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,3 m.

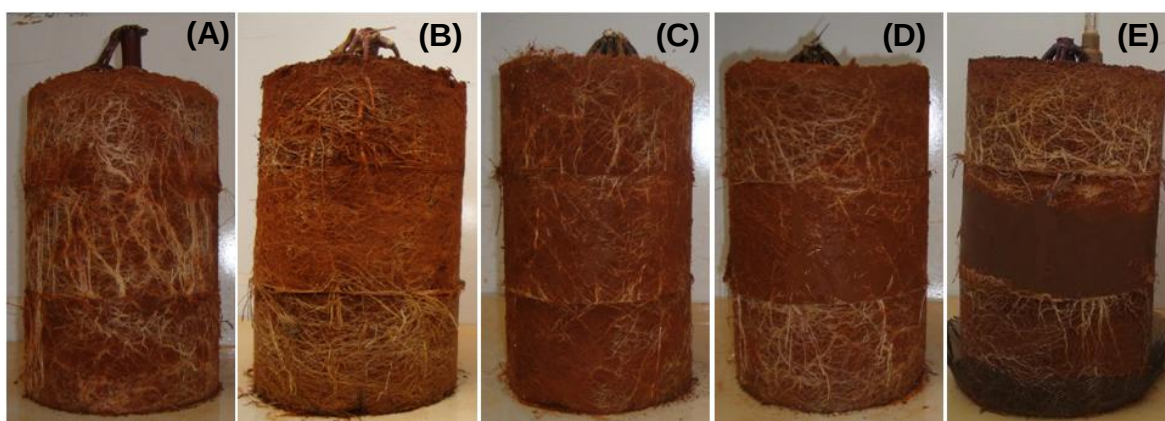


Figura 24. Disposição das raízes no perfil do solo das unidades experimentais nas densidades de (A) 1,0, (B) 1,2, (C) 1,4 (D) 1,6 e (E) 1,8 Mg m^{-3} .

Analisando a influência da densidade do solo na massa seca de raízes na camada de 0,1 a 0,2 m (Figura 25A), assim como a massa seca de raízes adventícias (Figura 25C) e massa seca total de raízes (Figura 25D), observou-se ajuste a modelo de regressão linear decrescente, com máximas produções de 14,92, 5,84 e 62,67 g por planta, respectivamente. Na camada de solo de 0,2 a 0,3 m de profundidade, obteve-se um ajuste de regressão quadrática, com máxima produção ($19,97 \text{ g planta}^{-1}$) na densidade do solo de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 25B).

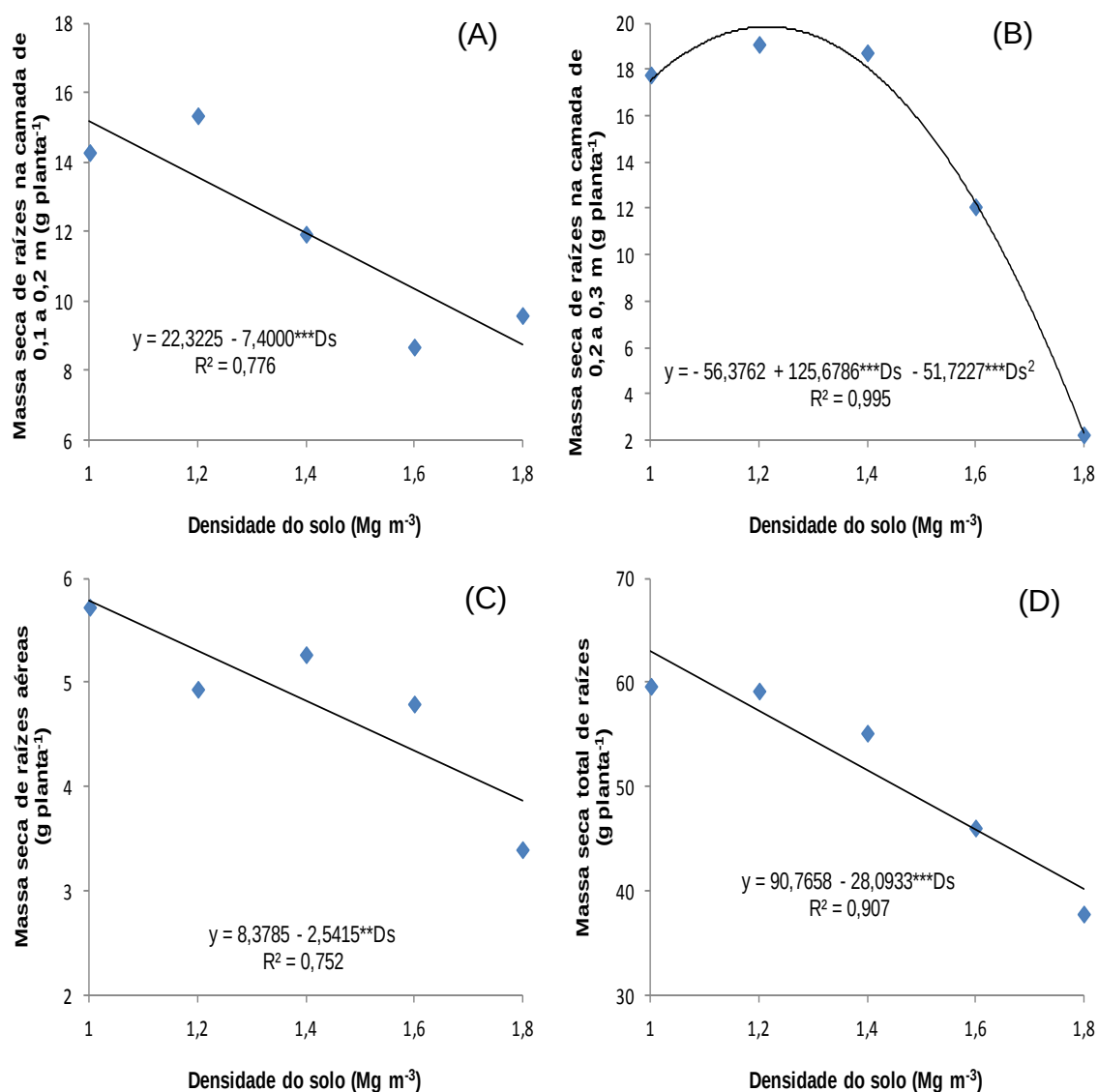


Figura 25. Massa seca de raízes de plantas de milho nas camadas (A) de 0,1 a 0,2 m e (B) de 0,2 a 0,3 m de profundidade e massa seca de raízes (C) adventícias e (D) total, em função dos níveis de densidade do solo.

Na camada de 0,0 a 0,1 m de profundidade, provavelmente não houve efeito significativo dos níveis de densidade do solo devido ao não impedimento do desenvolvimento radicular, fornecido pelo solo a partir de 0,1 m de profundidade. Assim como, Silva (2004), em que não houve diferença significativa na produção de raízes de milho na camada superior a compactada.

Todavia, nas camadas de 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,3 m, houve diferença na produção de massa seca raízes em função da densidade do solo. Na camada em

que foram aplicados os tratamentos (0,1 a 0,2 m) houve tendência de redução na produção de raízes até mesmo pelo aumento da resistência a penetração ocasionada pela impedância causada pelas maiores densidades do solo, a média na densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ foi superior a média na densidade de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, mesmo com uma maior resistência a penetração, porém observando a figura 24, nota-se que houve um pequeno rompimento nos primeiros 0,02 m de profundidade na camada intermediária da densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, provavelmente por não ter havido efeito de espelhamento durante a prensagem do solo.

Mas quando se avalia a camada de 0,2 a 0,3 m, nota-se que na densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, as raízes não conseguiram romper a camada compactada e produziram aproximadamente 10 g de raízes planta⁻¹ a menos que na densidade de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, essa diferença é resultante das resistências a penetração do solo que foram de 6,76 e 2,22 MPa, respectivamente.

Ainda na camada inferior da parcela experimental pode ser observado ajuste de regressão diferente dos ajustes das demais variáveis de produção de raízes, provavelmente devido a alteração na anatomia radicular do milho em diferentes resistências a penetração proveniente do aumento dos níveis de densidade do solo (Bergamim et al., 2010).

Comprovado por Streck et al. (2004), que observaram que a compactação do solo eleva os valores de densidade e resistência à penetração do solo, e reduz a sua porosidade total, com efeito mais acentuado sobre a macroporosidade, que na densidade do solo de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ foi de apenas $0,01 \text{ m m}^{-3}$, valor limitante para aeração, ocasionando aumento da resistência a penetração, mesmo em condição de disponibilidade hídrica, sendo que a densidade do solo de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ resultou em macroporosidade levemente superiores ao limitante à aeração do solo.

Diferindo de Freddi et al. (2009 b) que observou que pela definição do índice hídrico ótimo, que densidades acima de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, para um Latossolo Vermelho, resultariam numa porosidade de aeração abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

(limitante para o sistema radicular), com a elevação do conteúdo de água para capacidade de campo.

A porosidade e a aeração do solo desempenha importante papel no crescimento das raízes. Shierlaw e Alston (2004), verificaram que a compactação do solo diminui o número de macroporos, similares em tamanhos e diâmetro às raízes das plantas, sendo assim, as raízes não penetram em poros de diâmetros menores que os seus e, desta forma, raízes finas podem penetrar em solos compactados mais facilmente que as grossas.

Resultados divergentes para crescimento e produção de massa seca de raízes em profundidade em função da densidade do solo são encontrados na literatura (Foloni et al. (2003); Silva (2004); Freddi et al. (2009 b) e Calonego et al. (2011)).

Segundo Foloni et al. (2003) a camada compactada em subsuperfície pode modificar a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo, mas não diminuiu a produção de raízes, porém Calonego et al. (2011) com diferentes culturas não observaram influência da densidade do solo na produção de raízes, assim como Silva (2004) com a cultura do milho.

Segundo Freddi et al. (2009 b) , quanto maior o diâmetro da raiz, maior é a força exercida no processo de alongamento das células do meristema radicular, para penetração em determinada camada de solo. Esses autores relataram diferença no desenvolvimento radicular da cultura do milho na camada de 0,0 a 0,2 m de profundidade, enquanto na camada de 0,2 a 0,3 m de profundidade não observaram diferença na produção de massa seca de raízes.

Rosolem et al. (1999) observaram que a produção de raízes adventícias na cultura do milho foi altamente influenciada pelo aumento dos níveis de densidade do solo, todavia concluíram que com uma resistência a penetração acima de 1,3 MPa reduz a produção de raízes adventícias pela metade, o que não foi observado no presente estudo, que com resistências a penetração de 2,22 e 6,76 MPa houve redução de 26,12 e 34,83% na produção de massa seca de

raízes adventícias. Ainda divergindo dos resultados aqui apresentados, estes autores observaram que com tensões de água no solo variando de 3 a 64 kPa não influem no crescimento radicular. Porém Veen e Boone (1990) notaram que tanto a taxa de crescimento das raízes primárias, como a das adventícias foi afetado por tensões de água no solo de 10 a 63 kPa, sendo as adventícias mais sensíveis.

Analisando o perfil da unidade experimental, observa-se que as tensões de água no solo influenciaram na produção de massa seca de raízes apenas na camada 0,0 a 0,1 m de profundidade (Figura 26). Da mesma forma, houve diferença significativa na produção de massa seca de raízes adventícias e massa seca total de raízes. Assim pode-se observar que todas as massas secas de raízes, ajustaram-se a modelo de regressão linear decrescente. Demonstrando que nas condições avaliadas a cultura do milho foi susceptível ao aumento dos turnos de rega quanto a produção de raízes totais e na camada superficial do solo.

Em relação a produção de raízes entre as três camadas de solo avaliadas a densidade do solo e as tensões de água aplicadas tiveram influência significativa de forma inversa. Na camada de solo que houve diferença para produção de massa seca de raízes por efeito dos níveis de densidade do solo, não houve para as tensões de água.

A água é o fator que regula o crescimento e distribuição radicular (Kuchenbuch; Barber, 1987; Barber et al., 1988) e a redução na macroporosidade tem grande efeito sobre a velocidade de infiltração de água e sobre o desenvolvimento radicular das plantas, por acarretar ao solo condições de baixa aeração (Freddi et al., 2009 b).

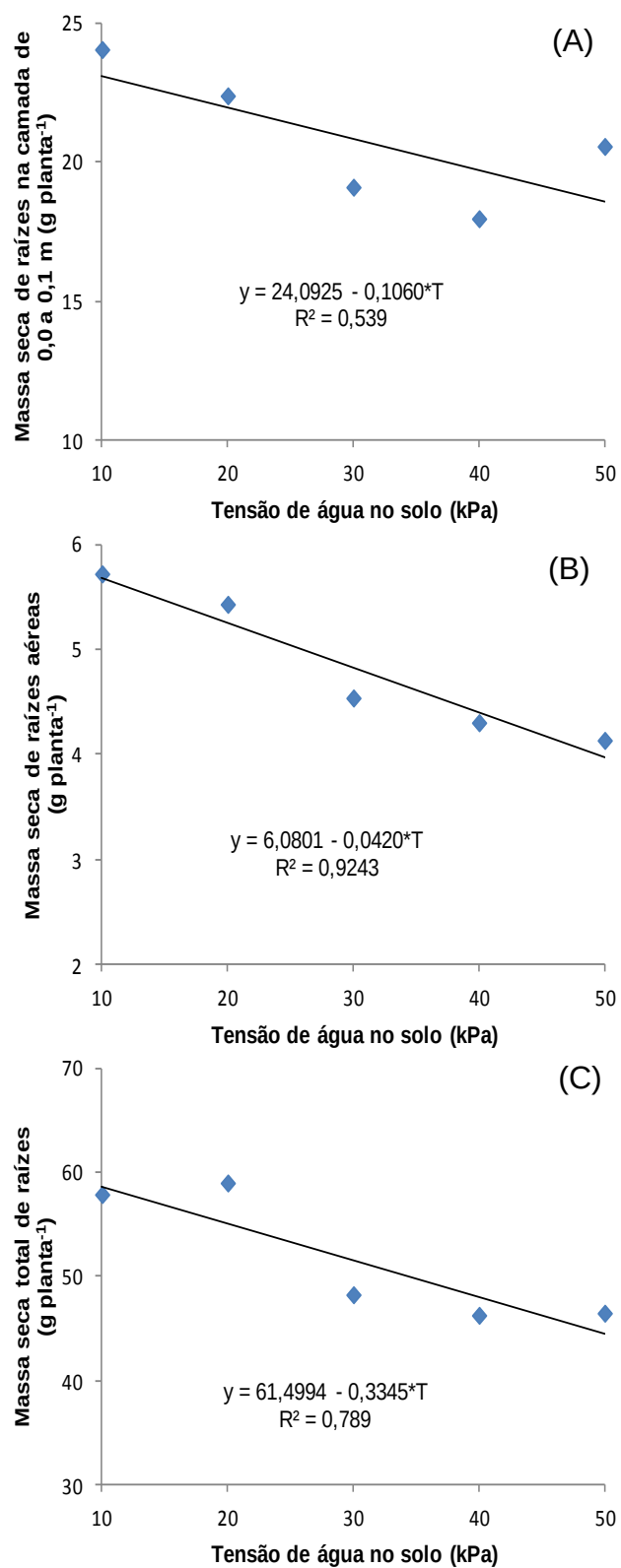


Figura 26. Massa seca de raízes de plantas de milho nas camada (A) de 0,0 a 0,1 m de profundidade (B) massa seca de raízes adventícias e (D) massa seca re raízes total, em função das tensões de água.

Provavelmente o volume de água fornecido para as plantas via irrigação não infiltrou de forma homogênea em todo o perfil do solo da unidade experimental, sendo que a camada superficial se manteve mais umida que as camadas inferiores, podendo resultar assim, em diferente resistência a penetração de raízes no solo em função da umidade e densidades do solo na unidade experimental.

Houve efeito significativo na camada de 0,0 a 0,1 m de profundidade, provavelmente pelo volume de água repostado em sua maioria não infiltrar em todo perfil do solo, se concentrando na camada mais superficial, até mesmo pela maior produção de raízes nesta camada em todos os tratamentos avaliados.

Segundo Rosolem et al. (1999) o conteúdo de água no solo afeta a relação entre resistência do solo à penetração e o alongamento da raiz, avaliando o crescimento radicular em função das tensões de água aplicadas em plântulas de milho, observaram que em solos com mais de 40% de argila houve maior variação da resistência a penetração. Sendo que as tensões de água aplicadas não influenciaram na produção de raízes adventícias, diferindo dos resultados do presente estudo.

Da mesma forma, Costa et al. (2008) observaram resultados semelhantes ao do presente estudo, pois ao trabalharem com duas cultivares de milho (BR-106 e M-21) submetidas a níveis de estresse hídrico, não constataram haver diferença significativa em relação à produção de massa seca de raízes, independente da cultivar ou do estágio fenológico avaliado, assim como Conte et al. (2009), que não verificaram efeito significativo para massa seca de raiz no cultivo de milho irrigado e não irrigado.

Por outro lado, Schlichting (2012) observou que com a interação de doses de nitrogênio, a tensão de água no solo influenciou na produção de massa seca de raízes, ao observar a dose de nitrogênio de 150 mg dm^{-3} , a mesma utilizada no presente estudo, observa-se a máxima produção de matéria seca de raízes na

tensão de água no solo de 15kPa, sendo observada ainda uma regressão linear decrescente, corroborando com os dados aqui apresentados.

O fornecimento de água para as plantas além de reduzir a resistência do solo a penetração de raízes (Rosolem et al., 1999) auxiliam no controle da temperatura de plantas, bem como na absorção de nutrientes, auxiliando o contato íon-raíz tanto por fluxo de massa quanto por interceptação radicular e por difusão (Rosolem et al. 2003), sendo que por não haver possibilidade de troca direta entre partículas do solo e as raízes das plantas, há a necessidade de um meio líquido (Ruiz et al., 1999), esses autores ratificam que o fornecimento adequado associado a uma boa nutrição de plantas, tende a ter maior exploração do sistema radicular.

4.10 Massa seca total

A massa seca total de plantas de milho foi influenciada de forma isolada para as densidades e tensões de água no solo. Em função dos níveis de densidade do solo pode-se observar que a massa seca total ajustou-se a modelo quadrático de regressão com máxima produção de 217,7 g por planta, na densidade do solo de 1,21 Mg m⁻³ (Figura 27A). Houve um incremento de 33,16% em relação a produção no maior nível de densidade do solo aplicado. Porém em função das tensões de água no solo, o modelo de regressão apresentado foi o linear decrescente. Com um decréscimo de 17,26% na produção de massa seca total ao comparar as tensões de 10 e 50 kPa, como momento de fornecimento de água as plantas (Figura 27B).

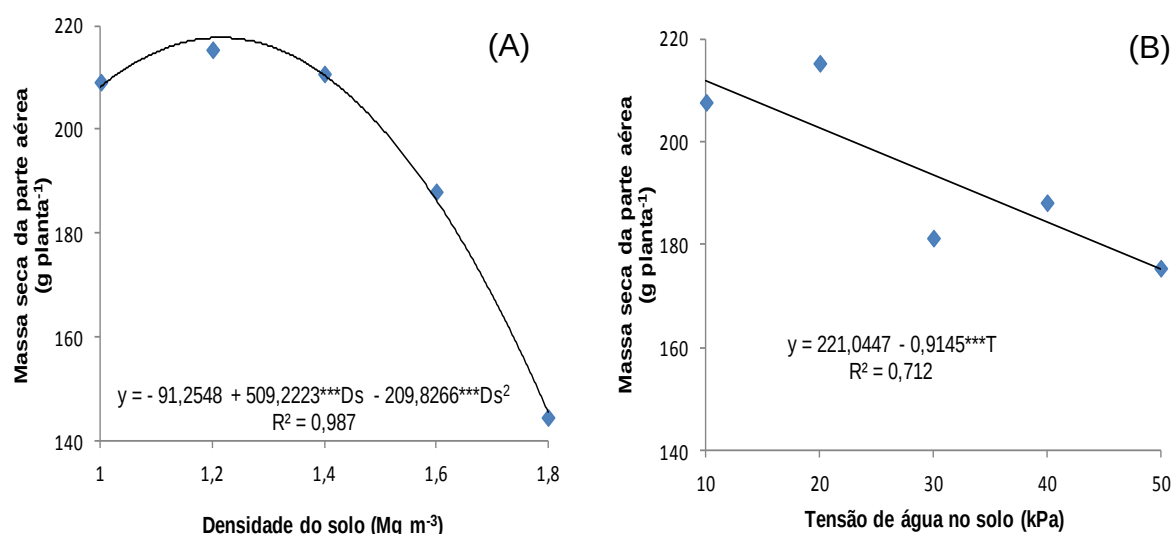


Figura 27. Massa seca de total de plantas de milho em função dos (A) níveis de densidade e (B) tensões de água no solo.

Silva (2004) também obteve resposta quadrática para a variável massa seca total de planta, ao avaliar a produção de biomassa na cultura do milho submetido a níveis de densidade do solo (1,0 a 1,5 Mg m⁻³) em um Latossolo Vermelho de textura média. Observaram ainda que a densidade limite para produção de massa seca total de plantas de milho foi de 1,12 Mg m⁻³, mesmo com um modelo de regressão quadrático os valores limites para os níveis de densidade do solo foram inferiores aos resultados apresentados no presente estudo.

Pegorare (2005), ao avaliar o efeito de lâminas de água em milho safrinha em um sistema de plantio direto, observaram que com uma aplicação de maior lâmina de água, houve aumento na produção de massa seca total de plantas de milho. Segundo o mesmo autor, o acúmulo de massa seca vegetal resulta do mecanismo fotossintético da planta, sendo assim, fatores que interferem na fotossíntese, irão interferir na produção e acúmulo de massa seca.

Desta forma, a disponibilidade hídrica interfere diretamente no controle de temperatura vegetal e consequentemente na taxa de fotossíntese e respiração. O aumento da disponibilidade hídrica, ou seja, irrigações mais frequentes proporciona maior produção de fitomassa.

5 CONCLUSÕES

O aumento da densidade do solo foi mais prejudicial no desenvolvimento vegetativo inicial das plantas de milho, enquanto no ciclo final de cultivo obteve-se maior efeito das tensões de água aplicadas ao solo.

A produção de massa seca da cultura do milho foi limitada pelo aumento das tensões de água no solo, sendo que a densidade do solo limite para produção de massa seca variou entre 1,00 e 1,26 Mg m⁻³, com exceção da massa seca de sabugo.

Na camada de solo de 0,0 a 0,1 m e 0,1 e 0,2 de profundidade, apenas o aumento de tensão de água e densidade foi fator limitante para produção de raízes, respectivamente, porém em densidades do solo superiores a 1,21 Mg m⁻³ proporcionaram menor produção total de raízes, bem como a produção de raízes na camada de 0,2 a 0,3 m de profundidade.

De forma geral a densidade do solo limite para desenvolvimento da cultura do milho foi de 1,30 Mg m⁻³, enquanto que a tensão de 10 kPa foi a que apresentou melhores resultados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G.; FOSTHOFER, E. L.; STREIDER, M. L.; relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 158-167, 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L.; STREIDER, M. L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 109-119, 2003.

BARBER, S. A.; MACKEY, A. D.; KUCHENBUCH, R. O.; BARRACLOUGH, S. Effect of soil temperature and water on maize root growth. **Plant and Soil**, v. 111, p. 267-269, 1988.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 243-249, 2006.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 299-305, 2010.

BERNARDO, S. **Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil: recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Viçosa: MMA, SRH, ABEAS, UFV, 1997. 252 p.

BERNARDO, S., SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006, 625p.

BINGHAN, I. J.; BENGOUGH, A. G.; REES, R. M. Soil compaction -N interactions in barley: Root growth and tissue composition. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 241-246, 2010.

BONELLI, E. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; CABRAL, C. E. A.; CAMPOS, J. J.; SCARAMUZZA, W. L. P.; POLIZEL, A.C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, p. 264-269, 2011.

BONFIM-SILVA, E. M.; ANICÉSIO, E. C. A.; SILVA, F. C. M.; DOURADO, L. G. A.; AGUERO, N. F. Compactação do solo na cultura do trigo em Latossolo do Cerrado. **Enciclopédia biosfera**, v. 7, p. 1-8, 2011.

BONFIM-SILVA, E. M.; ANICÉSIO, E. C. A.; SILVA, T. J. A. Características morfológicas de cultivares de trigo submetidas à compactação do solo. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 559-569, 2013.

BONFIM-SILVA, E. M.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; REIS, R. H. P.; CAMPOS, J. J.; SCARAMUZZA, W. L. M. P. Establishment of xaraés and marandu grasses under levels of soil compaction. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 727-735, 2012.

BORGES, I. D. **Avaliação de épocas de aplicação da cobertura nitrogenada, fontes de nitrogênio e de espaçamento entre fileiras na cultura do milho**. 2003. 73f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2003.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S.; COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 1244-1254, 2013.

CABRAL, E. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; BONELLI, E. A.; SILVA, T. J. A. DA; CABRAL, C. H. A.; SCARAMUZZA, W. L. M. P. Compactação do solo e macronutrientes primários na *Brachiaria brizantha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 362-367, 2012.

CALONEGO, J. C.; GOMES, T. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 289-296, 2011.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.

CARRIBEIRO, L. S. **Potencial de água no solo e níveis de compactação para o cultivo de grama Esmeralda**. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 2010.

CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R. & BARRACLOUGH, P. B. How do roots penetrate strong soil? **Plant Soil**, v. 255 p. 93-104, 2003.

COELHO, H. A. **Diferentes condições de estresse hídrico no desenvolvimento de milhos transgênico e convencional**. 2013. 93f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 2013.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, v. 1 – safra 2013/14, n.9 - nono levantamento, junho 2014. – Brasília: Conab, 2014.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; DEBIASI, H.; MAZUARANA, M. Rendimento do milho em diferentes condições físicas de solo e quantidade de resíduo na ausência ou na presença de irrigação. **Ciência Rural**, v.39, p. 1069-1076, 2009.

CORTEZ, J. W.; SILVA, R. P.; CARVALHO FILHO, A.; FURLANI, C. E. A.; FREITAS, SAYMON SEVERINO. Avaliação da influência de cargas verticais sobre diferentes rodas compactadoras no ciclo de semeadura do milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1155-1160, 2007.

COSTA, J. R.; PINHO, J. L. N.; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 443-450, 2008.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; SANTANA, D. P. Manejo da cultura do Milho. Circular Técnica 87. **EMBRAPA Sete Lagoas**, 12p. 2006.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, M. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1993, 90p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**. v. 120, p. 201-214, 2004.

DOERGE, T. A.; THOMPSON, T. L. Nitrogen and water rates for subsurface trickle-irrigated Romaine lettuce. **HortScience**, v. 30, p. 1233-1237, 1995.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agrícola**, v.57, p.191-192, 2000.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **LVIII Reunião Técnica Anual de Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo: indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul safras 2013/2014 e 2014/2015**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 124 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Manual de métodos de análises de solo**. Centro Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1997. 212p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.

FAGUNDES, E. A. A. **Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo do cerrado mato-grossense submetidas a níveis de compactação do solo**. 2012. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis-MT, 2012.

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A.; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 188-193, 2014.

FELTRIN, R. M. **Comportamento das variáveis hidrológicas do balanço hídrico do solo em lisímetros de drenagem**. 2009. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2009.

FILGUEIRA, T. R. S. **A origem do milho: identificação de *Saccharum* como um dos parentais alotetraploides**. 2007. 64f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas). Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2007.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 947-953, 2003.

FONSECA, P. R. B.; FERNANDES, M. G.; DUTRA, F.; SOUZA, T. A.; PONTIM, B. C. A. uso do spad-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, em híbridos de milho, (*Zea mays* L.) BT e isogênico. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, p. 56-60, 2012.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia agrícola**, v. 26, p. 113-121, 2006.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, v. 66, p. 477-486, 2007 a.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 627-636, 2007 b.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho. I – características de planta, solo e índice s. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33 p. 793-803, 2009 a.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho. II – intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33 p. 793-803, 2009 b.

GUIMARÃES, P. S. **Desempenho de híbridos simples de milho (*zea mays* L.) e correlação entre heterose e divergência genética entre as linhagens parentais**. 2007. 132f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas-SP, 2007.

HERRERO, M.P.; JOHNSON, R.R. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. **Agronomy Journal**, v.21, p.105-110, 1981.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, p. 116-121, 2008.

KANG, Y.; WANG, F. X.; LIU, H. J.; YUAN, B. Z. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes. **Irrigation Science**. V. 23, p. 133-143, 2004.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KOBAISSI, A. N.; KANSO, A. A.; KANBAR, H. J.; KAZPARD, V. A. Morphophysiological changes caused by soil compaction and irrigation on *Zea mays*. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 2, p. 114-121, 2013.

KUCHENBUCH, R. D.; BARBER, S. A. Yearly variation of root distribution with depth in relation to nutrient uptake and corn yield. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, p. 255-263, 1987.

LITTELL, R. C.; MOTT, G. O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, v. 34, p. 94-97, 1975.

MACHADO, A. de M. M.; FAVARETTO, N. **Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos**. In: LIMA, M. R. et al. Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos. Curitiba: UFPR/ Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 234-254.

MAGALHÃES, P. C.; PAIVA, E. Fisiologia da Produção. In: CRUZ, J. C.; MONTEIRO, J. A.; SANTANA, D. P.; GARCIA, J. C.; BAHIA, F. G. F. T. C.; SANS, L. M. A.; PEREIRA FILHO, I. A. 1993. **Recomendações Técnicas para o Cultivo do Milho**. Brasília: EMBRAPA, p.85-95.

MARCHI, S. L. **Interação entre desfolha e população de plantas na cultura do milho na Região Oeste do Paraná**. 2008. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon-PR, 2008.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 469 p.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência agrotécnica**, v. 29, p. 940-947, 2005.

MELO, D. A. de; **Avaliação de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) e milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) B. R.) sob diferentes níveis de água no solo**. 2006.

48f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Campina Grande, Patos-PB, 2006.

PATERNIANI, E.; CAMPOS, M. S. **Melhoramento do milho**. In: BORÉM, A. Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa, [s.n.], 1999. p. 429-485.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. E.; GIROTTO, C. A. E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v. 38, p. 358-364, 2008.

PEGORARI, A. B. **Efeitos de lâminas de água aplicada como irrigação suplementar no ciclo do milho safrinha sob plantio direto na região de Dourados-MS**. 2005. 67f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Dourados-MS, 2005.

PIFFER, C. R.; BENEZ, S. H. Desenvolvimento do sistema radicular de Amarantho, Milheto e Pé-de-Galinha em diferentes níveis de compactação. **Energia Agricultura**, v. 20, p. 50-62, 2005.

PORTO, R. C. **Lâminas de água e adubação nitrogenada no crescimento e produção de gladiólos**. 2012. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis-MT, 2012.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, p. 259-280, 2005.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004. 478p.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.

RIVERA-HERNÁNDEZ, B.; CARILLO-ÁVILA, E.; OBRADOR-OLÁN, J. J.; JUÁREZ-LOPEZ, J. F.; ACEVES-NAVARRO, L. A.; GARCÍA-LÓPEZ, E. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid, in Campeche, Mexico. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1285-1292, 2009.

RIVERA-HERNÁNDEZ, B.; CARILLO-ÁVILA, E.; OBRADOR-OLÁN, J. J.; JUÁREZ-LOPEZ, J. F.; ACEVES-NAVARRO, L. A. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1365-1374, 2010.

RODRIGUES, P. N. F.; ROLIM, M. M.; BEZERRA NETO, E.; COSTA, R. N. T.; PEDROSA, E. M.; OLIVEIRA, V. S. Efeito do composto orgânico e compactação do solo no milho e nutrientes do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.788-793, 2011.

RODRIGUES, P. N. F.; ROLIM, M. M.; BEZERRA NETO, E.; PEDROSA, E. M.; OLIVEIRA, V. S. Crescimento e composição mineral do milho em função da compactação do solo e da aplicação de composto orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.94-99, 2009.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 821-828, 1999.

ROSOLEM, C. A.; MATEUS, G. P.; GODOY, L. J. G.; FELTRAN, J. C.; BRANCALÃO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 27, p. 875-884, 2003.

RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. *Brasileira de Ciência do Solo*. v. 23, p. 1015-1018, 1999.

SANCHEZ, E. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. 2012. 59f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava-PR, 2012.

SANGOI, L.; SALVADOR, R.J. Effect of maize plant detasseling on grain yield tolerance at high plant density an drought stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.677-684, 1998.

SANTANA, S. C. **Indicadores físicos da qualidade de solos no monitoramento de pastagens degradadas na região sul do Tocantins**. 2009. 76f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Tocantins, Gurupi-TO, 2009.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 287-294, 1998.

SAS - STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **User's guide**. Cary: SAS Institute, 2002. 525p.

SCALCO, M. S.; FARIA, M. A. de; GERMANI, R.; MORAIS, A. R. de. Produtividade e qualidade industrial do trigo sob diferentes níveis de irrigação e adubação. **Ciência Agrotécnica**, v. 26, p. 400-410, 2002.

SCHLICHTING, A. F. **Cultura do milho submetida a tensões de água no solo e doses de nitrogênio**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis-MT, 2012.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto**. 2003. 128f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**. v. 39, p. 58-64, 2009.

SHIERLAW, J.; ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 77, p. 15- 28, 1984.

SHIERLAW, J.; ALSTON, A. M. Effects of soil compaction on root growth und uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, v. 77, p. 15-28, 2004.

SILVA, G. J. **Desenvolvimento de plantas de soja, milho, algodão e *Brachiaria brizantha*, submetidas a quatro graus de compactação de um latossolo vermelho-escuro distrófico**. 2004. 122f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2004.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 31-40, 2006.

SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. **Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos**. In: FARIA, M.A. (Coord.) Manejo de irrigação. Lavras: UFLA; SBEA, 1998. p.311-351.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, R. V. C. C.; ANTUNES, P. D.; MARQUES, M. C.; FREIRE, M. G. S. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo

representativo do Estado de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8 p. 94-100, 2008.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 207-212, 2002.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34 p. 755-760, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed, Porto Alegre: ARTMED, 2009. 819p.

TAIZ, L.; ZEIGER. **Plant Physiology**. California: The Benjamin/ Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, 1991.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 969-977, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VEIGA, M. **Propriedades de um Nitossolo Vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2005.

WANG, D.; KANG, Y.; WAN, S.; Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. **Agricultural Water Management**. v. 87, p. 180-186, 2007.