



JODEAN ALVES DA SILVA

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA SUBMETIDA
AO ESTRESSE HÍDRICO E COMPACTAÇÃO DO
SOLO**

**LAVRAS – MG
2018**

JODEAN ALVES DA SILVA

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA SUBMETIDA AO ESTRESSE
HÍDRICO E COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Orientador

LAVRAS – MG
2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo (a) próprio autor (a).**

Silva, Jodean Alves da.

Respostas fisiológicas da soja submetida ao estresse
hídrico e compactação do solo / Jodean Alves da Silva. - 2018.
84 p.

Orientador (a): Luiz Gonsaga de Carvalho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.
Bibliografia.

1. *Glycine max*. 2. Massa específica do solo. 3. Trocas gasosas.
I. Carvalho, Luiz Gonsaga de. II. Título.

JODEAN ALVES DA SILVA

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DA SOJA SUBMETIDA AO ESTRESSE
HÍDRICO E COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de maio de 2018.

Dr. Fabrício Ribeiro Andrade IFMT

Dr. Bruno Montoani Silva UFLA

Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira UFLA

Dr. Élderis Pereira Botrel UFLA

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

Orientador

LAVRAS – MG

2018

Aos meus pais Jozimar Francisco da Silva e Maria Aparecida Alves da Silva. Aos meus irmãos Jomax, Jocilda, Jociara e Josifran e, minha sobrinha querida, Lavínia Aparecida, que o titio a ama, a quem também dedico esta vitória pelo amor imenso, incondicional, e pelo incentivo, sobretudo nos momentos de incertezas.

Se, cheguei aonde cheguei, devo a isso a TODOS vocês.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mostrar-me o caminho da ciência e por resguardar minha integridade física e mental.

À Universidade Federal de Lavras, em particular, ao Departamento de Engenharia (DEG), por intermédio do Núcleo didático-científico de Engenharia de Água e Solo, por proporcionar toda a estrutura necessária para esta realização, assim como ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas (PPGRHSA), pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao CNPQ pelo apoio à concessão de bolsa na modalidade Produtividade de Pesquisa “PQ” ao prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho (Processo N. 308447/2015-8) e, pela orientação, apoio, paciência, generosidade e colaboração em todos os momentos.

Aos membros da banca examinadora, composta por Dr. Bruno Montuani Silva, Dr. Fabrício Ribeiro Andrade, Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho, Dr. Élberis Pereira Botrel pela disponibilidade para participar, pelas contribuições de extrema competência na avaliação desta tese.

A todo corpo docente do PPGRHSA-UFLA, em especial, aos professores Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, Fábio Ponciano de Deus, Geraldo Magela Pereira, Luiz Antônio Lima, Luiz Gonsaga de Carvalho e, ao Bruno Montuani Silva do Departamento de Ciência do

Solo (DCS) pelo ensino que servirá como referência por toda a minha vida, pela atenção em todos os momentos.

Aos funcionários do PPGRH – Elvis, Renato, Rodney e a secretária Luiza que sempre atenciosa e cordial, faz um eficiente trabalho, aos do DCS, Geila, João Gualberto, José Roberto (Pezão), Carlinhos e Téo pelo espírito de solidariedade, presteza e contribuição.

Aos professores Evaristo Mauro de Castro do Departamento de Biologia (DBI) pela confiança em nos conceder o IRGA e ao professor Adriano Teodoro Bruzi do Departamento de Agricultura (DAG) por nos conceder as sementes.

A todos os colegas de curso e DCS, cuja amizade levarei por toda vida, em especial, àqueles que se tornaram amigos: Mayra Oliveira, Samuel Pizetta, Ernandes Guedes, Rodrigo Fonseca, José Ferreira, Leandro Soares, Geanderson Nascimento, Fábio Bispo e demais colegas.

Aos meus pais, Jozimar e Maria Aparecida pelo amor, carinho, liberdade, educação, respeito ao próximo, incentivo aos estudos e, principalmente, por todos os momentos em que quase fraquejei, mas ~~em~~ que sempre me deram força e apoio para que eu nunca desistisse dos meus objetivos.

De modo geral, agradeço a todos que, direta - discente Guilherme Marchiore, bolsista PIBIC e indiretamente, de alguma forma participaram das etapas para a realização desse trabalho. Enfim, acredito que qualquer trabalho científico só se realiza com a dedicação de um grupo de pessoas e este não foi diferente.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO GERAL

O estresse hídrico é uma das principais causas de variação da produtividade potencial da soja, assim como a compactação do solo, por serem altamente correlacionados com a disponibilidade hídrica do solo que é determinante no crescimento, desenvolvimento da soja e contribuem para o aumento da produtividade. No entanto, pode ser alcançada com adoção de irrigação deficitária, que reduz a taxa de transpiração a contribuir com o aumento da eficiência no uso da água sem comprometer a regulação das trocas gasosas no processo fotossintético e de produção de fitomassa em solo compactado a níveis intermediários. Assim, os objetivos deste trabalho, desenvolvido com dois experimentos com intuito de avaliar: a) o estresse hídrico e acúmulo de fitomassa da soja em solo com irrigação deficitária e compactado; b) o efeito do déficit hídrico nos parâmetros fisiológicos, análise comportamental de crescimento e desempenho da soja em solo compactado. Os resultados do primeiro experimento demonstraram que a condutância estomática, a transpiração, a concentração intercelular de CO₂ e a taxa de fotossíntese líquida não foram alteradas pela massa específica do solo. Entretanto, a fitomassa seca da parte aérea e raízes foram alteradas pela compactação do solo e/ ou pela lâmina diária de água no solo por proporcionar menor número de fitomassa seca de legumes na lâmina diária de 4,0 mm. Os resultados do segundo experimento indicaram que as laminas diárias de 4,0 e 5,0 mm proporcionaram os melhores resultados de eficiência do uso de água e de eficiência instantânea do uso de água, mas não em ganho de fitomassa seca. A compactação do solo, em níveis intermediários, não é prejudicial no desenvolvimento da parte aérea e no crescimento do sistema radicular.

Palavras-chave: *Glycine max*, massa específica do solo, trocas gasosas, déficit hídrico.

GENERAL ABSTRACT

Water stress is one of the main causes of variation of the potential productivity of soybean. Soil compaction is also highly correlated with the water availability of the soil, which is determinant in the growth and development of the soybean, contributing to productivity. However, it can be achieved with the adoption of deficit irrigation that reduces the transpiration rate, contributing to the increase of water use efficiency without compromising the regulation of gas exchange in the photosynthetic process and for phytomass production in compacted soil at intermediate levels. Thus, this study aimed a) to evaluate the water stress and phytomass accumulation of soybean in a compacted soil with irrigation deficit, b) to evaluate the effect of water deficit on the physiological parameters, behavioral growth analysis and soybean performance in compacted soil. The results of the first experiment demonstrated that the stomatal conductance, transpiration, intercellular CO₂ concentration and the net photosynthesis rate were not altered by the specific mass of the soil. However, dry shoot and root phytomass were altered by soil compaction and / or by the daily blade of water in the soil to provide lower number of dry vegetable phytomass on the 4.0 mm depth. The results of the second experiment indicated that the daily depths of 4.0 and 5.0 mm provided the best results of water use efficiency and in the instant efficiency of water use, but not in dry phytomass gain. Soil compaction at intermediate levels is not detrimental to the development of the aerial part and in the growth of the root system.

Keywords: *Glycine max*, specific soil mass, gas exchange, water deficit.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	10
INTRODUÇÃO	10
REFERÊNCIAS	16
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	26
ARTIGO 1 - Trocas gasosas e estresse hídrico na cultura da soja com irrigação deficitária em solo compactado.....	26
ARTIGO 2 - Trocas gasosas e desempenho agrônômico da soja sob estresse hídrico em solo compactado.....	55

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max (L.) Merrill*) tem aumentado seu potencial produtivo com a exploração agrícola dos solos. No entanto, a baixa disponibilidade de água no solo é uma das principais causas de redução da produtividade, assim como a compactação do solo na profundidade do sistema radicular, por ser altamente correlacionado com a umidade do solo.

A água no solo é determinante na produção agrícola para atender as necessidades hídricas da cultura da soja que está entre 450 e 800 mm a depender da duração do ciclo, das condições de cultivo e a profundidade de exploração do solo pelas raízes (FEITOSA et al., 2010; EMBRAPA, 2011).

Essa estimativa de necessidade hídrica é uma das principais etapas dos estudos que envolvem o planejamento e o manejo da irrigação (JIMÉNEZ et al., 2013), uma vez, que a quantidade de água disponível se encontra na dependência da profundidade explorada pelas raízes, da capacidade de armazenamento de água do solo e da densidade radicular da planta (MANFRON et al., 2003).

No período vegetativo, a baixa disponibilidade de água no solo, acarreta em menor absorção de água e nutrientes, refletindo na capacidade fotossintética com caule menos desenvolvido, em consequência da redução

do crescimento das folhas, o que leva a um menor índice de área foliar, resultando em menos ganho na fitomassa (BONATO, 2000; JALEEL et al., 2009).

No entanto, nas fases entre a floração e o enchimento de grãos, consideradas críticas, a soja tem exigência de 7-8 mm diários para obtenção máxima de produtividade (FARIAS et al., 2007; EMBRAPA, 2011), devido à baixa disponibilidade hídrica afetar a atividade fisiológica, o crescimento e o desenvolvimento e, conseqüentemente, maiores reduções na produtividade da soja.

Essa produtividade também pode ser alcançada mediante adoção da irrigação deficitária (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012). Realizada com a aplicação de lâminas inferiores a 8 mm diário para atender as necessidades hídrica da soja, reduzindo a transpiração e aumentando a eficiência no uso da água, pela otimização da irrigação e do manejo adequado do solo sem alterar a produtividade.

A habilidade das plantas em explorar o solo em busca de água e nutrientes são passíveis de alterações (ALVARENGA; CRUZ, 2002) pela combinação de fatores atribuídos à variação do conteúdo de água, aeração e resistência mecânica do solo (BENGOUGH et al., 2011).

Essa variação pode indicar o nível de estresse ao qual a cultura foi submetida para o crescimento radicular (VALENTINE et al., 2012) o que limita o aprofundamento do sistema radicular e o volume de solo explorado pelas raízes (GONÇALVES et al., 2006; MODOLO et al., 2008) da soja nos espaços vazios entre os agregados do solo (ABREU; REICHERT.; REINERT, 2004) em solo compactado.

Os sistemas de cultivo em anos consecutivos causam excessiva desagregação física do solo, resultando em camadas compactadas no solo, que consiste na alteração em sua estrutura e afetam as propriedades hídricas, limitando o aprofundamento e crescimento das raízes e o volume de solo explorado em busca de água e nutrientes. Isso causa concentração de raízes dispostas na camada superficial do solo, onde o estresse hídrico se manifesta e, por consequência, reduz a produtividade da soja (SPERA et al., 2004; FRANCHINI et al., 2009; SOUZA et al., 2012; VALENTINE et al., 2012).

Essa compactação do solo altera a distribuição da massa das raízes nos primeiros 15 cm desse, por representar em média 75% da fitomassa total das raízes (GREGORY, 1992), uma vez que o crescimento das raízes é influenciado pelo manejo do solo. A compactação varia conforme as características do solo, sendo que nos argilosos varia de 1,0 a 1,45 kg dm⁻³, considerando crítico o valor de 1,55 kg dm⁻³ nos franco-argilosos a argilosos (CAMARGO; ALLEONI, 1997; TORRES; SARAIVA, 1999).

A compactação do solo reduz a porosidade total, a aeração, a capacidade de infiltração de água, a permeabilidade da água, a condutividade hidráulica, além de aumentar a sua resistência à penetração das raízes, os quais variam com o conteúdo de água no solo (SILVA et al., 2009; BENGOUGH et al., 2011; MORAES et al., 2014; MORAES et al., 2016).

Estudos evidenciam os efeitos da compactação do solo na cultura da soja (BUTTERY et al., 1998; FRANCHINI et al., 2009; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013; SATO et al., 2015). Essas alterações se manifestam nos parâmetros morfológicos como,

área foliar, crescimento da parte aérea, redução do crescimento radicular e, conseqüentemente, a produtividade potencial.

Para tanto, não só a morfologia da parte aérea e plasticidade fenotípica do sistema radicular são traços associados à tolerância, ao déficit hídrico e ao solo compactado. Uma vez que, são influenciados pelo potencial hídrico de água no xilema (ψ_f), condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração intercelular de CO_2 (C_i) e, conseqüentemente, a taxa de fotossíntese líquida por alterar o metabolismo da planta, afetando a produtividade de grãos (DESCLAUX; HUYNH; ROUMET, 2000; NEUMAIER et al., 2000; ZHANG et al. 2007; HOPKINS; HÜNER, 2009; MANAVALAN; GUTTKONDA; NGUYEN, 2009).

Estudos relatam efeitos significativos do déficit hídrico na produtividade da soja (BREVEDAN; EGLI, 2003; KIRNAK; DOGAN; TURKOGLU, 2010; CATUCHI et al., 2012; HAMEED et al., 2014, SANI; JAMSHIDI; MOHAMMAD, 2014, TORRION et al., 2014) enquanto (FRANCHINI et al., 2012; MACHADO JÚNIOR et al., 2017) não detectaram alteração expressiva na produtividade da soja pelo estresse hídrico.

Já nos parâmetros morfológicos da parte aérea, raiz e fisiológicos os efeitos do déficit hídrico mais evidente foram encontrados por (CONFALONE; DUJMOVICH, 1999; YU et al., 2004; BENJAMIN; NIELSEN, 2006; LIU et al., 2005; LAMBERS; CHAPIN; PON, 2008; KRON et al., 2008; HOPKINS; HÜNER, 2009; JALEEL et al., 2009; MANAVALAN et al., 2009; TANAKA; SHIRAIWA, 2009; EMBRAPA, 2011; BERTOLLI; RAPCHAN; SOUZA, 2012; FENTA et al., 2012).

A soja é considerada sob déficit hídrico quando a condutância estomática for menor que $0,2 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, situação de baixa disponibilidade hídrica e, valores abaixo de $0,1 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ é considerada em condição de déficit severo (RIBAS-CARBO et al., 2005).

Todavia, os efeitos do déficit hídrico são mais severos entre os estádios de florescimento e início do enchimento de grãos, podendo causar o abortamento de flores e a reduzir o número de vagens por planta (EMBRAPA, 2011). Tal fato se deve a estabilidade na produção de grãos que está altamente correlacionada à disponibilidade hídrica do solo. Assim como a condutância estomática (LAMBERS; CHAPIN; PON, 2008).

Uma vez que o fechamento estomático limita o suprimento de dióxido de carbono (CO_2) (HOPKINS; HÜNER, 2009; MANAVALAN et al., 2009), mais influenciado pelo potencial de água na folha do que o potencial de água na raiz ou no solo (BUNCE, 1999) por esse não responder à demanda transpirativa da cultura sob déficit hídrico, componente vital para a manutenção da água na planta (ALLEN et al., 1998; MADHU; HATFIELD, 2014).

Outro traço que pode contribuir para o aumento da tolerância ao déficit hídrico é a eficiência das culturas em acumular fitomassa por unidade de água utilizada (MANAVALAN et al., 2009) pela transpiração (TARDIEU, 2013). Essa eficiência no uso da água (EUA) é desejada na produção agrícola em cultivos com disponibilidade hídrica limitada para elevar a tolerância ao déficit hídrico com baixos níveis de transpiração (BLUM, 2009). No entanto, a condutância estomática (gs), a transpiração (E) e a fotossíntese líquida (A) podem ser aumentada em solo compactado.

De acordo com (FRANCHINI et al., 2009) a compactação em níveis intermediários reduz as perdas de produtividade da soja.

Nesse sentido, a água retida na camada compactada, em escala temporal, favorece a cultura da soja, com lâmina diária de água menor que a exigida. Isso pode melhorar na regulação das trocas gasosas e, portanto, na relação direta do processo fotossintético (PAIVA et al., 2005) contribuindo para a redução do efeito do déficit hídrico severo das perdas de produtividade da soja ocasionadas por limitações físicas dos solos.

Diante disso e dada à importância para identificar a associação da tolerância da soja ao estresse hídrico em solo compactado, partimos da hipótese de que o déficit hídrico é reduzido em solo compactado por alterar as trocas gasosas da soja e, conseqüentemente, na morfologia da parte aérea, na capacidade de exploração radicular e potencial produtivo. Com isso, necessários estudos com o objetivo de elucidar as alterações fisiológicas em solo compactado no processo fotossintético e, conseqüentemente, no desenvolvimento na parte aérea e no crescimento do sistema radicular.

A tese está dividida em dois capítulos apresentados na forma de artigos. O primeiro capítulo, intitulado Trocas gasosas e estresse hídrico na cultura da soja com irrigação deficitária em solo compactado. No segundo capítulo, com Trocas gasosas e desempenho agrônômico da soja sob estresse hídrico em solo compactado.

2 REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/rbcs/v28n3/a13v28n3.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, Rome, n. 56, p.300, FAO, 1998.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Manejo de solos em agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.de; COUTO, L. (Ed.). **Cultura do milho irrigado**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. cap. 4, p. 69-106.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21118824>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C.; Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. **Field Crops Research**, Akron, n.97, p.248-253, jun. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429005002510>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BERTOLLI, S. C.; RAPCHAN, G. L.; SOUZA, G. M. Photosynthetic limitations causes by different rates of water-deficit induction in Glycine max and Vigna unguiculata. **Photosynthetica**, Praha, v.50, n.3, p.329-336, 2012. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11099-012-0036-4>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, Akron, n.112, p. 119-123, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429009000860>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BUTTERY, B. R.; TAN, C. S.; DRURY, C. F.; PARK, S.J.; ARMSTRONG, R. J. PARTK, K. Y. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 78, n. 4, 571–576, 1998. Disponível em: < <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/P97-132>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BONATO, E. R. **Estresse em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 254p.

BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, Madison, v.43, n. 6, p.2083-2088, jan. 2003. Disponível em:<<https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/43/6/2083>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BUNCE, J. A. Leaf and root control of stomatal closure during drying in soybean. **Physiologia Plantarum**, Baltimore, v.106, p.190-195, 1999. Disponível em: <<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/80420520/FullTextPublicationspdf/Publications/bunce/leafandroot.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030110000638>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CONFALONE, A.; DUJMOVICH, M. N.; Influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.5, n.3, p.195-198, set/dez. 1999. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/download/292/287>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. **Piracicaba, SP: ESALQ**, p. 132p, 1997.

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.; BARBOSA, A. M. SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n. 4, p. 519-527, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n4/47n04a07.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, Madison, v.40, p.716-722, 2000. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/40/3/716?access=0&view=pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de Soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011, 264p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Embrapa Soja. Circular Técnica, 48. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p.

FEITOSA, H. O.; GONÇALVES, F. M.; MESQUITA, J. B. R.; ALBUQUERQUE, A. H. P.; NASCIMENTO, A. H. C.; COSTA, R. N. T. Balanço hídrico na cultura da soja sob recarga natural em um solo podzólico vermelho-amarelo. **Agropecuária Técnica**, Areia, v. 31, n. 1, p 58–61, 2010. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufpb.br/index.php/at/article/view/3823/3658>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FENTA, B. A.; DRISCOLL, S. P.; KUNERT, K. J.; FOYER, C. H. Characterization of drought-tolerance traits in nodulated soya beans: The Importance of maintaining Photosynthesis and Shoot Biomass Under

Drought-Induced Limitations on nitrogen Metabolism. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Madison, n.198, p.92-103, 2012. Disponível em :< <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-037X.2011.00491.x>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. ; TORRES, E. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178–185, 2012. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429012002894#bibl0005>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Documentos, 314. Londrina: Embrapa Soja, 2009. p. 39.

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L., ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L. DE; SILVA, G. P., PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.67-75, 2006. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30097.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

GREGORY, P. J. Crecimiento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). **Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel**. Madrid: Mundi-Prensa, p.121-175, 1992.

HAMEED, M.; DARAZ, G.; AHMAD, F. Impact of deficit Irrigation on soybean water requirement and yield in district swat. **Journal of Biology, Agriculture and Healthcare**, Hong Kong, v.4, n.6, p, 2224-3208, 2014. Disponível em: < <http://www.ijar.org/Journals/index.php/JBAH/article/download/.../11917>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

HOPKINS, W. G.; HÜNER, P. A. N. **Plant physiology** - 4th ed. p. 26-33 e 230. Wiley, 2009.

JALEEL, C. A.; JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A., FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.11, n.1, p. 100–105, 2009. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/fc62/ad94f99b818ee7f9aca6d879b434b04ba609.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

JIMÉNEZ, K. Q.; DE MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 496-508, 2013. Disponível em: < <http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/616>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

KIRNAK, H.; DOGAN, H.; TURKOGLU, H. Effect of drip irrigation intensity on soybean seed yield and quality in the semiarid Harran plain, Turkey. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madri, v. 8, n.4, 1208-1217, 2010. Disponível em: < <http://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/1239>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

KRON, A. P.; SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R.V. Water deficiency at different developmental stages of Glycine max can improve drought tolerance. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.43-49, 2008. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052008000100005>. Acesso em: 23 jun. 2018.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.S.; PON, T. L. **Plant physiological ecology**, 2nd edition. Springer, 2008.

LIU, F.; ANDERSEN, M. N.; JACOBSEN, S. E.; JENSEN, C. R. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive drying. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, n.54, p.33-40, 2005. Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847204000772> >. Acesso em: 23 jun. 2018.

MACHADO JÚNIOR, C. S.; DA SILVA, C. R.; SANCHES, M. C.; HAMAWAKI, O. T.; DE SOUSA, L. B. Physiologic parameters of soybean of determinate and indeterminate growth habit subjected to levels of soil moisture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.6, p.419-425, 2017. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2017000600419>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MADHU, M.; HATFIELD, J. L. Interaction of carbon dioxide enrichment and soil moisture on photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of soybean. **Agricultural Sciences**, Milan, v. 5, n.5, p.410-429, ap.2014. Disponível em:<<https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=44618>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MANAVALAN, L. P.; GUTTKONDA, S. K.; NGUYEN, H. T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant Cell Physiology**, Oxford, v.50, n.7, p. 1260-1276, 2009.

MANFRON, P. A.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A. R.; MEDEIROS, S. L. P.; PILAU, F. G. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 327-332, 2003. Disponível em:<<http://www.sbagro.org.br/bibliotecavirtual/arquivos/1391.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFER, C. E. G.; SILVEIRA, J. C. M. DA. . Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542008000400034&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 23 jun. 2018

MORAES, M. T. de. DEBIASIB, H.; CARLESSO, R.;FRANCHINI, J. C. SILVA, V. R. DA; LUZ, F. B. DA. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715001713>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MORAES, M. T. de.; M. T.; DEBIASIB, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C. SILVA, V. R. da. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288–298, jan./fev. 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832014000100029. Acesso em: 23 jun. 2018.

NEUMAIER, N; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E. R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 254p. 2000.

PAIVA, A. S. PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 25, n. 1, p. 161-169, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/27764>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agric.Water Manage**, Amsterdã, 108, 39–51, may. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377411002290>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

RIBAS-CARBO, M.; TAYLOR, N. L.; GILES, L.; BUSQUETS, S.; FINNEGAN, P. M.; DAY, D. A.; LAMBERS, H.; MEDRANO, H.; BERRY, J. A.; LEXAS, J. Effects of water stress on respiration in soybean leaves. **Plant Physiology**, Lewes, v.139, n.1, p.466-473, 2005. Disponível

em: <<http://www.plantphysiol.org/content/139/1/466>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SANI, Y. G.; JAMSHIDI, K.; MOHAMMAD, R. A. M. Evaluation of Quality and Quantity of Corn and Soybean Grain Yield In: Intercropping under Deficit Irrigation. **Journal of Biology, Agriculture and Healthcare**, Hong Kong, p, 2224-3208, v.4, n.25, 2014. Disponível em: <<http://www.iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/view/17385>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; OLIVEIRA, P. D. DE; RODRIGUES S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**, Lublin, v. 29, p. 441- 447, 2015. Disponível em: <<https://content.sciendo.com/view/journals/intag/29/4/article-p441.xml>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SILVA, V. R. DA; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097–1104, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832009000500003&script=sci_arttext&tlng=ES>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SOUZA, M. A. S.; FAQUIN, V.; GUELFY, D. R.; OLIVEIRA, G. C. DE; BASTOS, C. E. A. Acúmulo de macronutrientes na soja influenciado pelo cultivo prévio do capim-marandu, correção e compactação do solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 611-622, out./dez. 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/html/1953/195323720001/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 533- 542, 2004. Disponível em: <

<http://www.scielo.br/pdf/0D/rbcs/v28n3/a14v28n3.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, Amsterdam, v. 51, n. 4, p. 311, 2013. Disponível em: < <http://www.publish.csiro.au/sr/SR12306>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

TANAKA, Y.; SHIRAIWA, T. Steam growth habit affects leaf morphology and gas exchange traits in soybean. **Annals of Botany**, Oxford, v.104, n. 7 p.1293-1299, dec. 2009. Disponível em: < <https://academic.oup.com/aob/article/104/7/1293/165101>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand and negative effects of water deficit. **Frontiers in physiology**, Ohio, v.4, p.1-7, 2013. Disponível em: < <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2013.00017/full>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 1999. 58p. (Embrapa-CNPSo. Circular técnica, 23).

TORRION, J. A.; SETIYONO, T. D.; GRAEF, G. L.; CASSMAN, K. G.; IRMAK, S.; SPECHT, J. E. Soybean irrigation management: Agronomic impacts of deferred, deficit, and full-season strategies. **Crop Science Society of America**, Madison, v. 54, n. 6, p. 2782-2795, 2014. Disponível em: < <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/54/6/2782>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 2, p. 259–270, July. 2012. Disponível em: <

<https://academic.oup.com/aob/article/110/2/259/2769287>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

YU, G. R.; WANG, Q. F.; ZHUANGM J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. **Journal of Plant Biology**, Toronto, v.161, n. 3, p.303-318, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161704705908> >. Acesso em: 26 jun. 2018.

ZHANG, M.; DUAN, L.; TIAN, X.; HE, Z.; LI, J.; WANG, B.; LI, Z. Uniconazole - induced tolerance of soybeans to water deficit in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 164, p. 709-717, 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161706001386>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

Trocas gasosas e estresse hídrico na cultura da soja com irrigação deficitária em solo compactado

RESUMO

Pesquisas não avaliam os efeitos do estresse hídrico nos parâmetros fisiológicos da soja em solo compactado. Portanto, objetivou-se com esse estudo avaliar o estresse hídrico e acúmulo de fitomassa da soja em solo compactado com irrigação deficitária. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com delineamento inteiramente casualizados, com os tratamentos distribuídos em parcela subdividida 4×4 , com quatro níveis de massa específica do solo ($1,0 \pm 0,013$; $1,15 \pm 0,022$; $1,30 \pm 0,035$ e $1,45 \pm 0,040$ kg dm^{-3}) e quatro lâminas diária de irrigação (4,0; 5,0; 6,0 e 7,0 mm) com três repetições. Foram avaliados taxa de fotossíntese líquida, de transpiração, condutância estomática, concentração intercelular de CO_2 , eficiência no uso de água, eficiência instantânea no uso da água, eficiência instantânea da carboxilação, índice de estresse hídrico, área foliar, altura de planta, fitomassa seca de raiz, raiz parte aérea (PA^{-1}), número e peso seco de vagens. O estresse hídrico nas lâminas de 4 e 5 mm reduziu as trocas gasosas e o índice SPAD. O máximo valor de área e fitomassa foliar foram verificados na lâmina de 6,0 mm. O aumento da massa específica do solo proporcionou maiores ganhos de fitomassa da parte aérea e raiz na camada acima da compactada. O número de vagens e fitomassa das vagens por planta aumentou com a lâmina aplicada.

Palavras-chave: *Glycine max L.*, massa específica, índice de estresse hídrico, fotossíntese.

ABSTRACT

Studies do not evaluate the effects of water stress on the physiological parameters of soybean in compacted soil. Therefore, the aim of this study was to evaluate the water stress and the soybean phytomass accumulation in compacted soil with irrigation deficit. The experiment was conducted in the greenhouse with a completely randomized design. The treatments were distributed in 4×4 subdivided plots, with four levels of soil specific mass (1.0 ± 0.013 , 1.15 ± 0.022 , 1.30 ± 0.035 and 1.45 ± 0.040 kg dm⁻³) and four daily water depth (4.0, 5.0, 6.0 and 7.0 mm), with three replicates. The rate of liquid photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, efficiency in water use, instantaneous efficiency in water use, instantaneous efficiency of carboxylation, water stress index, leaf area, plant height, dry root phytomass, root aerial part (PA⁻¹), and the number and dry weight of pods were evaluated. Water stress on the 4 and 5 mm depths reduced gas exchange and the SPAD index. The maximum values of area and leaf phytomass were verified for the 6.0-mm depth. The increase in the specific mass of the soil cause higher gains of phytomass of the aerial part and root in the layer above the compacted one. The number of pods and phytomass of the pods per plant increased with the applied depth.

Keywords: *Glycine max L.*, specific mass, water stress index, photosynthesis.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de cultivo nas regiões sojicultoras alteram as propriedades físicas do solo, assim como o déficit hídrico nas fases entre florescimento e enchimento de grãos pela exigência hídrica diária de 7,5 mm (FARIAS et al., 2007; PRANDO et al., 2010; HIRAKURI, 2016). No entanto, essa lâmina pode ser reduzida em solo compactado, sem comprometer a produtividade potencial.

A compactação do solo proporciona o aumento da densidade do solo o que interfere na variabilidade temporal da umidade no solo, interrupção, continuidade, frequência e tamanho dos poros (HÉBRARD et al., 2006; KUNCORO et al., 2014; MORAES et al., 2015; MORAES et al., 2016), reduzindo a condutividade hidráulica e o fluxo de água do solo (SILVA et al., 2009; MORAES et al., 2015). Com isso, limita o aprofundamento e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (VALENTINE et al., 2012).

Em níveis intermediários, a compactação do solo é benéfica para soja, reduzindo as perdas de produtividade (FRANCHINI et al., 2009) em relação ao solo desagregado e solto. No entanto, níveis elevados de compactação do solo, geralmente na camada de 7–15 cm, são extremamente prejudiciais por interferir diretamente no crescimento radicular por meio da redução da taxa de alongamento (RICHART et al., 2005; LIPIEC et al., 2012; BENGOUGH et al., 2011; VALENTINE et al., 2012).

Isso é devido ao aumento da resistência à penetração das raízes em consequência do aumento da massa específica e redução da umidade volumétrica do solo.

A baixa disponibilidade de água no solo, assim como nos tecidos foliares altera o potencial produtivo da soja pela redução no número de ramos, nós e vagens por planta, principalmente, sob estresse hídrico severo ou moderado (BREVEDAN; EGLI, 2003; CATUCHI et al., 2012; KIRNAK et al., 2010).

Esses resultados são melhor explicados pelos parâmetros fisiológicos da soja como detectado por Franchini et al. (2012) e Machado Júnior et al. (2017) que não observaram redução significativa na produtividade de grãos sob estresse hídrico.

Esse estresse reduz progressivamente a condutância estomática com menor partição de água das folhas para atmosfera, através da transpiração e, conseqüentemente, a taxa fotossintética (LEI; TONG; SHENGYAN, 2006).

Essa redução fornece uma rota potencial para melhorar a eficiência no uso da água e conservar os níveis de água do solo (HEPWORTH et al., 2015). Com isso, a redução da condutância estomática parece ser o caminho mais eficiente para reduzir a partição da água para atmosfera por transpiração (STILLER et al., 2008).

Contudo, esses estudos não avaliam o efeito da compactação do solo nos processos fisiológicos e o índice de estresse hídrico na soja, uma vez que pode ser favorecida pela maior disponibilidade de água na camada acima da compactada.

Uma vez que a compactação do solo melhora a regulação das trocas gasosas da soja sob estresse em escala temporal. E, portanto, na relação direta da demanda transpirativa a que as folhas estão potencialmente sujeitas (KERBAUY, 2008; BLUM, 2009; TAIZ; ZEIGER, 2013), diminuindo os efeitos do estresse hídrico severo; a evitar o enrolamento dos folíolos pela desidratação dos tecidos (OHASHI et al., 2006). Classificado por Ribas-Carbo et al. (2005) em estresse severo quando os valores da condutância forem abaixo de $0,10 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Portanto, conhecer a necessidade hídrica da soja é de suma importância para o manejo adequado de áreas de cultivo irrigado, devido à água no solo ser fator determinante na produção agrícola. Com isso, estudos que avaliam as alterações fisiológicas e morfológicas na formação de vagens em solo com baixa disponibilidade de água e compactado são importantes para elucidar o índice de estresse hídrico e a variação da temperatura foliar nessas condições de manejo.

Para tanto, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o estresse hídrico e acúmulo de fitomassa da soja em solo compactado com irrigação deficitária.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na área experimental do Núcleo de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras – (UFLA), no período de novembro de 2016 a janeiro de 2017. A temperatura no interior da casa de vegetação variou de $26,9 \pm 2,1^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar de $58,22 \pm 5,1\%$ e a radiação solar de $663,2 \pm 104,3 \text{ W m}^{-2}$.

O solo foi coletado de um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2013) no campus da UFLA. Em seguida, o solo foi seco ao ar e peneirado através de uma malha de 2 mm (TFSA).

Com base na análise química do solo, foi efetuada a calagem para elevar a saturação por bases a 60%, com uso de calcário dolomítico. Após a incubação do solo por 30 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP), foi realizada a adubação de plantio, de acordo com as recomendações de Malavolta (1980) com as seguintes aplicações (mg kg^{-1}): 80 de N, 250 de P, 200 de K_2O e 50 de S, em fontes PA Posfato de Amônio Monobásico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), Posfato Monopotássico (KH_2PO_4) e Sulfato de Magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

A adubação com micronutrientes (mg kg^{-1}) consistiu da aplicação de 0,5 de B, 1,5 de Cu, 0,1 de Molibdênio (Mo) e 5,0 de Zinco (Zn), fornecidos na forma de Ácido Bórico (H_3BO_3), Sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Molibdato de Amônio [$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] e Sulfato de Zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Após adubação foram coletadas subamostras de solo para caracterização física e química: 150, 180 e 670 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente; pH (H₂O) = 6,3; H + Al³⁺ = 3,27 cmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 cmol_c dm⁻³; P (Mehlich -1) = 1,13 mg dm⁻³; K = 58,0 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 2,8 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,6 cmol_c dm⁻³; CTC = 6,82 cmol_c dm⁻³; saturação de bases (V%) = 52 e, matéria orgânica (M.O) = 25,5 g dm⁻³. Aos 25 e 40 dias após o plantio (DAP) realizou-se as adubações de cobertura com aplicação de 55 mg de K₂O, utilizando-se a fonte KCl.

Cada parcela experimental foi composta por vaso de 15 dm³ com 0,296 m de altura e 0,262 m de diâmetro interno na camada compactada, dividido em três camadas, sendo a superior com 0,12 m e inferior com 0,10 m, preenchidos com o solo peneirado com massa específica de 1,00 kg dm⁻³, enquanto a camada compactada foi determinada com base no volume do anel metálico [(5,4 dm² * 0,6 dm) = 3,23 dm³]. Para isso, a TFSA foi umedecida e homogeneizada até atingir a umidade ótima para compactação, conforme metodologia de Santos et al. (2005) para Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), feita com auxílio de uma prensa hidráulica. Para evitar deformações ou rompimento do balde pela compressão do solo na camada compactada, foi colocado um anel metálico (chapa de aço de 0,06 m de altura e 0,012 m de espessura) de iguais dimensões do balde. Para o encaixe entre a camada compactada e a parede do balde foi realizado um acabamento com impermeabilizante de asfalto frio para evitar o fluxo preferencial da água e crescimento das raízes.

O delineamento experimental utilizado foi em inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas 4 x 4, sendo os fatores

constituídos por quatro níveis de massa específica do solo ($1,0 \pm 0,013$; $1,15 \pm 0,022$; $1,30 \pm 0,035$ e $1,45 \pm 0,040 \text{ kg dm}^{-3}$) e quatro lâminas de água 4,0; 5,0; 6,0 e 7,0 mm com três repetições. Essa compactação foi definida conforme Torres e Saraiva (1999) que consideram crítico a partir de $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$ em solos de textura franco-argilosos a argilosos.

Antes da sementeira, as sementes de soja, do cultivar RK 8115 IPRO de crescimento indeterminado foram tratadas com piraclostrobina + tiofanato metílico + fipronil na dose de 2 mL p.c kg^{-1} de semente, inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes SEMIA 5079 e 5080 ($5,0 \times 10^9$ de células viáveis mL^{-1}), na dose de $4 \text{ mL p.c. kg}^{-1}$ de semente. A sementeira foi realizada no dia 15 de novembro de 2016, sendo distribuídas cinco sementes por vaso a 2 cm de profundidade e, quinze dias após a sementeira, fez-se o desbaste, deixando três plântulas. Visando manter a sanidade das plantas foram aplicados de forma preventiva inseticida e fungicida recomendados para a cultura.

A partir dos 35 dias após emergência (DAE), antes lâmina diária de 3 mm até aos 15 dias após plantio (DAP) e, a partir, 4 mm até 35 DAE, a reposição da irrigação diária pré-estabelecida, foi mantida manualmente das 9 às 10 horas. A lâmina diária de 4,0 mm é metade da crítica exigida pela soja nas fases de maior demanda transpirativa entre florescimento e enchimento de grãos em condições normais de cultivo.

Aos 55 dias após a emergência (DAE) determinou-se as trocas gasosas utilizando-se o analisador portátil de gás por infravermelho (IRGA - LICOR 6400, LICOR, Nebraska, USA), realizadas entre 9 e 11 horas, em duas folhas por planta completamente expandidas, fotossinteticamente ativas e sem lesões, localizadas no terceiro trifólio de

cima para baixo. A radiação fotossinteticamente ativa foi padronizada em luz saturante artificial de $1.000 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Para cada avaliação, obteve-se a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E), a concentração intercelular de CO_2 (C_i), a taxa de fotossíntese líquida (A), a temperatura da folha (T_f) e déficit de pressão de vapor d'água (DPV). De posse desses dados, calculou-se a eficiência instantânea da carboxilação (EiC) (A/C_i). Determinou-se o índice de estresse hídrico da soja (IEH), usando a fórmula $\text{IEH} = [(t_c - t_{ar}) - D_2] / (D_1 - D_2)$ como descrito por Idso et al. (1981). Em que $D_2 = 7,6046 - 2,725 * \text{DPV}$, é a equação obtida pela correlação entre $D_2 = (t_c - t_{ar})$ ($^{\circ}\text{C}$) e déficit de pressão de vapor (DPV) (kPa), t_c é a temperatura da cultura, t_{ar} é a temperatura da casa de vegetação, D_1 é a diferença máxima entre t_c e t_{ar} que foi de $2,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ da soja.

Após a leitura de trocas gasosas, em três folhas por vaso, determinou-se o índice (SPAD) com o clorofilômetro (SPAD-502, Minolta, Japão). Em seguida, as plantas foram seccionadas na base do colo e mensuradas a altura e diâmetro do caule. Posteriormente, foram levadas para o laboratório e determinada a sua área foliar no medidor de área foliar LI-3100 Área Meter (LI-COR Inc. Lincoln, NE, EUA). Os caules, folhas e vagens foram secados em estufa com circulação forçada de ar a $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h para determinação da fitomassa seca em balança de precisão ($\pm 0,001$).

Em seguida os vasos foram destorroados e determinou-se a fitomassa seca do sistema radicular nas camadas superior (A) e camada compactada (B). A fitomassa seca e a porcentagem de raízes foram

determinadas com auxílio de balança de precisão ($\pm 0,001$) após serem lavadas e secas em estufa de circulação de ar a 65°C , durante 72 h.

Os dados apresentaram distribuição normal e foram submetidos à análise de variância, sendo as médias das variáveis significativas comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Posteriormente, realizou-se a análise de regressão para os dados quantitativos (lâmina de irrigação e massa específica do solo) e 3 D (interação), significativos pelo teste *t* de Student, associando-se os coeficientes de correlação ($p < 0,05$) e determinação a cada modelo por meio do programa estatístico R 3.2.3 (RDCT, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E), a concentração intercelular de CO_2 (C_i) e a taxa de fotossíntese líquida (A) (Figuras 1 A, B, C, D) foram alteradas significativamente pelas lâminas de irrigação na cultura da soja, com menores valores em decorrência do estresse hídrico (IEH) (Figura 1 H) nas lâminas diária de 4 e 5 mm, com valores acima de 0,40 e de gs abaixo de $0,10 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Isso é devido a soja estar em situação de baixa disponibilidade hídrica nos tecidos foliares, considerado por Ribas-Carbo et al. (2005) em condição de déficit hídrico severo.

O fechamento estomático devido à restrição de água no mesófilo foliar reduziu a transpiração a valores abaixo de $2,5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a

corroborar em parte com Chavarria et al. (2015) que também observaram na transpiração em cultivares de soja submetidos a déficit hídrico severo.

Com isso, reduziu o fluxo normal de CO₂ em direção ao sítio de carboxilação (Figura 1 C) e, conseqüentemente, a taxa de fotossíntese líquida (SILVA et al., 2015; BOSCO et al., 2009), como observado na (Figura 1 D) devido a soja, planta de ciclo C₃, ser limitada a assimilar CO₂ em situações de estresse hídrico severo (KERBAUY, 2008).

Essa situação faz com que a eficiência instantânea de carboxilação (EiC) (Figura 1 E) alcance valores maiores devido a estreita relação entre o consumo de água da soja com a taxa de assimilação de CO₂ por ser um dos mecanismos fisiológicos sensível ao aumento da temperatura da folha (Figura 1 F).

A máxima taxa de fotossíntese líquida (A) de 16 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ foi observada no ponto de compensação ajustada (t_c - t_a) de 0,91°C e IEH na lâmina diária de 6,0 mm com posterior declínio.

O menor valor de IEH foi observado na lâmina de 7,0 mm, em torno de 0,22 no limite superior, a corroborar com Candogan et al. (2013) observado antes da irrigação em dois anos avaliados na cultura da soja e com Waller e Yitayew (2016) que a encontraram acima de 0,24, classificados com boa disponibilidade hídrica, sem estresse hídrico. Assim como Ribas-Carbo et al. (2005) a considera com gs acima de 0,20 mol H₂O m⁻² s⁻¹.

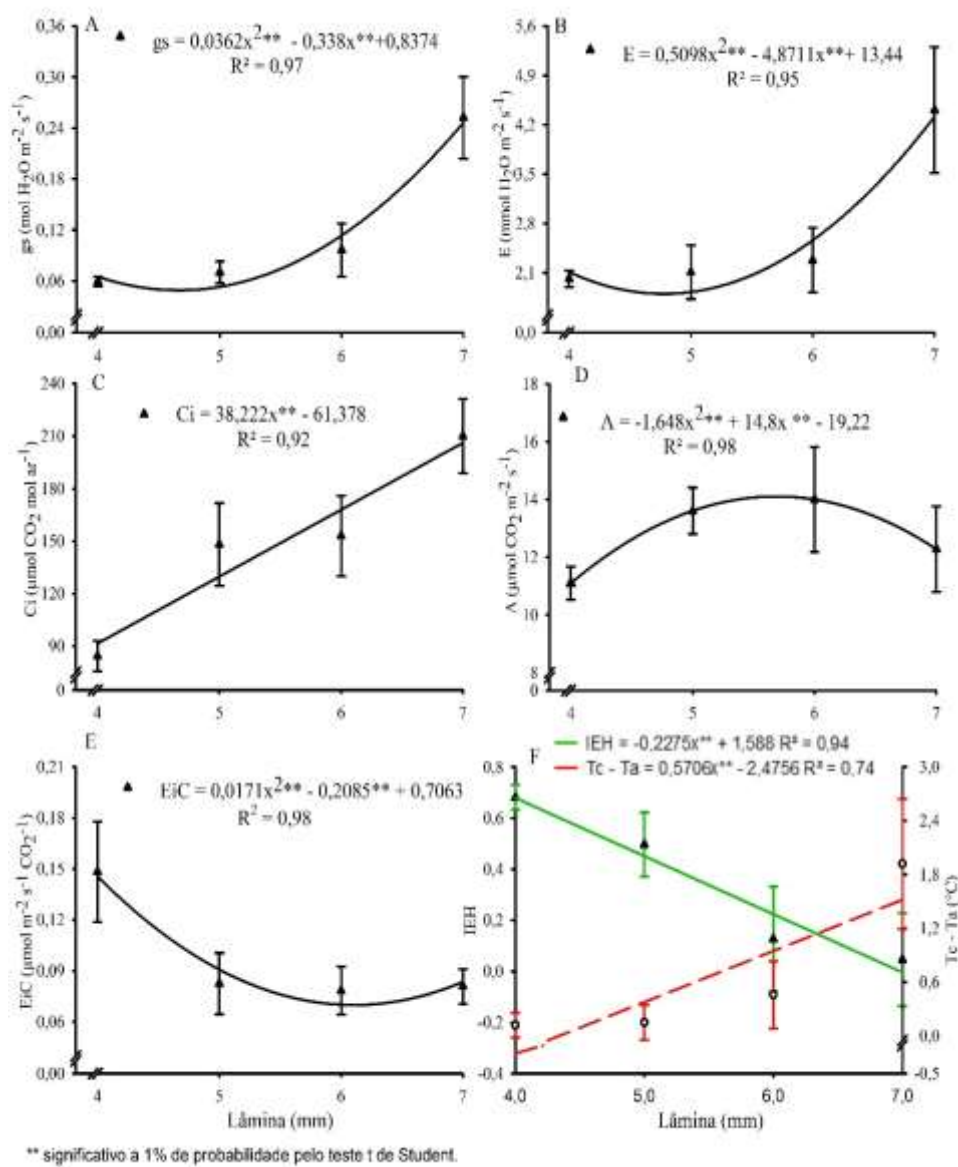


Figura 1. Condutância estomática (g_s) (A), taxa de transpiração (E) (B), concentração intercelular de CO_2 (C_i) (C), taxa de fotossíntese líquida (A) (D), eficiência instantânea de carboxilação (E_iC) (E), temperatura da cultura e folha ($t_c - t_a$) e índice de estresse hídrico (IEH) (F) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017.

O estresse hídrico aplicado na cultura da soja com a lâmina de 4,0 mm refletiu o suficiente para não aumentar a área foliar e a fitomassa da folha (Figuras 2A, B), verificado também por Sincik et al. (2008); Jaleel et al. (2009); Rhine et al. (2009) que pode ter sido uma estratégia da soja em solos com baixa disponibilidade de água por diminuir o ritmo de transpiração, levando à economia de água até a formação de vagens, como relatado por (STOLF-MOREIRA et al., 2010; TARDIEU, 2013).

O máximo valor de área foliar e fitomassa da folha foi verificado na lâmina de 6,0 mm compensado pela relação da fitomassa acumulada das folhas por unidade de água utilizada na assimilação de CO₂ sem estresse hídrico, consequência do incremento progressivo das clorofilas, pelo aumento da taxa de assimilação de CO₂, até a interrupção da produção de fitomassa na lâmina de 7 mm.

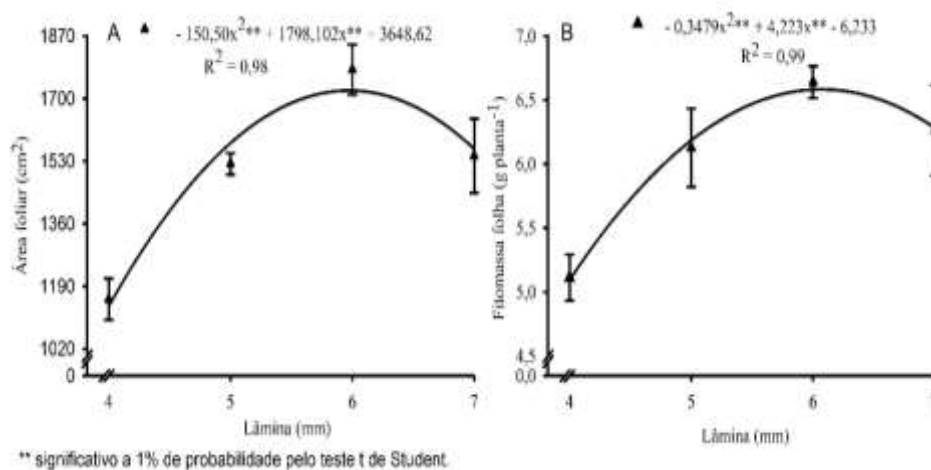


Figura 2. Área foliar (A) e fitomassa foliar (B) da soja submetida às diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017.

O índice SPAD foi aumentado significativamente com o acréscimo da compactação do solo e com a lâmina diária de irrigação aplicada (Figura 3 A). Todavia, em solo não compactado, o índice SPAD variou até 42 nas lâminas de 4,0 e 5,0 mm, considerado sob déficit de severo a moderado, refletindo em menores índices, a corroborar com Inamullah e Isoda (2005) nos tratamentos com estresse hídrico severo na soja. Com isso, reduziu o desempenho no processo fotossintético, devido às clorofilas serem responsáveis pela captação de energia luminosa para as reações fotoquímicas (TERZI et al. al., 2010; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A fitomassa do caule e a altura de planta também aumentaram em função do aumento da compactação do solo e da lâmina de irrigação (Figuras 2 B, C), em decorrência do maior desenvolvimento do caule.

Isso é devido a maior disponibilidade e aumento do fluxo de água no xilema para as células em divisão celular e expansão de meristemas jovens no alongamento celular do caule (GUNES et al., 2008; MUNAWARTIL et al., 2014) com o aumento do diâmetro no colo do caule, a área envolvida com o transporte de água e, conseqüentemente, no crescimento em altura, a corroborar com Farias et al. (2007) pela estreita relação desses com a massa específica do solo e o conteúdo de água no solo, bons indicadores de qualidade física do solo.

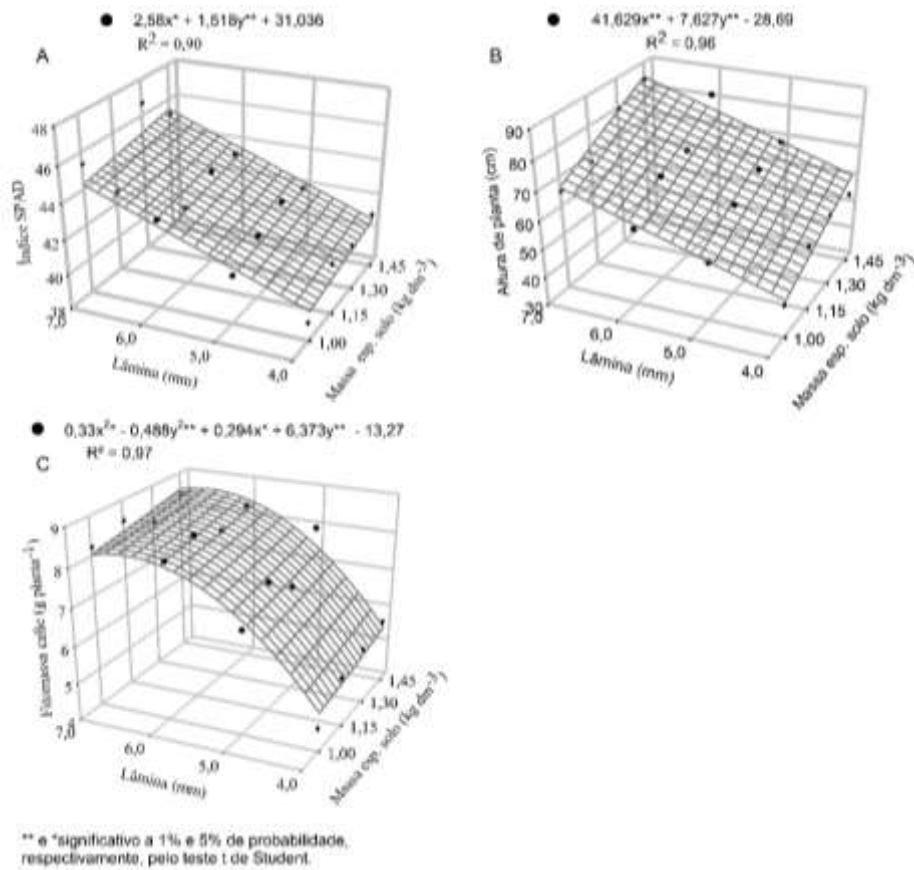


Figura 3. Índice SPAD (A), altura de planta (B) e fitomassa do caule (C) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017.

A fitomassa e porcentagem de raízes na camada (A) foram aumentadas significativamente pela compactação do solo (Figuras 4 A, B₁), com aproximadamente 1,5 vezes superior a massa específica de 1,00 kg dm^{-3} , comparada a massa específica de 1,45 kg dm^{-3} . No entanto, a porcentagem de raiz reduziu com aumento da lâmina irrigada (Figura 4 B₂).

Tais respostas estão relacionadas à compactação do solo reduzir a porosidade e aumentar a resistência do solo à penetração das raízes (FRANCHINI et al., 2009; MORAES et al., 2014; MORAES et al., 2016) o que limita o aprofundamento e volume de solo explorado (HAMZA; ANDERSON, 2005; GONÇALVES et al., 2006; MODOLO et al., 2008; FRANCHINI et al., 2009; BENGOUGH et al., 2011; JIN et al., 2013) com maior proliferação e concentração das raízes secundárias dispostas superficialmente ao atingir a camada compactada.

Enquanto na camada compactada houve interação significativa na fitomassa de raiz, reduzida pela compactação do solo (Figura 4 C), também detectado por Buttery et al. (1998) na cultura da soja em dois níveis de massa específica de solo. No entanto, aumentou nas maiores lâminas de irrigação por reduzir o efeito da resistência do solo à penetração com a formação de bioporos no solo pelas raízes.

Essa restrição do crescimento das raízes pelo aumento da resistência à penetração em solos compactados, refletiu na relação raiz parte aérea (raiz PA^{-1}) (Figura 4 D) com maior acúmulo de fitomassa na parte aérea. No entanto, nas menores lâminas irrigadas, a estratégia da soja foi priorizar o sistema radicular com alocação da maior parte de fotoassimilados, como relatado na área foliar.

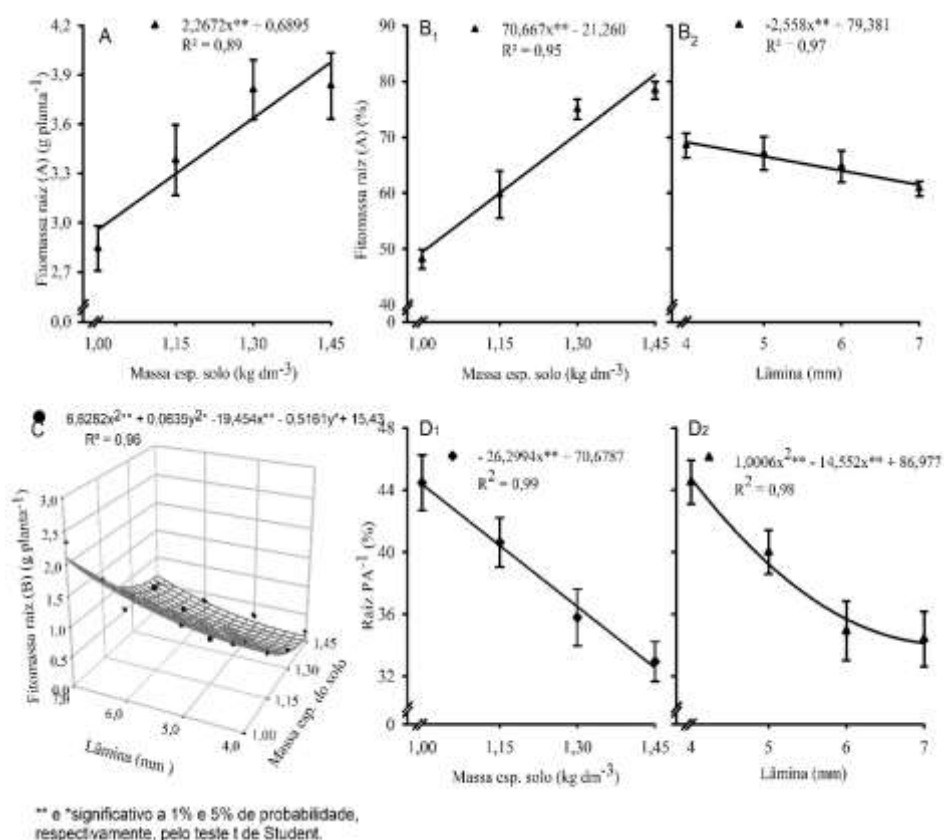


Figura 4. Fitomassa de raiz camada (A) (A), porcentagem de fitomassa de raiz camada (A) (B), fitomassa de raiz camada (B) (C) e relação entre raiz total por fitomassa seca total da parte aérea (D) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017.

Com isso, o número de vagens por planta e a fitomassa de vagens (Figuras 5 B, C) foram duas e cinco vezes inferiores na lâmina de 4,0 mm, respectivamente, comparado à lâmina de 7,0 mm aos 55 DAE. Esses resultados corroboram em parte com os de Bredan e Egli (2003) na formação de vagem da soja sob déficit hídrico severo por 13 dias. No entanto, difere dos resultados obtidos por Machado Júnior et al. (2017) no rendimento de grãos da soja sob estresse hídrico por 15 dias.

Resultado controverso devido à soja ter grande facilidade em recuperar a condutância estomática e transpiração após déficit hídrico diário, sem inibir o aparato fotossintético e, conseqüentemente, ganho em fitomassa, mesmo reduzido.

Contudo, deve-se ter cautela ao afirmar ganhos proporcionais de fitomassa da soja sob déficit hídrico, o que pode levar ao produtor conclusões errôneas, com avaliações exclusivamente visuais em solo compactado.

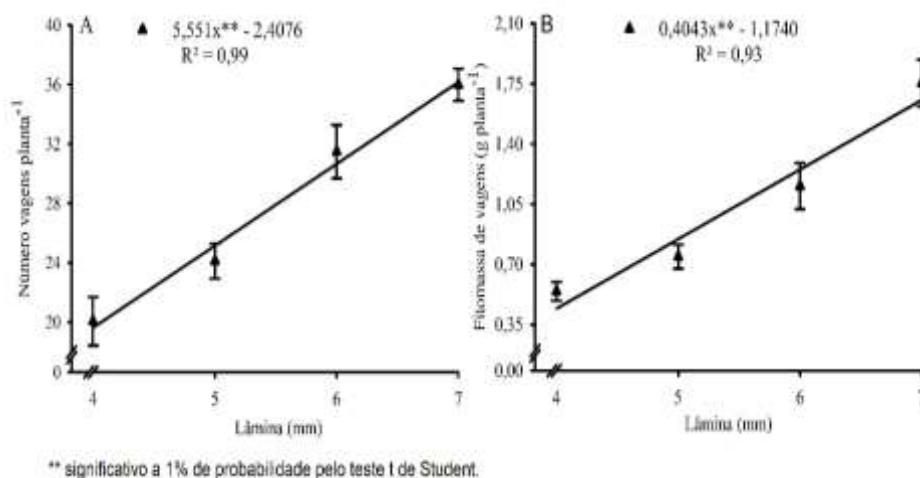


Figura 5. Número de vagens (A) e fitomassa seca de vagens (B) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017.

4. CONCLUSÃO

Em decorrência do estresse hídrico nas lâminas de 4 e 5 mm com baixas taxas de transpiração e menor dissipação térmica de energia pelo

aquecimento da folha, reduziu o índice SPAD e, conseqüentemente, o desempenho no processo fotossintético, devido as clorofilas serem responsáveis pela captação de energia luminosa para as reações fotoquímicas.

No entanto, o máximo valor de área foliar e fitomassa da folha foram verificados na lâmina de 6,0 mm, compensado pela relação da fitomassa acumulada das folhas por unidade de água utilizada na assimilação de CO₂.

O aumento da massa específica do solo proporcionou maiores ganhos de fitomassa da parte aérea e raiz na camada acima da compactada. Isso se deve ~~devido~~ à maior disponibilidade de água para absorção das raízes entre as interfaces de solo solto e compactado, em escala temporal, contribuindo para minimizar o estresse severo da soja por prolongar a desidratação dos tecidos foliares nas menores lâminas, retardando o enrolamento dos folíolos.

O número de vagens e fitomassa das vagens dessas por planta aumentou com a lâmina aplicada.

5. REFERÊNCIAS

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21118824>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, Akron, n.112, p. 119-123, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429009000860>> . Acesso em: 26 jun. 2018.

BOSCO, M. R. O.; OLIVEIRA, A. B. de; HERNANDEZ, F. F. F.; LACERDA, C. F. de. Efeito do NaCl sobre o crescimento, fotossíntese e relações hídricas de plantas de berinjela. **Revista Ceres**, Viçosa, v.56, n. 3, p. 296-302. 2009.

BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, Madison, v.43, n. 6, p.2083-2088, jan. 2003. Disponível em:<<https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/43/6/2083>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BUTTERY, B. R.; TAN, C. S.; DRURY, C. F.; PARK, S. J.; ARMSTRONG, R. J.; PARK, K. Y. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. **Canadian Journal of Plant Science**. Ottawa, v. 78, n. 4, 571–576, 1998. Disponível em:<<http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/P97-132>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CANDOGAN, B. N.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; DEMIRTAS, C.; GOKSOY, A. T.; YAZGANA, S. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**. Amsterdã, v. 118, p. 113–121, 2013. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412003149>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.; BARBOSA, A. M. SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n. 4, p. 519-527, abr. 2012.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n4/47n04a07.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CHAVARRIA, G.; DURIGON, M. R.; KLEIN, V. A.; KLEBER, H. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.8, p.1387-1393, 2015. Disponível em: <[https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/ciencia-rural/45-\(2015\)-8/restricao-fotossintetica-de-plantas-de-soja-sob-variacao-de-disponibil/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/ciencia-rural/45-(2015)-8/restricao-fotossintetica-de-plantas-de-soja-sob-variacao-de-disponibil/)>. Acesso em: 26 jun. 2018.

EMPRAPA – Empresa brasileira de produção agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. ; TORRES, E. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178–185, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429012002894#bibl0005>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Documentos, 314. Londrina: Embrapa Soja, 2009. p. 39

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L., ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L. DE; SILVA, G. P., PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.67-75, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30097.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

GUNES, A. PILBEAM, D. J.; INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, Turin, v. 2, n. 2, p. 105-113, 2008. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17429140701529399>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n. 2, p.121-145, jun. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704001849>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

HÉBRARD, O.; VOLTZ, M.; ANDRIEUX, P. MOUSSA, R. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, n. 1-2, p. 110-121, sept. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406000746>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

HEPWORTH, C. DOHENY-ADAMS, T. D.; HUNT, L.; CAMERON, D. D.; GRAY, J. E. Manipulating stomatal density enhances drought tolerance without deleterious effect on nutrient uptake. **New Phytologist**, Oxford, v. 208, n. 2, 336–341, oct. 2015. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.13598>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

HIRAKURI, M. H. **Impactos econômicos de estresses na produção de soja da safra 2015/16**. Circular técnica, 125, Embrapa Soja. Londrina, 2016.

IDSO, S. B. JACKSON, R.D.; PINTER JR. P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress degree-day for environmental variability. **Agric. Meteorol.** Iowa, v. 24, 45–55, 1981. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0002157181900327>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

INAMULLAH, I.; ISODA, A. Adaptive responses of soybean and cotton to water stress. II. Changes in CO₂ assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, Kyoto, v.8, n. 2, p.131- 138, dec. 2005. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1626/pp.s.8.131>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

JALEEL, C. A. MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in Plants: A review on Morphological Characteristics and Pigments Composition. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.11, n.1, p. 100 – 105, 2009. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.323.1932&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

JIN, K et al. How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 15, p. 4761–4777, 2013. Disponível em: <>. Acesso em: 27 jun. 2018.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p.

KIRNAK, H.; DOGAN, H.; TURKOGLU, H. Effect of drip irrigation intensity on soybean seed yield and quality in the semiarid Harran plain, Turkey. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madri, v. 8, n.4, 1208-1217, 2010. Disponível em:<<http://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/1239>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

KUNCORO, P. H. KOGA, K.; SATTA, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 143, p. 180–187, nov. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198714000154>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

LEI, W.; TONG, Z.; SHENGYAN, D. Effect of drought and rewatering on photosynthetic physioecological characteristics of soybean. **Acta Ecologica Sinica**, Amsterdam, v. 26, n. 7, p. 2073-2078, jul. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872203206600334>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

LIPIEC, J. HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J.; SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 121, p. 74–81, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198712000244>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

MACHADO JÚNIOR, C. S.; MACHADO JÚNIOR, C. S.; DA SILVA, C. R.; SANCHES, M. C.; HAMAWAKI, O. T.; DE SOUSA, L. B. Physiologic parameters of soybean of determinate and indeterminate growth habit subjected to levels of soil moisture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.6, p.419-425, 2017. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2017000600419>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. Piracicaba: **Agronômica Ceres**, 1980. 251 p.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFER, C. E. G.; SILVEIRA, J. C. M. DA. . Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-70542008000400034&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MORAES, M. T.; MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. D. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288– 298, jan./fev. 2014.

Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832014000100029&script=sci_arttext>. Acesso em: 28 jun. 2018.

MORAES, M. T. de.; BERTOLLO, A., DEBIASI, H., FRANCHINI, J., LEVIEN, R., & MAZURANA, M. SPD e a disponibilidade hídrica em solos argilosos. **Granja**, Porto Alegre, v. 791, n. 11, p. 58–59, 2015.

MORAES, M. T. de. DEBIASIB, H.; CARLESSO, R.;FRANCHINI, J. C. SILVA, V. R. DA; LUZ, F. B. DA. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715001713>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MUNAWARTI, A. SEMIARTI, E. TARYONO, T. SISMINDARI, S. Morphological and biochemical responses of glagah (*Saccharum spontaneum* L.) Accessions to Drought Stress. **Journal of Tropical Life Science**, Malang, v.4, n.1, 61-66, 2014. Disponível em: < <http://www.ingentaconnect.com/content/doi/20875517/2014/00000004/0000001/art00010#Refs>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 50, n.1, p.138-141, 2006. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-005-0089-3>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

PRANDO, M. B; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E., ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol.34, n.3, pp. 693-700. maio/jun. 2010. Disponível em: < <http://www.redalyc.org/comocitar.ou?id=180215874009>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

R Development Core Team - RDCT. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: the R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RIBAS-CARBO, M.; TAYLOR, N. L.; GILES, L.; BUSQUETS, S.; FINNEGAN, P. M.; DAY, D. A.; LAMBERS, H.; MEDRANO, H.; BERRY, J. A.; LEXAS, J. Effects of water stress on respiration in soybean leaves. **Plant Physiology**, Lewes, v.139, n.1, p.466-473, 2005. Disponível em: <<http://www.plantphysiol.org/content/139/1/466>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

RICHART, A. TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321- 344, 2005. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/html/4457/445744077016/>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

RHINE, M. D. STEVENS, G.; SHANNON, G.; WRATHER, A.; SLEPER, D. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. **Irrigation science**. (on-line, July 2009). Berlin, Springer-Verlag, v. 28, n. 2, p. 134-142, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-009-0168-x>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

SANTOS, G. A.; DIAS JÚNIOR, M. D. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 740-752, 2005.

DA SILVA, F. G.; DUTRA, W. F., DUTRA, A. F., DE OLIVEIRA, I. M., FILGUEIRAS, L., DE MELO, A. S. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.10, p.946–952, 2015. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v19n10/v19n10a06.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

SILVA, V. R. DA; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097–1104, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832009000500003&script=sci_arttext&tlng=ES>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SINCIK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BÜYÜKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GÖKSOY, A. T. Deficit irrigation of soya bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Madison, v.194, p.200- 205, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1439-037X.2008.00307.x>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

STILLER, I. STILLER, I.; DULAI, S.; KONDRÁK, M.; TARNAI, R.; SZABÓ, L.; TOLDI, O.; BÁNFALVI, Z. Effects of drought on water content and photosynthetic parameters in potato plants expressing the trehalose-6-phosphate synthase gene of *Saccharomyces cerevisiae*. **Planta**, Berlin, v. 227, p. 299-308, 2008. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-007-0617-9>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

STOLF-MOREIRA, R.; MEDRI, M. E.; NEUMAIER, N.; LEMOS, N. G.; BROGIN, R. L.; MARCELINO, F. C.; DE OLIVEIRA, M. C. N.; FARIAS, J.R.B.; ABDELNOOR. R.V.; NEPOMUCENO, A. L. Cloning and quantitative expression analysis of drought-induced genes in soybean. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 9, n. 2, p. 858–867, 2010. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 5. ed, Porto Alegre: **Artmed**, 2013, 918 p.

TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand and negative effects of water deficit. **Frontiers in physiology**, Ohio, v.4, p.1-7, 2013. Disponível em: <

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2013.00017/full>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

TERZI, R. TERZİ, R.; SAĞLAM, A.; KUTLU, N.; NAR, H.; KADIOĞLU, A. Impact of soil drought stress on photochemical efficiency of photosystem II and antioxidant enzyme activities of *Phaseolus vulgaris* cultivars. **Tubitak**, Ankara, v. 34, p. 01-10, 2010. Disponível em: <<https://journals.tubitak.gov.tr/botany/abstract.htm?id=10596>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 1999. 58p. (Embrapa-CNPSo. Circular técnica, 23).

VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 2, p. 259–270, July. 2012. Disponível em: <<https://academic.oup.com/aob/article/110/2/259/2769287>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

WALLER, P., YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Nova Deli. 1st ed. 742p, 2016. Springer International Publishing, Heidelberg.

ARTIGO 2

Trocas gasosas e desempenho agronômico da soja sob estresse
hídrico em solo compactado

RESUMO

A disponibilidade de água acima da camada compactada do solo melhora o desempenho das trocas gasosas da soja. Entretanto, os estudos não abordam as respostas do processo fotossintético da soja em solo compactado. Portanto, objetivou-se com essa pesquisa avaliar o efeito do déficit hídrico nos parâmetros fisiológicos, análise comportamental de crescimento e desempenho da soja em solo compactado com irrigação deficitária. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com delineamento inteiramente casualizado, com os tratamentos distribuídos em parcela subdividida 3×4 , com quatro níveis de massa específica do solo ($1,0 \pm 0,013$; $1,15 \pm 0,022$ e $1,30 \pm 0,035 \text{ kg dm}^{-3}$) e quatro lâminas diárias de irrigação (4,0; 5,0; 6,0 e 7,0 mm) com três repetições. Foram avaliados a taxa de fotossíntese líquida, de transpiração, condutância estomática, concentração intercelular de CO_2 , eficiência no uso de água (EUA), eficiência instantânea no uso da água (EiUA), eficiência instantânea da carboxilação (EiC), a taxa de assimilação líquida (TAL), taxa de crescimento da cultura da parte aérea (TCC_PA) e raiz (TCC_Raiz), taxa de crescimento relativo da parte aérea (TCR_PA) e raiz (TCR_Raiz), fitomassa da parte aérea, fitomassa de raiz nas camadas A, B e C, fitomassa total de raiz e fitomassa de vagens. As lâminas de 4,0 e 5,00 mm proporcionaram maiores EUA e EiUA na soja, mas não em fitomassa seca. Nessas lâminas, a compactação do solo a níveis intermediário aumentou as trocas gasosas e acúmulo de fitomassa seca da parte aérea da soja. A TCC_PA teve comportamento diferente da TCR_PA e TAL dos 45 aos 65 DAE, com pico máximo na lâmina de 7,0 mm no solo compactado, enquanto a TCC e TCR das raízes com menores incrementos em fitomassa aos 65 DAE.

Palavras-chave: Glycine max L., déficit hídrico, massa específica do solo, trocas gasosas, crescimento.

ABSTARCT

The availability of water above the compacted soil layer improves the performance of soybean gas exchanges. However, the studies do not address the responses of the photosynthetic process of soybean in compacted soil. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of water deficit on physiological parameters, behavioral growth analysis and soybean performance on compacted soil under irrigation deficit. The experiment was conducted in the greenhouse with a completely randomized design. The treatments were distributed in 3×4 subdivided plots, with four levels of soil specific mass (1.0 ± 0.013 , 1.15 ± 0.022 and 1.30 ± 0.035 kg dm⁻³) and four daily water depth (4.0, 5.0, 6.0 and 7.0 mm), with three replicates. The rate of liquid photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, the intercellular CO₂ concentration, the efficiency in the use of water, the instantaneous efficiency in the use of water, the instantaneous efficiency of carboxylation, the net assimilation rate, growth rate of shoot and root crop, relative growth rate of shoot and root, phytomass aerial part, root phytomass in layers A, B and C, total root phytomass, and pod phytomass were evaluated. The depths of 4.0 and 5.0 mm provided greater water use efficiency (WUE) and instant water use efficiency (iWUA) in soybean, but not in phytomass dry. In these depths, soil compaction at intermediate levels increased the gas exchange and accumulation of dry phytomass of the aerial part of the soybean. TCC_PA had different behavior from TCR_PA and TAL, ranging from 45 to 65 DAE, with a maximum peak on the 7.0 mm depth in the compacted soil, while TCC and TCR from the roots had smaller phytomass increments at 65 DAE.

Keywords: *Glycine max L.*, water deficit, specific soil mass, gas exchange, growth.

1. INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de água no solo limita a produtividade potencial da cultura da soja (*Glycine max (L.) Merrill*). Para obtenção de máxima produtividade, a soja necessita entre 450 e 800 mm de água a depender da duração do ciclo (EMBRAPA, 2011), sendo que de toda essa água aplicada, apenas uma pequena parte é utilizada para a produção de fitomassa vegetal.

A redução do teor de água do solo altera o crescimento da soja a depender da intensidade e da duração do estresse hídrico em cada estágio fenológico, com plantas pouco desenvolvidas, uma vez que as raízes enviam sinais químicos para a parte aérea, alterando os processos fisiológicos em diferentes vias metabólicas (FARIAS et al., 2007; RAHNAMA et al., 2011).

Assim, a intensidade do estresse hídrico é altamente intensificado com o crescimento e o desenvolvimento da planta, que pode ser minimizado, em escala temporal a níveis intermediário de compactação do solo, melhorando o desempenho fisiológico da soja nas fases de maior necessidade hídrica, que de acordo com Franchini et al. (2009) reduz as perdas de produtividade da soja.

Esses resultados podem ser melhor explicados, sendo que os estudos referentes às respostas fisiológicas da cultura da soja sob déficit hídrico sem compactação do solo são pouco conclusivos ao relatarem alteração da área foliar, crescimento e desenvolvimento da parte aérea e das raízes da soja como relatado por Sincik et al. (2008); Jaleel et al.

(2009); Rhine et al. (2009); Tian et al. (2010); Selim; El-Nady, (2011); Hossain et al. (2014); Nosalewicz; Lipiec, (2014); Machado Júnior et al. (2017).

Contudo, esses autores não avaliam o efeito da compactação do solo; que pode não ser prejudicial em relação a um solo solto e desagregado (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), na regulação das trocas gasosas e, portanto, na relação direta do processo fotossintético, favorecidos pela retenção de água acima da camada compactada, mesmo com lâmina de água deficitária, reduzindo os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja. Nesse sentido, essa redução fornece uma rota potencial para melhorar a eficiência no uso da água e conservar os níveis de água do solo (HEPWORTH et al., 2015).

No entanto, a camada compactada do solo aumenta a resistência do solo à penetração das raízes com redução da porosidade total, contribuindo para a redução do fluxo de água no solo em decorrência da redução da disponibilidade de água (BENGOUGH et al., 2011; TROLDBORG et al., 2013; MORAES et al., 2014; 15; 16) com maior proliferação de raízes secundárias acima da camada compactada (HAMZA; ANDERSON, 2005) o que limita o aprofundamento e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (VALENTINE et al., 2012).

Para tanto, bioporos surgem pelo crescimento das raízes e tornam caminhos preferenciais por serem longos e contínuos, contribuindo para o fluxo de água e ar. Além disso, reduz a resistência do solo à penetração, uma vez que atenua os efeitos da compactação (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; DORNER et al., 2010) alterando a morfologia da fitomassa seca radicular. Essas modificações, resultado do efeito da compactação do solo,

têm sido evidenciadas em estudos na produtividade potencial da soja (BUTTERY et al., 1998; FRANCHINI et al., 2009; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; SATO et al., 2015).

Diante disso e dada a importância para avaliar as trocas gasosas durante as fases de crescimento e de desenvolvimento da soja para identificar o efeito do estresse hídrico em solo compactado, se faz necessário, pesquisas visando à elucidação do comportamento da soja em função desse manejo.

Assim, partiu da hipótese de que as trocas gasosas na cultura da soja são aumentadas em solo compactado e que esse efeito no estresse hídrico pode elucidar o seu comportamento produtivo. Com isso, objetivou com esse estudo avaliar o efeito do estresse hídrico nos parâmetros fisiológicos, análise de crescimento e o desenvolvimento da soja em solo compactado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na área experimental do Núcleo de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras – (UFLA), no período de novembro de 2016 a janeiro de 2017. A temperatura no interior da casa de vegetação variou de $26,9 \pm 2,1^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar de $58,22 \pm 5,1\%$ e a radiação solar de $663,2 \pm 104,3 \text{ W m}^{-2}$.

O solo foi coletado de um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2013) no campus da

UFLA. Em seguida o solo foi seco ao ar e peneirado através de uma malha de 2 mm (TFSA).

Com base na análise química do solo, foi efetuada a calagem para elevar a saturação por bases a 60%, com uso de calcário dolomítico. Após a incubação do solo por 30 dias, com umidade próxima a 60% do volume total de poros (VTP), foi realizada a adubação de plantio, de acordo com as recomendações de Malavolta (1980) com as seguintes aplicações (mg kg^{-1}): 80 de N, 250 de P, 200 de K_2O e 50 de S, em fontes PA Posfato de Amônio Monobásico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), Posfato Monopotássico (KH_2PO_4) e Sulfato de Magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). A adubação com micronutrientes (mg kg^{-1}) consistiu da aplicação de 0,5 de B, 1,5 de Cu, 0,1 de Molibdênio (Mo) e 5,0 de Zinco (Zn), fornecidos na forma de Ácido Bórico (H_3BO_3), Sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Molibdato de Amônio [$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] e Sulfato de Zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Após adubação foram coletadas subamostras de solo para caracterização física e química: 150, 180 e 670 g kg^{-1} de areia, silte e argila, respectivamente; $\text{pH} (\text{H}_2\text{O}) = 6,3$; $\text{H} + \text{Al}^{3+} = 3,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Al}^{3+} = 0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{P} (\text{Mehlich } -1) = 1,13 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K} = 58,0 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 2,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg} = 0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{CTC} = 6,82 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; saturação de bases (V%) = 52 e, matéria orgânica (M.O) = 25,5 g dm^{-3} .

Aos 25 e 40 dias após o plantio (DAP) realizou-se as adubações de cobertura com aplicação de 55 mg de K_2O , utilizando-se a fonte KCl.

Cada parcela experimental foi composta por vaso de 15 dm^3 com 0,296 m de altura e 0,262 m de diâmetro interno na camada compactada, dividido em três camadas, sendo a superior com 0,12 m e inferior com 0,10 m, preenchidos com o solo peneirado com massa específica de 1,00

kg dm⁻³, enquanto a camada compactada foi determinada com base no volume do anel metálico [(5,39 dm² * 0,6 dm) = 3,23 dm³]. Para isto, a TFSA foi umedecida e homogeneizada até atingir a umidade ótima para compactação, conforme metodologia de Santos et al. (2005) para Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), feita com auxílio de uma prensa hidráulica. Para evitar deformações ou rompimento do balde pela compressão do solo na camada compactada, foi colocado um anel metálico (chapa de aço de 0,06 m de altura e 0,012 m de espessura) de iguais dimensões do balde. Para o encaixe entre a camada compactada e a parede do balde, foi realizado um acabamento com impermeabilizante de asfalto frio para evitar o fluxo preferencial da água e crescimento das raízes.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas 3 x 4, sendo os fatores constituídos por três níveis de massa específica do solo (1,0 ± 0,013; 1,15 ± 0,022 e 1,30 ± 0,035) e quatro lâminas de água diária (4,0; 5,0; 6,0 e 7,0) mm com três repetições. Essa compactação foi definida conforme Torres e Saraiva (1999) que consideram crítico a partir de 1,55 kg dm⁻³ em solos de textura franco-argilosos a argilosos.

Antes da semeadura, as sementes de soja, do cultivar RK 8115 IPRO de crescimento indeterminado foram tratadas com piraclostrobina + tiofanato metílico + fipronil na dose de 2 mL p.c kg⁻¹ de semente, inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes SEMIA 5079 e 5080 (5,0 x 10⁹ de células viáveis mL⁻¹), na dose de 4 mL p.c. kg⁻¹ de semente. A semeadura foi realizada no dia 15 de novembro de 2016, sendo distribuídas 5 sementes por vaso a 2 cm de profundidade e, 15 dias após a

semeadura, fez-se o desbaste, deixando três plântulas. Visando manter a sanidade das plantas foram aplicados de forma preventiva inseticida e fungicida recomendados para a cultura.

A partir dos 35 dias após emergência (DAE), antes lâmina diária de 3 mm até aos 15 dias após plantio (DAP) e, a partir, 4 mm até 35 DAE, a reposição da irrigação diária pré-estabelecida, foi mantida manualmente das 9 às 10 horas. A lâmina diária de 4,0 mm é metade da crítica exigida pela soja nas fases de maior demanda transpirativa entre florescimento e enchimento de grãos em condições normais de cultivo.

Para a determinação das trocas gasosas utilizou-se o analisador portátil de gás por infravermelho (IRGA - LICOR 6400, LiCOR, Nebraska, USA), realizadas entre 9 e 11 horas aos 45, 55, 65 e 75 DAE, em duas folhas por planta completamente expandidas, fotossinteticamente ativas e sem lesões, localizadas no terceiro trifólio de cima para baixo, em dias de céu claro. A radiação fotossinteticamente ativa foi padronizada em luz saturante artificial de $1.000 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Obteve-se a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E), a concentração intercelular de CO_2 (C_i) e a taxa de fotossíntese líquida (A). De posse desses dados, calculou-se a eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) (A/C_i), eficiência instantânea no uso da água (E_iUA) (A/g_s) e eficiência instantânea no uso da água (EUA) (A/E).

Após a leitura de trocas gasosas, as plantas foram seccionadas na base do colo e foram levadas para o laboratório e foi determinada a área foliar no medidor de área foliar LI-3100 Área Meter (LI-COR Inc. Lincoln, NE, EUA). De posse da área foliar, determinou-se a área total de folhas da amostra e, posteriormente, o índice de área foliar (IAF)

correspondente (cm^2 de folhas / área do vaso). Posteriormente, caules, folhas e vagens foram secos em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 h para determinação da fitomassa em balança de precisão ($\pm 0,001$).

Em seguida os vasos foram destorroados e determinou-se a fitomassa seca do sistema radicular na camada superior (A), na camada compactada (B) e na camada inferior (C). A fitomassa seca de raízes foi seca em estufa de circulação forçada de ar a 65°C , durante 72 h para determinação com balança de precisão ($\pm 0,001$).

A taxa de crescimento da cultura (TCC) da parte aérea e raiz, em $\text{g planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, foi calculada pela equação $\text{TCC} = (\text{MS}_{t_2} - \text{MS}_{t_1}) / (t_2 - t_1)$, em que: MS_{t_2} é a fitomassa seca total atual (g planta^{-1}); MS_{t_1} é a fitomassa seca total inicial (g planta^{-1}); $t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo entre duas coletas. A taxa de crescimento relativo (TCR) da parte aérea e raiz, em $\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, foi calculada pela equação $\text{TCR} = (\ln \text{MS}_{t_2} - \ln \text{MS}_{t_1}) / (t_2 - t_1)$, em que: MS_{t_1} e MS_{t_2} representam a fitomassa seca nos tempos t_1 e t_2 . A TAL, em $\text{g planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, foi calculada pela fórmula $\text{TAL} = [(\text{MS}_{t_2} - \text{MS}_{t_1}) \times (\ln \text{IAF}_2 - \ln \text{IAF}_1)] / [(\text{IAF}_2 - \text{IAF}_1) \times (t_2 - t_1)]$, em que IAF_2 é o índice de área foliar total atual (cm^2); IAF_1 é o índice de área foliar total inicial da parte aérea (cm^2). A fitomassa seca de vagens (FSV), em g planta^{-1} , foi calculada aos 55, 65 e 75 DAE.

Os dados foram submetidos para comparação dos erros padrão da média. Para análise de crescimento, não é recomendado a fazer a análise de variância, por não obedecer às suas pressuposições básicas (BANZATTO; KRONKA, 1989). As médias, erros padrão e os gráficos

comportamentais foram realizados utilizando o programa estatístico R 3.2.3 (RDCT, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Independentemente da massa específica do solo, a condutância estomática (gs), a taxa de transpiração (E) e a taxa de fotossíntese líquida (A) foram alteradas significativamente pelas lâminas de água diária aplicada, reduzidas até aos 75 DAE, com maiores valores aos 45 DAE (Figura 1). Nessa fase, a gs foi aproximadamente 4,3, 2,2 e 1,99 vezes superior na lâmina de 7,0 mm comparado a lâmina de 4,0 mm para as massas específicas de $1,00 \text{ kg dm}^{-3}$, $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente. Estes resultados corroboram com os obtidos por Hossain et al. (2014) que verificaram comportamento semelhante em diferentes cultivares de soja com menores valores sob déficit hídrico sem compactação.

Esses comportamentos da E (Figuras 1 D - F) da soja no início do desenvolvimento ocorrem em função da baixa demanda transpirativa e da boa disponibilidade de água no solo, aumentando, assim, o potencial de água no xilema. No entanto, à medida que a soja cresce e se desenvolve, aumenta a demanda transpirativa no processo fotossintético, que acaba por compensar na diferença de E em função das maiores lâminas e massa específica do solo até aos 65 DAE, enquanto a gs só até aos 55 DAE, resultando, a partir deste período, em valores semelhantes, a se manter estável e mínimo até 75 DAE.

A redução da partição de água para atmosfera pelo fechamento estomático é uma das respostas das plantas para manter um alto potencial hídrico foliar enquanto o déficit hídrico se intensifica (OHASHI et al., 2006). Com isso, a condutância estomática provoca a redução do influxo intercelular de CO_2 , e, conseqüentemente, na taxa fotossintética (A) (HONG-BO et al., 2008) (Figuras 1 G – I). Contudo, não reduz a ponto de causar efeitos deletérios aos fotossistemas sob déficit hídrico severo. Isso se deve a cultivares de soja de crescimento do tipo indeterminado possuir maior densidade estomática e, por consequência maior g_s (TANAKA; SHIRAIWA, 2009).

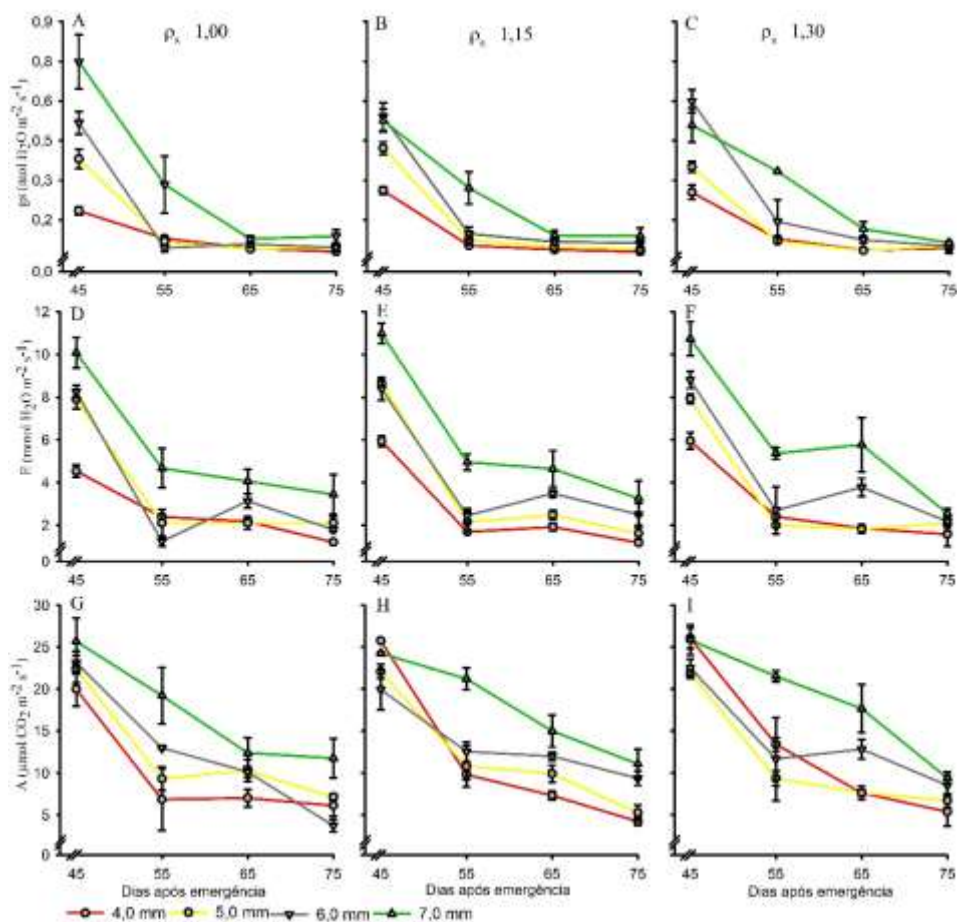


Figura 1. Condutância estomática (g_s) (A, B, C), taxa de transpiração (E) (D, E, F) e taxa de fotossíntese líquida (A) (G, H, I) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017. ρ_s : Massa específica do solo.

As maiores eficiências no uso da água (EUA) e instantânea no uso da água (EiUA) foram verificadas nas menores lâminas. Todavia, essa diferença foi significativa até os 55 DAE para EUA, e até aos 65 DAE para EiUA, sendo que, com exceção da lâmina de 7,0 mm, as demais lâminas

proporcionaram EUA acima de $4 \mu\text{mol CO}_2 (\text{mmol H}_2\text{O})^{-1}$ (Figuras 2A, B, C) e EiUA de $170 \mu\text{mol CO}_2 (\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol ar}^{-1})^{-1}$ (Figuras 2 D - F).

Assim, as lâminas diárias de irrigação refletiram na taxa de assimilação líquida (TAL) ao longo do ciclo da soja, com comportamento diferenciado em, aproximadamente, 1,7, 2,2 e 1,9 vezes superior aos 45 DAE na lâmina diária de 7,0 mm, comparada a lâmina de 4,0 mm, independentemente da massa específica do solo (Figuras 2 G - I). Isso se deve aos maiores ganhos em peso com a expansão da superfície foliar nas maiores lâminas de água em decorrência do aumento da g_s , E e, conseqüentemente, da taxa de fotossíntese líquida.

Para a fitomassa seca das plantas, verificou-se acúmulo duas vezes menor na lâmina 4,0 mm em solo sem compactação, comparada a lâmina de 7 mm (Figuras 2 J - L). Esses resultados corroboram com os de Machado Júnior et al. (2017) em cultivar de soja de crescimento indeterminado dos 44 aos 57 DAE sob déficit hídrico. A dinâmica no acúmulo de fitomassa da parte aérea da soja, seguiu padrão característico de culturas anuais, onde o acúmulo foi rápido a partir dos 45 DAE, a exceção na lâmina de 4,0 mm, proporcionado, pela menor área e fitomassa foliar, associado à baixa g_s , E , TAL no decorrer do tempo, permitindo menor assimilação de CO_2 , o que fez a soja reduzir a capacidade de crescer e desenvolver.

Esses resultados evidenciam claramente que a quantidade de CO_2 assimilado por unidade de água transpirada ou pela condutância estomática em cada época avaliada, aumenta em decorrência do déficit hídrico. No entanto, não resultou em maior TAL e incremento de fitomassa da parte aérea.

Portanto, ficou evidente a capacidade da soja nas lâminas intermediárias em solo com massa específica de até $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$ em melhorar na a produção de fitomassa da parte aérea. Isso ocorre em consequência da elevação da taxa de transpiração e fotossíntese líquida por serem altamente correlacionados, mesmo com lâmina deficitária pela soja.

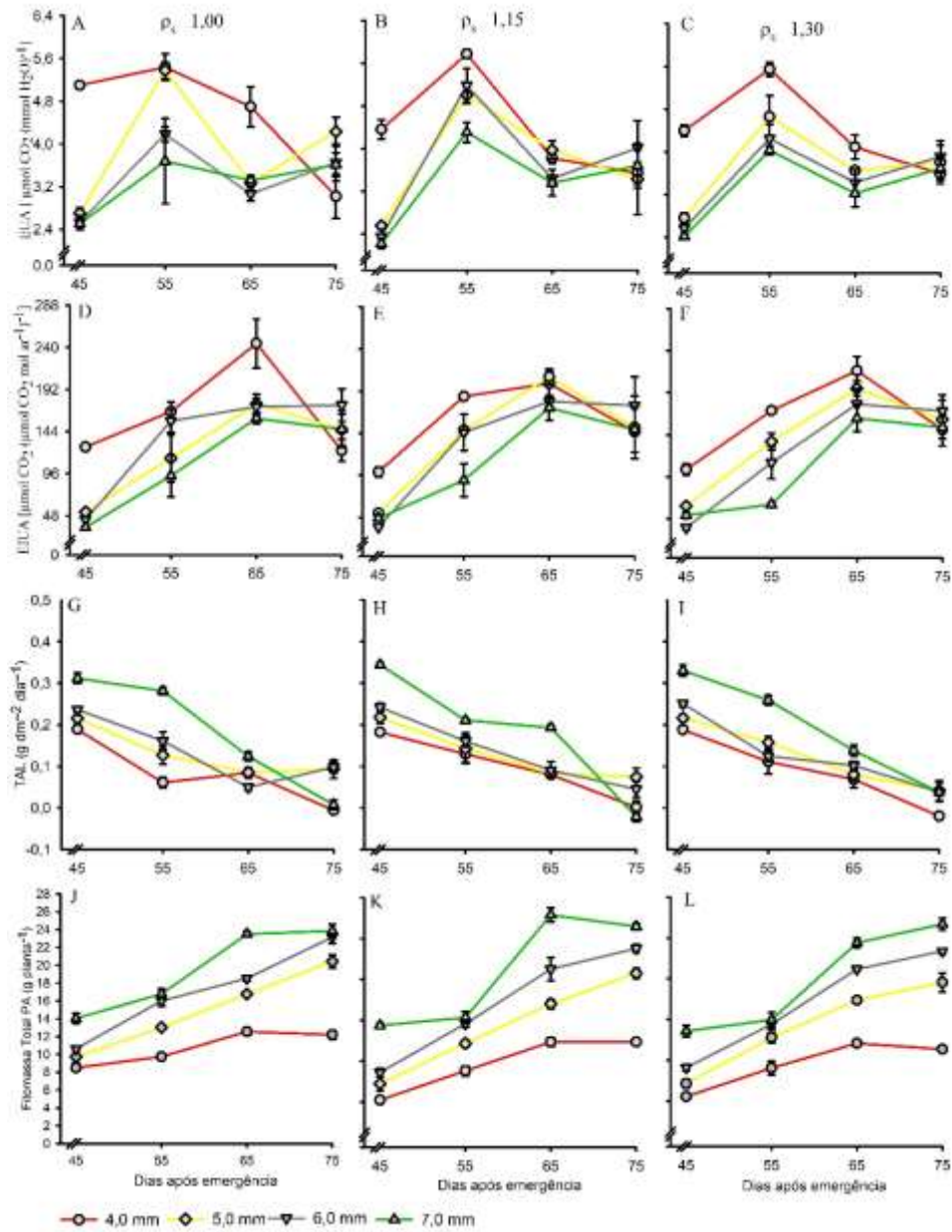


Figura 2. Eficiência do uso de água (EUA) (A, B, C), eficiência instantânea do uso de água (EiUA) (D, E, F), taxa de assimilação líquida (TAL) (G, H, I) e fitomassa parte aérea (fitomassa Total PA) (J, K, L) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017. ρ_s : Massa específica do solo.

Para a taxa de crescimento e crescimento relativo da parte aérea (TCC e TCR_PA) (Figuras 3 A - F), verificou-se menores valores nas lâminas de água diária de 4,0 e 5,0 mm, com pico máximo, aos 65 e 45 DAE, respectivamente, principalmente na lâmina de 7,0 mm, independentemente se havia compactação do solo. Comportamento semelhante, com posterior declínio, observado por Petter et al. (2016) em cultivares de soja sob diferentes densidades de plantio. Diferente da raiz (TCC_Raiz e TCR_Raiz) (Figuras 3 G - L), com pico máximo de incrementos em fitomassa aos 55 DAE, em decorrência do menor acúmulo na parte aérea. Essa resposta foi estratégia da soja, com a redução da TAL, atribuída ao direcionamento gradual da alocação de fotoassimilados para tecidos não assimilatórios (raízes), o que limitou o crescimento da parte aérea, uma vez que a composição e a capacidade fotossintética dos tecidos assimilatórios e a expansão foliar foram reduzidos.

A TCC, assim como a TCR permite verificar o padrão de crescimento da soja no tempo e, conseqüentemente, o efeito do estresse hídrico no incremento de fitomassa. Com isso, fica evidente que a soja, a partir dos 45 DAE, nas lâminas de 4,0 a 5,0 mm, tende a reduzir a fotossíntese líquida e formar menos fitomassa seca a partir da matéria preexistente e a priorizar as raízes. Todavia, com o aumento da disponibilidade de água no solo há um incremento da TCR em função, principalmente, da maior assimilação de CO₂.

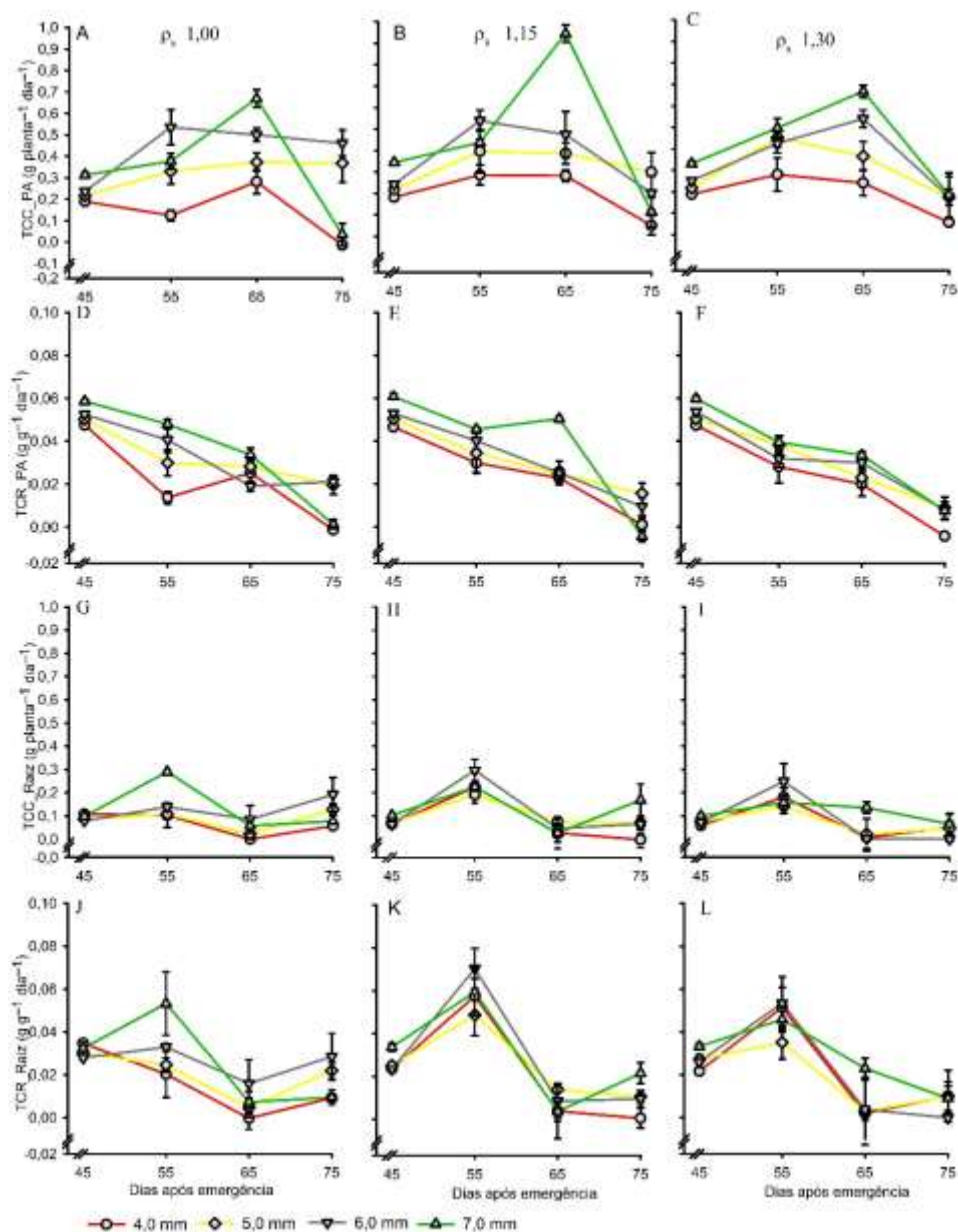


Figura 3. Taxa de crescimento da parte aérea (TCC_PA) (A, B, C), taxa de crescimento relativo da parte aérea (TCR_PA) (D, E, F), taxa de crescimento das raízes (TCC_Raiz) (G, H, I) e taxa de crescimento relativo das raízes (TCR_Raiz) (L, K, L) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017. ρ_s : Massa específica do solo.

Independente da lâmina diária aplicada, o aumento da massa específica do solo proporcionou aumento da fitomassa de raiz na camada acima da compactada ao longo do ciclo da soja, com valores superiores nas maiores lâminas (Figuras 4 A - C). No entanto, comportamento inverso, com redução da fitomassa das raízes, ocorreu a partir da camada compactada (B) (Figuras 4 D - I). Esses resultados corroboram com Sato et al. (2015) que obtiveram redução da massa seca das raízes da soja em solo argiloso e muito argiloso com aumento da massa específica do solo. Isso está relacionado ao aumento da resistência à penetração das raízes em solo compactado associado a menor conteúdo de água (BENGOUGH et al., 2011; HE et al., 2017) a reduzir o aprofundamento do sistema radicular, a proliferação e distribuição das raízes secundárias.

Todavia, o efeito da compactação do solo foi reduzido na massa específica de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$ com aumento da lâmina aplicada, o que levou ao aumento da fitomassa das raízes na camada (C). Tal fato é beneficiado, pela formação de bioporos pelas raízes, que são caminho preferencial para o fluxo de água e para o crescimento das raízes, atenuando os efeitos da compactação do solo (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; DORNER et al., 2010; BENGOUGH et al., 2012).

Assim como na EUA e EiUA, também deve-se ter cautela ao avaliar a fitomassa total de raízes (Figuras 4 J - L) como parâmetro de crescimento e de desenvolvimento em solo compactado, pois os resultados evidenciam que na camada (A), na massa específica de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$, a fitomassa das raízes é superior a 65%. Com isso, o menor acúmulo de fitomassa seca nas menores lâminas de água aplicada em

solo compactado mascara o real efeito da compactação do solo, o que leva ao erro nas interpretações sobre o manejo nessas condições de cultivo.

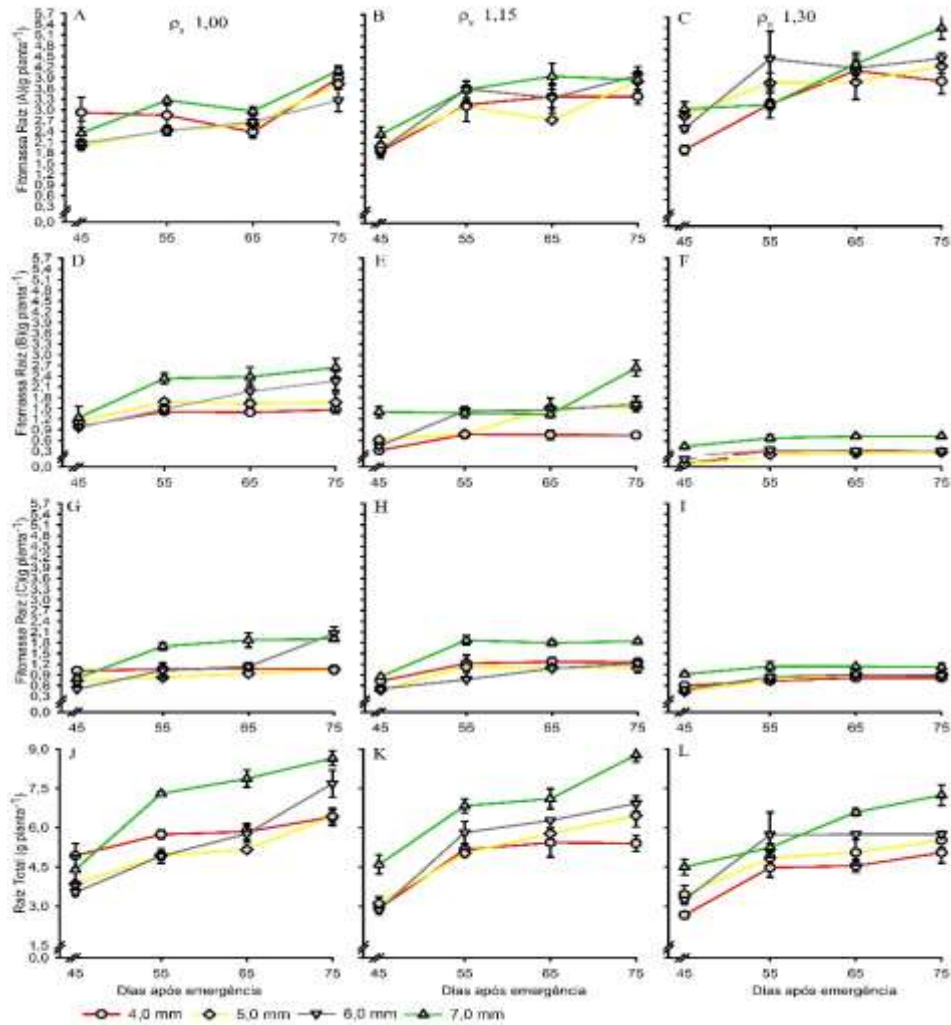


Figura 4. Fitomassa seca das raízes da camada (A) (fitomassa Raiz) (A, B, C), fitomassa seca das raízes na camada compactada (B) (fitomassa Raiz) (D, E, F), fitomassa seca das raízes da camada (C) (fitomassa Raiz) (G, H, I) e fitomassa seca total de raiz (Raiz total) (J, K, L) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017. ρ_s : Massa específica do solo.

O déficit hídrico severo na soja associado à baixa disponibilidade de água no solo com maior EUA e EiUA, não refletiu em maior acúmulo de fitomassa seca das vagens com maiores valores observados na lâmina de água a partir de 5 mm em todas as massas específicas avaliadas (Figura 5).

O menor acúmulo foi observado na lâmina de 4,0 mm, aproximadamente de 102%, 58% e 53%, comparada a lâmina de 5,0 mm em cada massa específica do solo aos 75 DAE. Esses resultados corroboram em parte com os de Catuchi et al. (2012) que detectaram redução na produção de grãos, a níveis severos de umidade do solo durante 25 dias na cultura da soja na formação de vagem. Assim como Brededan e Egli (2003) que também verificaram redução sob déficit hídrico severo por 13 dias na formação de vagem.

No entanto, difere em parte dos resultados obtidos por Machado Júnior et al. (2017) que não observaram diferenças significantes para o rendimento de grãos nos cultivares de soja sob estresse hídrico dos 44 aos 57 DAE. E também com os resultados de Li et al. (2013) mesmo com o aumento de CO₂ elevando a taxa de fotossíntese líquida, a produção de fitomassa e EUA em plantas estressadas, uma vez que a alocação de fotoassimilados para as vagens não foi aumentada.

Esses resultados da fitomassa seca das vagens, apoiados pelo desempenho agrônômico e fisiológico, refletiram no maior incremento de fitomassa das vagens, mesmo com baixa disponibilidade de água nos tecidos foliares na lâmina de 5,0 mm. No entanto, a partir da lâmina de 5,0 mm, não houve diferença com a compactação do solo, devido à alta plasticidade fenotípica da raiz e parte aérea da soja, uma vez que o

aumento da massa específica do solo elevou o nível de transpiração sem que a fotossíntese e a produção de fitomassa fossem comprometidas.

Portanto, não se pode afirmar, somente, apoiado pelo aumento da massa específica do solo, reduções proporcionais de fitomassa da parte aérea e de raiz da soja.

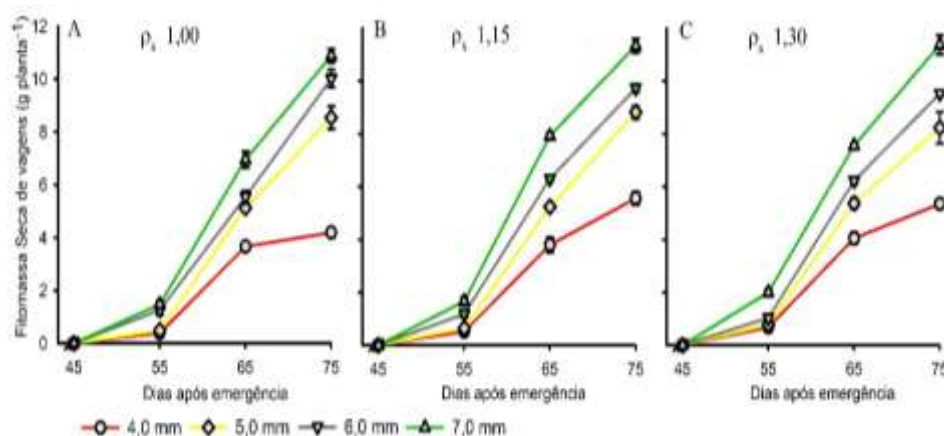


Figura 5. Fitomassa seca das vagens (FSV) (A, B, C) da soja submetida a diferentes massas específicas do solo e lâminas diárias de água, com respectivo erro padrão, em casa de vegetação, 2016/2017. ρ_s : Massa específica do solo.

4. CONCLUSÃO

As lâminas diárias de 4,0 e 5,00 mm proporcionaram maiores EUA e EiUA, no entanto, não refletiram em acúmulo de fitomassa na soja. Nessas lâminas, a compactação do solo a níveis intermediários proporcionou o aumento da condutância estomática, da taxa de transpiração e da fotossíntese líquida e, conseqüentemente, no acúmulo de fitomassa seca da parte aérea na cultura da soja durante o ciclo.

A TCC_PA apresentou comportamento diferente da TCR_PA e TAL dos 45 aos 65 DAE, com pico máximo na lâmina de 7,0 mm no solo compactado, enquanto a TCC e TCR das raízes apresentaram menores incrementos em fitomassa aos 65 DAE.

5. REFERÊNCIAS

BANZATTO, D. A. e KRONKA, S. N. (1989). **Experimentação agrícola**. Jaboticabal, UNESP. 247p.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21118824>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BENGOUGH, A. G. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: So what happens in field soil? **Plant and Soil**, The Hague, v. 360, n. 1–2, p. 15–18, 2012.

BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, Madison, v.43, n. 6, p.2083-2088, jan. 2003. Disponível em:<<https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/43/6/2083>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BUTTERY, B. R.; TAN, C. S.; DRURY, C. F.; PARK, S. J.; ARMSTRONG, R. J.; PARK, K. Y. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. **Canadian Journal of Plant Science**. Ottawa, v. 78, n. 4, 571–576, 1998. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.4141/P97-132>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030110000638>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.; BARBOSA, A. M. SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n. 4, p. 519-527, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n4/47n04a07.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

DORNER, J.; SANDOVAL, P.; DEC. D. The role of soil structure on the pore functionality of an ultisol. **J. Soil Sci. Plant Nutr**, Temuco, v.10, n.4, 495-508, 2010. Disponível em: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-95162010000200009&script=sci_arttext&tlng=en>. Acesso em: 28 jun. 2018.

EMPRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, p. 353, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, p. 264, 2011.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Documentos, 314. Londrina: Embrapa Soja, 2009. p. 39.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n. 2, p.121-145, jun. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704001849>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

HE, J.; JIN, Y.; DU, Y. L.; WANG, T.; TURNER, N. C.; YANG, R. P.; SIDDIQUE, K. H. M.; LI, F. M. Genotypic Variation in Yield, Yield Components, Root Morphology and Architecture, in Soybean in Relation to Water and Phosphorus Supply. **Front Plant Sci**. Lausanne, v. 8, p. 1499, 2017. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.01499/full>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

HEPWORTH, C.; DOHENY-ADAMS, T. D.; HUNT, L.; CAMERON, D. D.; GRAY, J. E. Manipulating stomatal density enhances drought tolerance without deleterious effect on nutrient uptake. **New Phytologist**, Oxford, v. 208, n. 2, 336–341, oct. 2015. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.13598>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

HOSSAIN, M. M.; HOSSAIN, M. M.; LIU, X.; QI, X.; LAM, H. M.; ZHANG, J. Differences between soybean genotypes in physiological response to sequential soil drying and rewetting. **The Crop Journal**, Amsterdam, v. 2, n. 6, 366-380, dec. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514114000737>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

HONG-BO, S.; SHAO, H. B.; CHU, L. Y.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. X. Water deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, Paris, v. 331, n. 3, p. 215-225, mar. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631069108000048>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

JALEEL, C. A. MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R.

Drought stress in Plants: A review on Morphological Characteristics and Pigments Composition. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.11, n.1, p. 100 – 105, 2009. Disponível em: <
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.323.1932&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

LI, D. et al. Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] under drought stress. **Agricultural Water Management**, Auckland, n.129, p.105-112, 2013. Disponível em: <>. Acesso em: 28 jun. 2018.

MACHADO JÚNIOR, C. S.; MACHADO JÚNIOR, C. S.; DA SILVA, C. R.; SANCHES, M. C.; HAMAWAKI, O. T.; DE SOUSA, L. B. Physiologic parameters of soybean of determinate and indeterminate growth habit subjected to levels of soil moisture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.6, p.419-425, 2017. Disponível em:<
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2017000600419>. Acesso em: 23 jun. 2018.

MORAES, M. T.; MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. D. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288– 298, jan./fev. 2014. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832014000100029&script=sci_arttext>. Acesso em: 28 jun. 2018.

MORAES, M. T. de.; BERTOLLO, A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.; LEVIEN, R.; MAZURANA, M. SPD e a disponibilidade hídrica em solos argilosos. **Granja**, Porto Alegre, v. 791, n. 11, p. 58–59, 2015.

MORAES, M. T. de. DEBIASIB, H.; CARLESSO, R.;FRANCHINI, J. C. SILVA, V. R. DA; LUZ, F. B. DA. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198715001713>>. Acesso em: 23 jun. 2018.

NOSALEWICZ, A.; LIPIEC, J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 375, n. 1– 2, p. 229–240, feb. 2014. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1961-0>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 50, n.1, p.138-141, 2006. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-005-0089-3>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

PETTER, F. A.; DA SILVA, J. A.; ZUFFO, A. M.; ANDRADE, F. R.; PACHECO, L. P.; DE ALMEIDA, F. A. Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 2, p.173-183, 2016. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/brag/2016nahead/0006-8705-brag-1678-4499447.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

R Development Core Team - RDCT. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: the R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RAHNAMA, A.; MUNNS, R.; POUSTINI, K.; WATT, M. A screening method to identify genetic variation in root growth responses to a salinity gradient. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n.1, p. 69–77, jan. 2011. Disponível em: < <https://academic.oup.com/jxb/article/62/1/69/516093>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, p. 49–134, 2007.

RHINE, M. D. STEVENS, G.; SHANNON, G.; WRATHER, A.; SLEPER, D. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. **Irrigation science**. (on-line, July 2009). Berlin, Springer-Verlag, v. 28, n. 2, p. 134-142, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-009-0168-x>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; OLIVEIRA, P. D. DE; RODRIGUES S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**, Lublin, v. 29, p. 441- 447, 2015. Disponível em:<<https://content.sciendo.com/view/journals/intag/29/4/article-p441.xml>>. Acesso em: em: 26 jun. 2018.

SANTOS, G. A.; DIAS JÚNIOR, M. D. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 740- 752, 2005.

SELIM, A. F. H.; EL-NADY, M. F. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. **Acta Astronautica**, Oxford, v. 69, n. 7-8, p. 387-396, sept./ouc. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576511001640>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

SINCIK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BÜYÜKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GÖKSOY, A. T. Deficit irrigation of soya bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Madison , v.194, p.200- 205, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1439-037X.2008.00307.x>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

TANAKA, Y.; SHIRAIWA, T. Steam growth habit affects leaf morphology and gas exchange traits in soybean. **Annals of Botany**, Oxford, v.104, n. 7 p.1293-1299, dec. 2009. Disponível em: <<https://academic.oup.com/aob/article/104/7/1293/165101>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 1999. 58p. (EmbrapaCNPSO. Circular técnica, 23).

TIAN, Z. WANG, X.; LEE, R.; LI, Y.; SPECHT, J. E.; NELSON, R. L.; MCCLEAN, P. E.; QIU, L.; MA, J. Artificial selection for determinate growth habit in soybean. **PNAS**, Washington, v.107, n.19, p.8563-8568, 2010. Disponível em: < <http://www.pnas.org/content/107/19/8563.short>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

TROLDBORG, M.; AALDERS, I.; TOWERS, W.; HALLETT, P. D.; MCKENZIE, B. M.; BENGOUGH, A. G.; LILLY, A.; BALL, B. C.; HOUGH, R. L. Application of Bayesian Belief Networks to quantify and map areas at risk to soil threats: Using soil compaction as an example. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 132, p. 56–68, aug. 2013. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198713000925>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 2, p. 259–270, July. 2012. Disponível em: < <https://academic.oup.com/aob/article/110/2/259/2769287>>. Acesso em: 26 jun. 2018.