

## EFICIÊNCIA RELATIVA DE UTILIZAÇÃO DA ÁGUA PELA CULTURA DO FEIJOEIRO, EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE E DENSIDADE DO SOLO

*Relative efficiency of water use by bean culture, in different conditions of soil moisture and density*Anderson Takashi Hara<sup>1\*</sup>, Antônio Carlos Andrade Gonçalves<sup>2</sup>, Heraldo Takao Hashiguti<sup>3</sup>, Roberto Rezende<sup>4</sup>, Alex Elpidio dos Santos<sup>5</sup>, André Maller<sup>6</sup><sup>1</sup> Pós-Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia; UEM; e-mail: [haratakashi@hotmail.com](mailto:haratakashi@hotmail.com)<sup>2</sup> Professor; Departamento de Agronomia; UEM; e-mail: [acagoncalves@uem.br](mailto:acagoncalves@uem.br)<sup>3</sup> Professor; Departamento de Agronomia; FATECIE; e-mail: [htakaoh@hotmail.com](mailto:htakaoh@hotmail.com)<sup>4</sup> Professor; Departamento de Agronomia; UEM; e-mail: [rrezende@uem.br](mailto:rrezende@uem.br)<sup>5</sup> Doutorando; PGA-UEM; e-mail: [alexelpidio@hotmail.com](mailto:alexelpidio@hotmail.com)<sup>6</sup> Professor; Departamento de Agronomia; UNEMAT; e-mail: [anmaller@hotmail.com](mailto:anmaller@hotmail.com)

\*Autor para correspondência

Artigo enviado em 20/06/2017, aceito em 20/03/2018 e publicado em 17/07/2018.

**Resumo** – Objetivou-se com este estudo avaliar o efeito das condições físico hídricas do solo na eficiência relativa de utilização da água pela cultura de feijão. A unidade experimental foi constituída por um vaso plástico contendo NITOSSOLO Vermelho distroférrico, com composição granulométrica expressa pelos teores: 175 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 735 g kg<sup>-1</sup> de argila. O experimento foi conduzido em ambiente protegido adotando-se um delineamento inteiramente casualizado em esquema de arranjo de tratamentos fatorial, 5 x 5, com três repetições e trabalhando com os fatores umidade e densidade do solo. Os níveis de umidade do solo foram 0,34; 0,32; 0,30; 0,28 e 0,26 kg kg<sup>-1</sup>. Os níveis de densidade do solo foram 0,96; 1,01; 1,06; 1,10 e 1,18 Mg m<sup>-3</sup>. Os resultados evidenciam que, em média, existe uma relação direta da umidade do solo com a eficiência relativa na utilização da água. Considerando as interações da umidade do solo com a densidade do solo, a menor umidade do solo pode reduzir a variável dependente na condição de maior densidade do solo.

**Palavras-Chave** – água disponível, compactação do solo, feijão.

**Abstract** – The objective of this study was to evaluate the effect of soil water physical conditions on the relative water utilization efficiency of bean culture. The experimental unit was composed of a plastic vessel containing NITOSSOLO Red dystroferic, with granulometric composition expressed as: 175 g kg<sup>-1</sup> of sand, 90 g kg<sup>-1</sup> of silt and 735 g kg<sup>-1</sup> of clay. The experiment was conducted in a protected environment using a completely randomized design in a 5 x 5 factorial treatment arrangement with three replicates and working with soil moisture and density factors. Soil moisture levels were 0,34; 0,32; 0,30; 0,28 and 0,26 kg kg<sup>-1</sup>. Soil density levels were 0,96; 1,01; 1,06; 1,10 and 1,18 Mg m<sup>-3</sup>. The results show that, on average, there is a direct relationship between soil moisture and relative efficiency in water use. However, considering the interactions of soil moisture with soil density, the lower soil moisture can reduce the dependent variable in the condition of higher soil density.

**Keywords** – available water, compaction of soil, beans.

## INTRODUÇÃO

Desde os povos sumérios, o homem tem procurado otimizar a utilização da água, e contornar os efeitos do déficit hídrico sobre as plantas cultivadas (SANTOS; CARLESSO, 1998). Com o fornecimento de água adequado tornou possível o manejo e otimização deste fator de produção, buscando-se o atendimento aos critérios de natureza técnica e econômica, visando promover uma adequada condição de desenvolvimento e produção vegetal (CARVALHO et al., 2014a).

O adequado suprimento da água para a cultura permite que o estresse hídrico seja evitado

durante o seu ciclo (DE SOUZA et al., 2014) ou que, pelo menos, ele se estabeleça fora do período crítico da cultura, sendo o florescimento para o feijoeiro (AGUIAR et al., 2008). Isto assegura que se expresse o potencial genético da cultura, em termos de produtividade, sem os efeitos deletérios do fator de estresse.

A cultura do feijoeiro apresenta sensibilidade ao déficit hídrico (FERNANDES et al., 2015; TORRES et al., 2013), o que pode comprometer substancialmente a produção em condições adversas em termo de disponibilidade de água. Em termos médios, a produtividade de feijão no Brasil em áreas irrigadas é acima de 3000 kg ha<sup>-1</sup> (CARVALHO et al.,

2014b), enquanto a média das áreas não irrigadas é de 950 kg ha<sup>-1</sup> (STONE et al., 2013).

Em função disto, o valor agregado à produção justifica a utilização da técnica da irrigação (MONTANARI et al., 2010) sobretudo por ser uma cultura de grande importância para o Brasil, sendo cultivada em todo o país (TORRES et al., 2013).

Apesar da relevância da irrigação nesta cultura (LOCATELLI et al., 2016; MORAIS et al., 2017), o manejo da água é feito, geralmente sem critérios técnicos em função do desconhecimento dos mesmos. Esta prática pode levar a cenários que podem expressar o afastamento das condições ótimas do ponto de vista agrônomo e também econômico. Isto pode acarretar problemas ambientais no futuro, uma vez que a restrição de oferta dos recursos hídricos é crescente em diversas regiões no país, o que promove uma pressão crescente sobre a atividade de produção vegetal. A pressão de órgãos públicos e da sociedade sobre os agricultores, no sentido de se adotar sistemas mais eficientes de aplicação de água, é crescente (CUNHA et al., 2008).

O manejo adequado dos recursos hídricos impõe que a água deva ser utilizada no processo de irrigação, visando produção agrícola ótima, com elevado nível de eficiência. Esta eficiência é expressa pela relação entre a quantidade produzida e a quantidade de água consumida no processo de evapotranspiração das plantas cultivadas (SILVA et al., 2013). Para se manter a umidade do solo em níveis adequados, evitando-se perdas de água e, consequentemente, a redução da eficiência de irrigação, tradicionalmente procura-se manter a umidade do solo na faixa de água disponível, entre a capacidade de campo e o ponto de murcha (TORMENA et al., 1999).

Sistemas produtivos que preconizam um fornecimento de água contínuo, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo, muitas vezes não garantem um máximo aproveitamento desse fator de produção, uma vez que a porosidade de aeração pode se tornar limitante para a adequada atividade metabólica do sistema radicular. (TORMENA et al., 1999; ROMERO et al., 2014).

Um déficit de aeração no solo promove condições inapropriadas para um bom funcionamento das atividades metabólicas do sistema radicular, promovendo a inibição na absorção e transporte absorção ativa de íons e redução da taxa de crescimento da raiz (BEUTLER et al., 2007).

Por outro lado, restrições hídricas extremas promove a redução dos valores de U, e essa diminuição pode promover condições restritivas ao desenvolvimento do sistema radicular, por meio de um aumento da resistência à penetração radicular (WATANABE et al., 2000) ou também pelas injúrias aos tecidos sensíveis à falta de água, acarretada pela

insuficiência do fluxo de água do solo para o sistema radicular (COLLARES et al. 2008).

A oferta de água no solo para as plantas depende dos fluxos de água e de gases no solo, os quais são diretamente afetados por um conjunto de variáveis físicas hídricas (CASTRO et al., 2010). O conteúdo de água no solo está diretamente relacionado com a sua condutividade hidráulica, assim como com a porosidade livre de água, por meio da qual as trocas gasosas se estabelecem. A condição estrutural do solo pode interferir expressivamente na dinâmica da água e de gases no solo, pela redução da macroporosidade decorrente de compactação (SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014) causada por agentes antrópicos pode restringir fluxos de água (OLIVEIRA et al., 2013) e de gases, no processo de infiltração acarretando em redução da evapotranspiração (SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014). No entanto, sabe-se que a compactação, a qual pode ser expressa pelos valores de densidade do solo (Ds), pode também promover a elevação dos valores de resistência do solo à penetração do sistema radicular (MAZURANA et al., 2013, SILVA et al., 2014, ORTIGARA et al., 2014), redução dos valores de condutividade hidráulica saturada (ROMERO et al., 2014), porosidade de aeração (KLEIN; LIBARDI, 2002) e macroporosidade (SUZUKI et al., 2007) que pode restringir o desenvolvimento e produção vegetal em níveis adequados.

Em função das considerações apresentadas, formulou-se a hipótese de que os fatores adversos em termos de oferta de água e de elevação da densidade do solo podem interagir entre si e promover condições adversas ao desenvolvimento e produção vegetal, o que pode implicar em redução da eficiência de utilização da água pela cultura. Conforme o exposto, este trabalho teve como objetivos avaliar esta hipótese, estudando a relação entre a eficiência de utilização da água e os níveis de umidade do solo e de densidade do solo, para as condições avaliadas.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido no Centro Técnico de Irrigação (CTI) do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá (UEM), em Maringá, PR, 23°25'S e 51°57'O e 542 m de altitude média.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, em esquema de arranjo de tratamentos fatorial 5x5, com 3 repetições. Os fatores são umidades do solo gravimétrico (U) e densidade do solo (Ds), compondo um total de 75 unidades experimentais.

A unidade experimental foi composta de vasos de material plástico, de altura de 0,25 m; diâmetro superior de 0,30 m e diâmetro inferior de 0,23 m; com volume total de 0,0095 m<sup>3</sup>, utilizando

terra fina seca ao ar de um NITOSSOLO Vermelho distroférico. A composição granulométrica do solo utilizada apresenta os seguintes teores: 175 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 735 g kg<sup>-1</sup> de argila.

Os níveis de densidade do solo adotados foram: 0,96; 1,01; 1,06; 1,10; 1,18 Mg m<sup>-3</sup>. Para obter o valor de Ds desejada em cada unidade experimental, cada vaso foi submetido a uma determinada energia de compactação, padronizado para o correspondente nível de Ds desejado. No processo de compactação utilizou-se a metodologia da queda livre de um martelo, descrito por BEUTLER; CENTURION (2003) e CENTURION et al. (2006), em diferentes alturas, com variação do número de quedas, resultando em diferentes quantidades de movimento.

Considerando que os valores de 0,34 e 0,24 kg kg<sup>-1</sup> correspondem respectivamente à capacidade de campo (6 kPa) e ponto de murcha permanente (1500 kPa) BLAISNK (2007), foi definido valores dos níveis de U. Os níveis de U adotados no experimento apresentaram os seguintes valores: 0,26; 0,28; 0,30; 0,32 e 0,34 kg kg<sup>-1</sup>.

Foi utilizada a cultivar de feijão IPR Tangará (Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR, 2012). A semeadura foi realizada dia 11 de janeiro de 2012 e a colheita foi realizada dia 16 de maio de 2012. Semeou oito sementes por vaso, realizando o desbaste após a emergência, deixando duas plantas por vaso.

A quantidade de adubo aplicado em cada vaso foi com base para atender à necessidade nutricional de duas plantas em cada vaso. O padrão de adubação foi de acordo com a análise química do solo utilizado no experimento para áreas agrícolas produtoras de feijão, seguindo a proporção: na semeadura, 20 kg de N ha<sup>-1</sup>, 30 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e para a cobertura, 30 kg de N ha<sup>-1</sup> aos 15 e 25 dias após a emergência. No cálculo de conversão de massa de adubo por hectare para massa de adubo por planta, foi considerada uma população de referência de 200.000 plantas por hectare.

Da semeadura até a expansão do segundo trifólio (11 de fevereiro de 2012) foi mantida a U na capacidade de campo (0,34 kgkg<sup>-1</sup>) em todas as unidades experimentais. Posteriormente a expansão do segundo trifólio (EMAM et al., 2010), foi imposta em todas as unidades experimentais restrição hídrica até a U atingir o valor de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> (17 de fevereiro de 2012), após esse processo deu início a imposição do fator U por meio da reposição de água da unidade experimental de modo a obter a U desejada. O controle da U foi determinado por meio pesagem diária das unidades experimentais, utilizando uma balança (Kern CB 24 K2N) de precisão de 2 gramas seguindo a metodologia de BEUTLER; CENTURION (2003)

As variáveis dependentes analisadas foram: eficiência relativa na utilização da água (EUA) e a lâmina relativa evapotranspirada (LE). Essas variáveis foram obtidas pela relativização das 75 observações,

das variáveis eficiência de utilização da água (EU) e da lâmina evapotranspirada (L) de acordo com as Equações 1 e 2.

$$LE = 100 \frac{L}{L_{\max}} \quad (1)$$

Em que, LE é a lâmina relativa evapotranspirada; L é a lâmina evapotranspirada em mm; L<sub>max</sub> é o valor máximo da L encontrado entre as 75 observações.

A L com dimensão em mm, foi obtida por meio do somatório da quantidade de água, utilizada em cada unidade experimental durante todo ciclo da planta e dividido pela área da superfície do solo.

$$EUA = 100 \frac{EU}{EU_{\max}} \quad (2)$$

Em que, EUA é a eficiência relativa na utilização da água; EU é a eficiência na utilização da água em kg mm<sup>-1</sup>; EU<sub>max</sub> é o valor máximo da EU encontrado nas 75 observações.

A variável EU foi obtida pela razão da massa de grãos (kg) com umidade dos grãos em 13 % em base úmida, pela L (SILVA et al., 2014).

Os valores de resistência à penetração do solo foram estimados por meio da combinação das variáveis umidade do solo e densidade do solo com base na Equação 3, de acordo com o trabalho de BLAISNK (2007), ajustada para o NITOSSOLO Vermelho distroférico.

$$RP = d(U Ds)^e Ds^f = 0,00134(U Ds)^{-5,74251} Ds^{8,50105} \quad (3)$$

Em que, RP é a resistência do solo à penetração do solo em MPa; d, e, f, são os coeficientes do modelo; U é umidade do solo em base massa em kg kg<sup>-1</sup> e Ds é a densidade do solo em Mg m<sup>-3</sup>.

Foi realizada a análise de regressão dos fatores principais e dos desdobramentos dos fatores para as variáveis dependentes EUA e LE, adotando um nível de significância de 10%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as relações entre a EUA e a LE com o fator principal Ds. Verificou-se não ser possível ajustar um modelo de regressão entre EUA e Ds, no nível de significância empregado no trabalho, em termos médios. Para LE foi possível o ajuste de um modelo linear. Verifica-se que o aumento da Ds promoveu aumento da LE, o que pode estar associado ao fato de que a elevação da densidade do solo contribuiu para um melhor acesso à água para o

sistema radicular. Esta premissa foi também apresentada por (VALICHESKI et al., 2012).

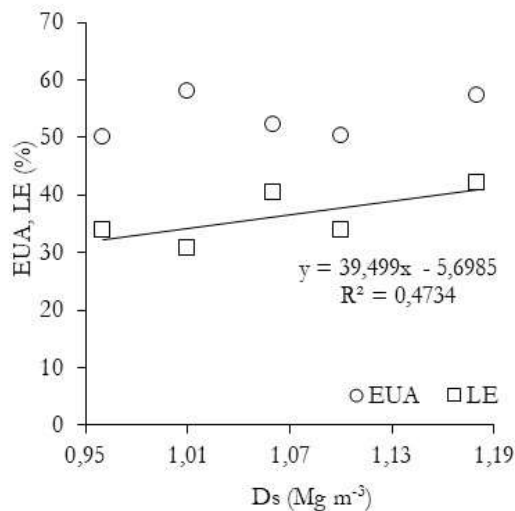


FIGURA 1. EUA e LE em função da Ds considerando o efeito do fator principal Ds.

Na Figura 2 observa-se o efeito principal da variável U sobre os valores de EUA e de LE. Pode-se constatar uma resposta linear crescente da EUA em função da umidade (U). Resultados semelhantes foram observados em trabalhos com feijoeiro (GARCIA et al., 2009; WAKRIM et al., 2005), e também para a batata doce (MANTOVANI et al., 2013). Para a LE o modelo ajustado tem declividade mais acentuada que a identificada para EUA. Isto revela que, em média, a elevação da umidade promoveu maior alteração em LE que em EUA. Ou seja, a evapotranspiração aumentou com o aumento da umidade e a eficiência de utilização da água também, embora em menor taxa.

Em se tratando de um solo muito argiloso, era possível que a restrição à aeração no ambiente com maior umidade pudesse influenciar as variáveis avaliadas. No entanto, não se constatou efeito deletério em ambas. Conforme a Figura 2, os valores de ambas cresceram em toda a faixa de valores de umidade. A EUA para o nível de U de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> é 23,9% menor que no nível 0,34 kg kg<sup>-1</sup>. No entanto, a LE para o nível de U de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> é 65,7 % menor que no nível 0,34 kg kg<sup>-1</sup>.

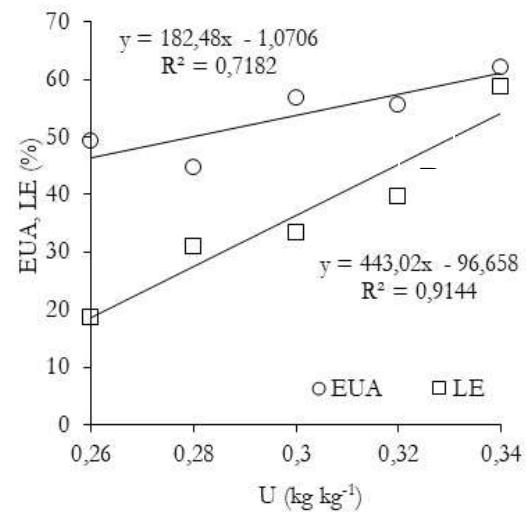


FIGURA 2. EUA e LE em função da U considerando o efeito do fator principal U.

A partir desta análise dos efeitos principais, constatou-se a necessidade de se desdobrar os efeitos de cada fator dentro dos níveis do outro fator. Na Figura 3 é mostrado o desdobramento da EUA em função da Ds no nível de U de 0,26 kg kg<sup>-1</sup>. Para esta condição, a EUA foi inversamente correlacionada com a Ds. No entanto, não foi possível um ajuste de um modelo significativo para a relação entre LE e Ds, como pode ser visto na Figura 3. Portanto, a relação funcional da EUA com a Ds foi severamente penalizada, fato não observado para o efeito médio da Ds (Figura 1). Nota-se que para esta condição (Figura 3), houve um decréscimo da EUA de 59,5% para a Ds no valor de 1,18 kg m<sup>-3</sup> em relação à Ds no valor de 0,96 Mg m<sup>-3</sup>. Em resumo, para o solo muito seco, a evapotranspiração estatisticamente não é alterada pela compactação do solo, enquanto a eficiência de utilização da água é drasticamente restringida, provavelmente por substancial redução da produção na medida em que a Ds cresce.

Nesta condição de umidade do solo, correspondente ao menor valor empregado, provavelmente a resistência à penetração restringiu o desenvolvimento do sistema radicular, penalizando a produção com o aumento da Ds, uma vez que a faixa de RP variou de 2,63 a 4,66 MPa (valores estimados pela Equação 3), para a Ds entre 0,96 a 1,18 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados em (LIMA et al., 2010) e (CARVALHO et al., 2006), nos quais foram obtidos valores de 1,7 e 2,87 MPa, considerados limitantes à produção do feijoeiro. Estes resultados sugerem que a restrição à oferta de água foi muito menos expressiva que a restrição ao desenvolvimento do sistema radicular, com consequentes restrições ao desenvolvimento das plantas.



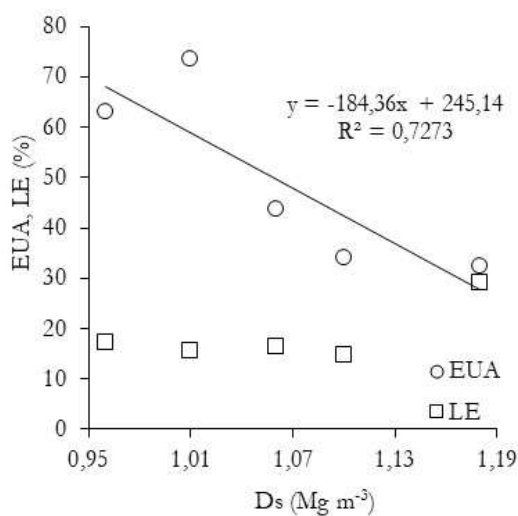


FIGURA 3. Desdobramento da EUA e LE em função da Ds para o nível de U de 0,26 kg kg<sup>-1</sup>.

De acordo com a Figura 4, com o aumento da oferta de água, a EUA não apresentou diferenças estatísticas significativas. Para a LE houve um decréscimo dessa variável partir do valor de Ds no valor de 1,09 kg m<sup>-3</sup>, para o qual corresponde um valor de RP de 2,35 MPa. Para o nível de Ds de 1,18 Mg m<sup>-3</sup>, o valor de RP corresponde a 2,92 MPa. Para este nível de U, uma maior facilidade ao acesso à água evidenciou limitações das condições físico-hídricas do solo no processo de evapotranspiração. Para valores de Ds maior que 1,09 Mg m<sup>-3</sup>, o fluxo transpiratório foi restringido pela menor habilidade do meio em conduzir água, uma vez que a condutividade hidráulica do solo é reduzida com o aumento da compactação do solo (SILVA et al. 2006) e pela redução da U, além de um provável decréscimo do desenvolvimento do sistema radicular com o aumento da Ds. De acordo com o trabalho de SILVA, ALBUQUERQUE e COSTA (2014), os autores justificam a redução da LE para as condições de maior compactação do solo, devido à redução do diâmetro de poros promovendo um aumento da energia de retenção da água no solo que acarreta em redução na disponibilidade de água para as plantas.

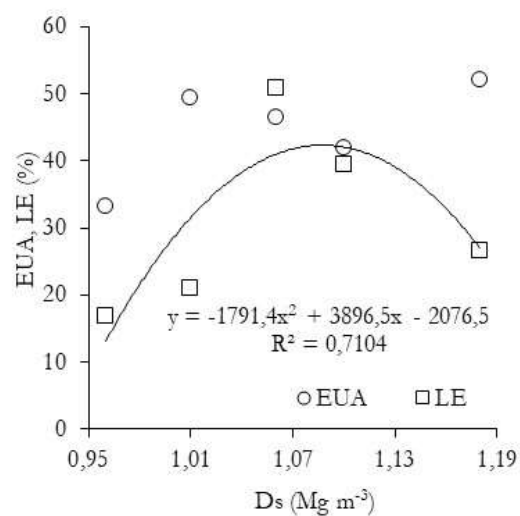


FIGURA 4. Desdobramento da EUA e LE em função da Ds para o nível de U de 0,28 kg kg<sup>-1</sup>.

Na Figura 5 observa-se a relação entre a EUA e a LE e os valores de Ds, para o nível de U no valor de 0,30 kg kg<sup>-1</sup>. Para a EUA não foi possível um ajuste de um modelo significativo em função de Ds. Para a LE houve uma relação linear direta com os valores de Ds. Assim como no nível de umidade anterior, a eficiência de utilização da água não sofreu efeito do aumento da compactação. A evapotranspiração, por outro lado, cresceu em toda a faixa de valores de Ds, sugerindo que maiores valores de densidade, em condição de oferta relativamente alta de água no solo (umidade de 0,30 kg kg<sup>-1</sup>), permitiu que as plantas transpirassem de forma mais efetiva, atendendo à demanda atmosférica com menos restrições. Esse resultado evidencia que a compactação para o nível de umidade do solo de 0,30 kg kg<sup>-1</sup> promoveu um aumento da habilidade do meio em conduzir água com o aumento da Ds devido às mudanças estruturais do solo modificando a condutividade hidráulica (ABRISQUETA et al. 2006; ALMEIDA et al., 2017).

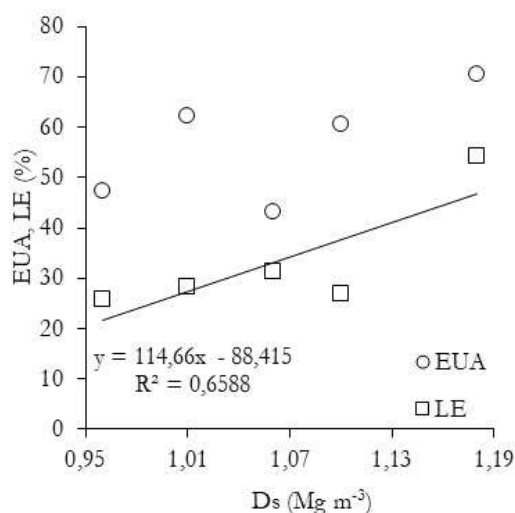


FIGURA 5 Desdobramento da EUA e LE em função da Ds para o nível de U de 0,30 kg kg<sup>-1</sup>.

Após desdobrar o efeito da Ds dentro de cada valor de umidade empregado, foram conduzidas as análises dos desdobramentos do efeito da umidade do solo, dentro de cada nível do fator Ds. Na Figura 6 encontram-se os desdobramentos nos níveis de Ds de 0,96 Mg m<sup>-3</sup> (6A) e 1,01 Mg m<sup>-3</sup> (6B), para as relações entre EUA e LE e os valores de umidade do solo. Observa-se que para a variável EUA não foi possível ajustar um modelo significativo em função de U, em ambos os níveis de Ds, correspondentes aos dois menores valores empregados no trabalho. Contudo, a LE apresenta uma relação linear crescente com os valores de U, para os níveis de Ds de 0,96 e de 1,01 Mg m<sup>-3</sup>. Isto revela que o efeito da oferta de água no solo é marcante sobre a evapotranspiração, mas não está associado a alterações substanciais da eficiência de utilização da água, para os baixos valores de Ds. Resultados semelhantes foram obtidos nos trabalhos de SILVA et al. (2004) para a LE, no estudo com as espécies de *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus grandis* e *Brachiaria brizantha* e pelos trabalhos de (NASCIMENTO et al., 2011) e (JUNIOR et al., 2008), para a EUA, no estudo com gergelim e mamona, respectivamente.

Na Figura 7 são apresentados os desdobramentos das relações entre EUA e LE com a umidade (U), para os valores de Ds correspondentes aos níveis de 1,06 Mg m<sup>-3</sup> (A), 1,10 Mg m<sup>-3</sup> (B) e 1,18 Mg m<sup>-3</sup> (C). Para estes níveis intermediários de Ds, ambas as variáveis relacionadas ao consumo de água foram fortemente afetadas pela oferta de água, ou seja, a evapotranspiração aumentou e a eficiência de utilização da água também, evidenciando que a produção de grãos, proporcionalmente, cresceu ainda mais.

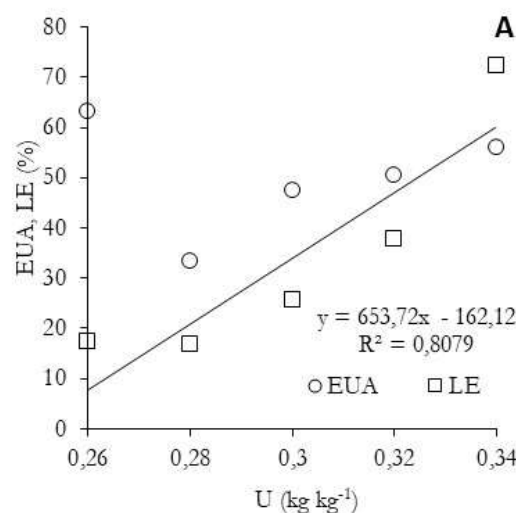


FIGURA 6. Desdobramento da EUA e LE em função da U para os níveis de Ds de 0,96 Mg m<sup>-3</sup>(A); 1,01 Mg m<sup>-3</sup>(B).

Em termos numéricos, a LE para a umidade de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> em relação à umidade de 0,34 kg kg<sup>-1</sup>, apresenta um decréscimo de 57,8% e 58,5% respectivamente, se comparados entre os valores de Ds de 1,06 e 1,10 Mg m<sup>-3</sup> (Figuras 7A e 7B). No entanto, para a EUA, a resposta dessa variável considerando a umidade no valor de 0,26 kg kg<sup>-1</sup> em relação à umidade no valor de 0,34 kg kg<sup>-1</sup>, apresenta valores que são menores para o solo mais seco em percentuais correspondentes a 35,4 e 44,3 %, para os níveis de Ds de 1,06 e 1,10 Mg m<sup>-3</sup>. Tais resultados evidenciam respostas semelhantes das duas variáveis, com ambas evidenciando um aumento substancial com o aumento da umidade, para estes dois níveis intermediários de Ds.

Para o nível de Ds no valor de 1,18 Mg m<sup>-3</sup> (Figura 7C) houve uma resposta linear apenas para o fator LE. No entanto, foi possível a utilização de um

modelo polinomial de segundo grau expressando a relação funcional da EUA com a umidade, com o modelo apresentando um ponto de máximo para umidade no valor de  $0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ . Neste caso, para o maior valor de  $D_s$ , a condição relacionada à maior oferta de água possibilitou a maior taxa de evapotranspiração, mas foi associada a uma redução na eficiência de utilização da água, provavelmente evidenciando uma produção de grãos que não cresceu proporcionalmente ao consumo de água.

Para esta situação de contorno foi possível observar uma marcante interação das condições hídricas do solo, em que a massa de grãos não seguiu uma linearidade com a lâmina evapotranspirada, mas ocorrendo uma redução desta variável em uma condição de umidade do solo elevada. Fica, assim, sinalizada uma possível condição de ocorrência de restrições decorrentes da falta de aeração do solo. Desta forma, o valor de porosidade de aeração menor que 26% (encontrado para  $D_s$  de  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$  e umidade no valor de  $0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ ) pode ter contribuído para limitar a produção de grãos e, conseqüentemente, a EUA. A má aeração acarreta menor eficiência na respiração aeróbica, promovendo a inibição na absorção ativa de íons (BEUTLER et al., 2007), reduzindo a produtividade de diversas culturas como em trigo (KLEIN et al., 2008), feijão (MEGDA et al., 2008) e soja (SUZUKI et al., 2007).

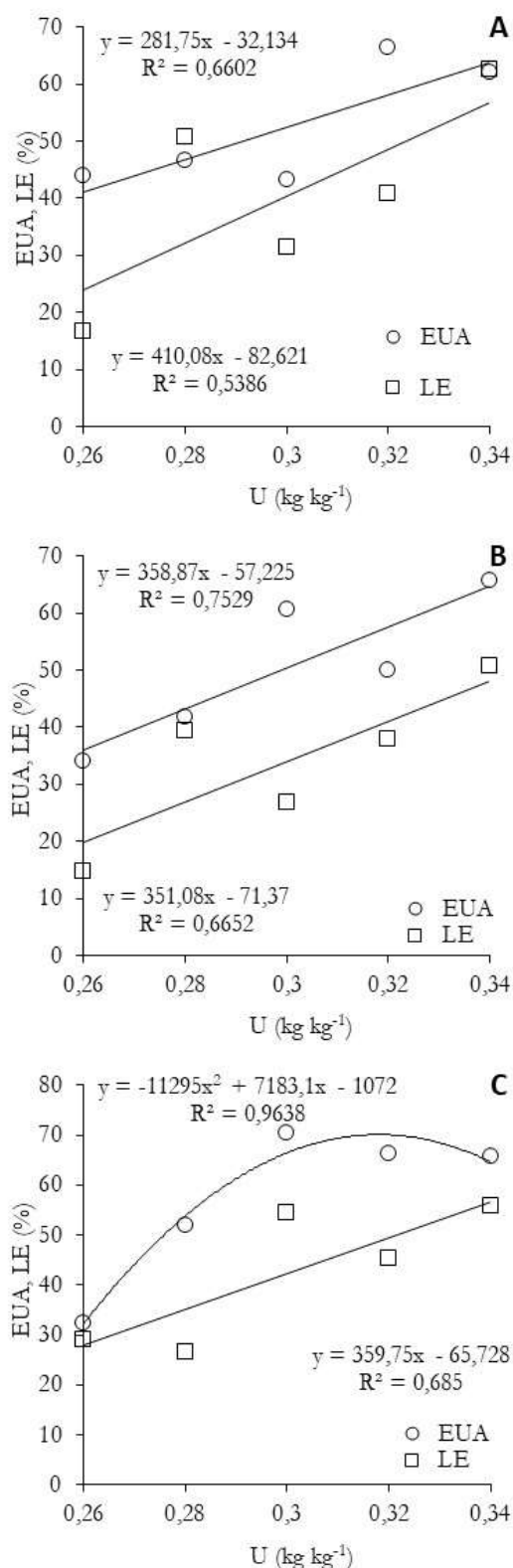


FIGURA 7. Desdobramento da EUA e LE em função da U para os níveis de  $D_s$  de  $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ (A),  $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ (B) e  $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$ (C).

## CONCLUSÕES:

Nas condições estudadas confirmou-se que os fatores relacionados à compactação e à oferta de água no solo interagem entre si e interferem nas variáveis relacionadas à evapotranspiração e à eficiência de utilização da água pela cultura. Na medida em que a oferta de água cresce, crescem a evapotranspiração e a eficiência de utilização da água, em média, para toda a faixa de valores de densidade do solo. Em condição de forte restrição hídrica no solo, a eficiência de utilização da água é negativamente influenciada pela densidade do solo. Em condição de densidade do solo elevada, ambas as variáveis tendem a crescer com o crescimento da oferta de água, até o ponto no qual oferta elevada de água no solo começa a reduzir a eficiência de utilização da água.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRISQUETA, J. M.; PLANA, V.; RUIZ-CANALES, A.; RUIZ-SÁNCHEZ, M. C. Unsaturated hydraulic conductivity of disturbed and undisturbed loam soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 4, p. 91-96, 2006.
- ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; PAZ, V. P. S.; SILVA, F. T. S.; SANTOS, D. N.; PEREIRA, J. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de Cruz das Almas. *Irriga, Botucatu*, v. 22, n.2, p. 259-274, 2017.
- AGUIAR, R. S.; CIRINO, V. M.; FARIA, R. T.; VIDAL, L. H. I. Avaliações de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v.29, n.1, p. 1-14, 2008.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; JOÃO, A. C. G. S.; FREDDI, O. da S. Intervalo hídrico [ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, 2007.
- BLAINSKI, E. *Utilização do intervalo hídrico ótimo do solo para manejo de área irrigada*. 2007, 81 p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.
- CARVALHO, J. C.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 10, n. 3, p. 765-771, 2006.
- CARVALHO, J. J.; SILVA, N. F.; ALVES, D. M.; MORAIS, W. A.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B. Produtividade e teores de nutrientes em grãos de feijão sob diferentes manejos do solo e da irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 8, n. 3, p. 296-307, 2014a. DOI: 10.7127/rbai.v8n300216.
- CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F.; TEIXEIRA, M. B. Manejo da irrigação no feijoeiro, cultivado em semeadura direta e convencional. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 8, n. 1, p. 52-63, 2014b. DOI: 10.7127/rbai.v8n100198.
- CASTRO, O. M.; VIERIA, S. R.; SIQUEIRA, G. M. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho eutroférico sob diferentes sistemas de manejo. *Bragantia*, Campinas, v. 69, n. 2, p. 433-4433, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v69n2/23.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; BEUTLER, A. N.; ROSSINI, L. A.; FREDDI, O. S.; NETO, E. L. S. Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja. *Científica*, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 203-209, 2006.
- COLLARES, G. L. C.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 932-942, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n3/a03v32n3>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- CUNHA, F. F. da.; SOARES, A. A.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C.; PREIRA, O. G. Efeito de diferentes níveis de irrigação e turnos de rega na eficiência de uso da água pelo Capim-Tanzânia. *Engenharia na Agricultura*, v. 16, n. 4, p. 449-457, 2008.
- DE SOUZA, A. P.; DA SILVA, A. C.; LEONEL, S.; SOUZA, M. E.; TANAKA, A. A. Evapotranspiração e eficiência do uso da água no primeiro ciclo produtivo da figueira “Roxo de Valinhos” submetida a cobertura morta. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 4, p. 1127-1138, 2014.
- EMAM, Y.; SHEKOOFA, A.; SALEHI, F.; JALALI, A. H. Water stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. *American*



*Eurasian Journal Agriculture and Environment Science*, v. 9, n. 5, p. 495-499, 2010.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.

GARCIA, G. O.; FILHO, S. M.; NAZÁRIO, A. A.; MORAES, W. B.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C. Estresse hídrico e salino na produção relativa e potencial de água na folha do feijoeiro. *Irriga*, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 470-480, 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. *Principais características das cultivares de feijão com sementes disponíveis no mercado*. Londrina, PR, 2012.

JUNIOR, G. B.; GUERRA, H. O. C.; CAVALCANTI, M. L. F.; LACERDA, R. D. de. Consumo de água e eficiência do uso para duas cultivares de mamona submetidas a estresse hídrico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 12, n. 4, p. 350-355, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n4/v12n04a03.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2017.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, J. P. M.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um latossolo vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. *Ciência Rural*, v.38, n.2, p. 365-371, 2008.

LIMA, C. L. R. De.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 1, p. 89-98, 2010.

LOCATELLI, V. E. R.; MEDEIROS, R. D.; SMIDERLE, O. J.; ALBUQUERQUE, J. A. A. DE; ARAÚJO, W. F. Desenvolvimento vegetativo de cultivares de feijão-caupi sob lâminas de irrigação no cerrado roraimense. *Irriga*, Botucatu, v. 1, n. 1 p. 28-39, 2016.

MANTOVANI, E.; DELAZARI, F.; DIAS, L.; ASSIS, I.; VIERA, G.; LANDIM, F. Eficiência no uso da água de duas cultivares de batata-doce em resposta a diferentes lâminas de irrigação. *Horticultura Brasileira*, v. 31, n. 4, p. 602-606, 2013.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.; LEVEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um argissolo vermelho sob tráfego

controlado de máquinas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p. 1185-1195, 2013.

MEGDA, M. M.; CARVALHO, M. P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre produtividade de feijão e a porosidade de um latossolo vermelho de Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 781-788, 2008.

ROMERO, E. M.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; COSTA, L. M. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.10, p. 1003-1009, 2014.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 34, p. 1811-1822, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n6/05.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2017.

MORAIS, W. A.; SOARES, F. A. L.; ROQUE, R. C.; COSTA, C. T. S.; GOMES, F. H. F.; LOPES, G. M. Biometria das vagens e grãos dos feijoeiros submetidos a variações de doses de adubação e lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 7679, p. 1285-1290, 2017.

NASCIMENTO, J. J. V. R.; AZEVEDO, C. A. V.; SOUSA, J. S. C.; MENDES, L. B.; NETO, J. D. Eficiência do uso de água do gergelim em função da água disponível no solo. *Revista Verde*, Mossoró, v. 6, n. 4, p. 230-233, 2011.

OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; JÚNIOR, L. S. B. Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 604-612, 2013.

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. da. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de latossolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p.619-626, 2014.

ROMERO, E. M.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; COSTA, L. M. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 10, p. 1003-1009, 2014.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista*

*Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SILVA, A. O.; SILVA, Ê. F. F.; KLAR, A. E. Eficiência de uso da água em cultivares de beterraba submetidas a diferentes tensões da água no solo. *WRIM*. v. 2, n. 1, p. 27-36, 2013.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 10, n. 4, p. 842-847. 2006.

SILVA, W.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A.; CARDOSO, A. A. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. *Floresta*, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 1-11, 2004.

SILVA, T. G. F.; PRIMO, J. T. A.; SILVA, S. M. S. A E; MOURA, M. S. B. DE; SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ARAÚJO, J. E. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. *Bragantia*, Campinas, v. 73, n. 2, p. 1-8, 2014.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 38, p. 1731-1739, 2014.

SOARES, F. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; VIVAN, G. A.; PARIZI, A. R. C. Resposta da cultura do milho à variabilidade hídrica em solo sob pivô central. *Irriga, Botucatu*, v. 17, n.2, p. 220-223, 2012.

STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; HEINEMANN, A. B.; OLIVEIRA, J. P. de. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 17, n. 1, p. 19-25, 2013.

SUZUKI, L. E. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa agropecuária Brasileira*. v. 42, n.8, p. 1159-1167, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

TORRES, J. L. R.; SANTANA, M. J.; NETO, A. P.; PEREIRA, M. G.; VIEIRA, D. M. DA S. Produtividade de feijão sobre lâminas de irrigação e coberturas de solo. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 4, p. 833-841, 2013.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STURMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

WAKRIM, R.; WAHBI, S.; TAHI, H.; AGANCHICH, B.; SERRAJ, R. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agriculture Ecosystems & Environment*, v. 106, p. 275-287, 2005.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FILHO, P. S. V. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. *Acta Scientiarum*, v. 22, p. 1055-1060, 2000.