

ÂNDERSON TAKASHI HARA

**UMIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO DA CULTURA DE FEIJÃO**

Maringá-PR, outubro de 2012

ÂNDERSON TAKASHI HARA

Engenheiro Agrônomo

**UMIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO DA CULTURA DE FEIJÃO**

Dissertação apresentado à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Mestre.

Maringá-PR, outubro de 2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

H254u Hara, Ânderson Takashi, 1987-  
Umidade do solo e produção da cultura de feijão /  
Ânderson Takashi Hara. -- Maringá, 2012.  
58 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade  
Gonçalves.

Coorientador: Prof. Dr. Cássio Antônio Tormena.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-  
Graduação em Agronomia, 2012.

1. Solo - Densidade. 2. Solo - Umidade. 3.  
Superfície de valores. 2. Feijão - Solo. I.  
Gonçalves, Antônio Carlos Andrade, orient. II.  
Universidade Estadual de Maringá. Departamento de  
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.  
III. Título.

CDD 21.ed.631.43

ZSS-001181

ÂNDERSON TAKASHI HARA

Engenheiro Agrônomo

## UMIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO DA CULTURA DE FEIJÃO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 24 de outubro de 2012

---

Prof. Dr. Antônio Carlos Andrade  
Gonçalves  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Roberto Rezende

---

Prof. Dr. Cássio Antônio Tormena  
(Coorientador)

---

Prof. Dr. Hatiro Tashima

A Deus

Aos meus pais e irmãos

Dedico

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha mãe Margarida Hara pelo sacrifício realizado, tornando-se possível a minha formação educacional, pelos ensinamentos, e por ser uma referência de pessoa a ser seguida.

Ao meu pai, Paulo Hiroyasu Hara; Meus irmãos, Edson Hiroshi Hara e Ayrton Haruo Hara; e meus tios, que me inspiraram por meio da convivência.

Ao professor Antônio Carlos Andrade Gonçalves pela oportunidade, abrindo caminho para a realização do curso de mestrado, pela formação técnica, pela liberdade de desenvolver idéias e executá-las ao longo do curso, pela ajuda nos experimentos, pela liberdade, reflexão e auxílio na construção de idéias, pelas oportunidades concedidas, pelos conselhos preciosos tanto na parte técnica quanto na pessoal e pela sua empatia pelos seus orientandos.

Ao professor Roberto Rezende, pela formação técnica na área de irrigação, pelos conselhos preciosos e oportunidades concedidas, e pelo apoio na execução dos experimentos e pela disposição em querer ajudar.

Ao professor Cássio Antônio Tormena, pelo auxílio técnico como coorientador.

Ao professor Paulo Sérgio Lourenço de Freitas, pela formação técnica, pela liberdade na discussão de idéias a respeito dos experimentos e pelo apoio na execução dos experimentos.

Ao professor Altair Bertonha, que permitiu por meio de suas aulas, na reflexão do assunto abordado na dissertação e pelo apoio na execução do experimento.

Ao professor Willian Mário Nunes, pelos conselhos, pela viabilização na execução do experimento da área foliar.

Ao Heraldo Takao Hashiguti pela parceria na execução dos experimentos, cooperação, pela sua disposição e pela amizade.

Ao André Maller pela parceria na execução dos experimentos e pelas reflexões e compartilhamento de conteúdos filosóficos e técnicos.

Ao Alex Elpidio dos Santos pela ajuda no experimento e amizade.

Aos graduandos Rodolfo e Eduardo Carrara, pelo auxílio nos experimentos e amizade.

Ao Alexandre Zanuto, Eduardo Generoso pela ajuda na execução dos experimentos.

Aos companheiros Jonatham, Renam, Rafael e André Ribeiro, pela ajuda e amizade.

A Erica Cristina Takamizawa Sato pela sua ajuda e preocupação, referentes aos trâmites legais desta dissertação.

Aos Professores do curso de Pós-graduação e graduação da Universidade Estadual de Maringá pelos ensinamentos prestados.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A Universidade Estadual de Maringá e Programa de Pós-graduação em Agronomia.

A população brasileira pelo financiamento das instituições de pesquisa.

## **BIOGRAFIA**

Ânderson Takashi Hara, filho de Margarida Hara e Paulo Hiroyasu Hara, nascido em Porto Velho, Estado de Rondônia, no dia 25 de fevereiro de 1987.

Em fevereiro de 2006, ingressou no curso de Agronomia, pela Universidade Estadual de Maringá, no Estado do Paraná. Recebeu o Título de Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2011.

Em março de 2011, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração solos e nutrição de plantas, na Universidade Estadual de Maringá.



## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. Introdução .....	1
2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA .....	3
2.1 <i>Phaseolus vulgaris</i> L.....	3
2.1 Densidade do Solo (Ds) .....	6
2.2 Déficit hídrico, Evapotranspiração e Eficiência na Utilização da Água.....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Localização .....	14
3.2 Tratamentos e delineamento experimental .....	14
3.3 Preparo da unidade experimental .....	14
3.4 Determinação dos níveis do fator umidade do solo .....	17
3.5 Semeadura e imposição do fator umidade do solo .....	18
3.6 Adubação.....	19
3.7 Tratos culturais.....	22
3.8 Avaliação dos componentes de produção .....	22
3.9 Produção relativa de grãos (PRG) .....	22
3.10 Lâmina relativa evapotranspirada (LRE).....	23
3.11 Eficiência relativa na utilização da água (ERUA) .....	23
4 Resultados e discussão .....	24
4.1 Produção relativa de grãos (PRG) .....	24
4.2 Lâmina relativa evapotranspirada (LRE).....	34
4.2 Eficiência relativa na utilização da água (ERUA) .....	41
5 CONCLUSÕES .....	49
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Curva de retenção de água no solo da umidade do solo em função do potencial de água no solo. ....	17
Figura 2	Valores médios de PRG, nas diferentes umidades do solo, em função dos valores de $D_s$ .....	25
Figura 3	Valores médios de PRG, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de $U$ .....	26
Figura 4	Valores médios de PRG (%) em função dos valores de $D_s$ ( $Mg.m^{-3}$ ), em três níveis de umidade do solo:.....	28
Figura 5	Valores médios de PRG em função dos valores de umidade, em cinco níveis de densidade do solo.....	30
Figura 6	Superfície de valores de PRG em função da $D_s$ e $U$ . ....	32
Figura 7	Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da PRG com variação da $D_s$ .....	34
Figura 8-	Valores médios de LRE, nas diferentes umidades do solo, em função dos valores de $D_s$ .....	35
Figura 9	Valores médios de LRE, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de $U$ .....	36
Figura 10	Valores médios da LRE em função dos valores de $DS$ , em dois níveis de $U$ . ....	37
Figura 11	Valores médios da LRE em função dos valores de $U$ , em cinco níveis de densidade do solo .....	38
Figura 12	Superfície de valores de LRE em função da $D_s$ e $U$ .....	40
Figura 13	Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da LRE com variação da $D_s$ .....	41
Figura 14	Valores médios de ERUA, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de $U$ .....	43
Figura 15	Valores médios de ERUA em função dos valores de $D_s$ , no nível de umidade do solo .....	44
Figura 16	Valores médios da ERUA em função dos valores de $U$ , em três níveis de densidade do solo.....	45

Figura 17 Superfície de valores da ERUA em função da $D_s$ e $U$ .....	46
Figura 18 Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da ERUA com variação da $D_s$ .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Análise de macronutrientes e micronutrientes do solo, utilizado no experimento .....	21
Tabela 2	Momentos estatísticos da distribuição de valores da produção. ....	24
Tabela 3	Momentos estatísticos da distribuição de valores da lâmina evapotranspirada.....	35
Tabela 4	Momentos estatísticos da distribuição de valores da eficiência na utilização da água .....	42

## RESUMO

HARA, A. T. Eng. Agr. Universidade Estadual de Maringá, outubro de 2012. **Umidade do solo e produção da cultura de feijão**. Professor Orientador: Antônio Carlos Andrade Gonçalves. Professor Coorientador: Cássio Antônio Tormena.

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um importante alimento para a população brasileira. A demanda por este produto em todo o país é elevada, o que promove oscilações bruscas de preço em função da sua oferta, caracterizando a grande importância sócioeconômica associada a esta cultura. O conhecimento acumulado a partir de diversos estudos evidencia que o feijoeiro é sensível às condições físico-hídricas do solo dentre estas, a oferta de água durante o ciclo, suficiente para assegurar a transpiração sem restrições, assim como a estrutura do solo em condições de não promover restrições mecânicas ao desenvolvimento radicular, são características com forte impacto sobre o desenvolvimento e produção desta cultura. No entanto, a identificação de uma condição estrutural, associada ao conteúdo de água do solo, que seja restritiva à cultura, ainda permanece cercada de incertezas. Desta forma, torna-se necessário investigar de forma mais pormenorizada, a resposta da cultura do feijoeiro aos diferentes níveis de oferta de água, bem como esta resposta a diferentes níveis de densidade do solo. Faz-se necessário também, buscar a compreensão das inter-relações entre estes fatores sobre a resposta induzida por eles na cultura do feijoeiro. Para isto, um experimento foi conduzido à casa de vegetação no Centro de Treinamento de Irrigação na Universidade Estadual de Maringá, no delineamento inteiramente casualizado com 4 repetições e esquema de arranjo de tratamentos fatorial 5x5. Foram analisadas a produção relativa de grãos, a lâmina relativa evapotranspirada e a eficiência relativa na utilização da água. Os resultados evidenciam que o feijoeiro responde sensivelmente à variação da umidade do solo, bem como às diferentes condições estruturais do solo, em termos de desenvolvimento e produção.

**Palavras chave:** densidade do solo, umidade do solo, superfície de valores.

## ABSTRACT

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an important food for the population. The demand for this product in any country is high, which promotes sharp fluctuations in price depending on their offer, featuring the great socioeconomic importance associated with this culture. The knowledge accumulated from several studies indicates that the bean is sensitive to drought and soil conditions among these, the supply of water during the cycle, sufficient to ensure perspiration without restrictions, as well as the structure of the soil which should not to be a mechanical constraint to root development. These are characteristics which presents a strong impact on the development and production of this crop. However, the identification of a structural condition associated with the water content of soil, which causes restriction to the culture remains uncertain. Thus, it becomes necessary to investigate bean response to different levels of water supply and soil density. Thus, it is necessary understand relationships between them. An experiment was conducted in the greenhouse Irrigation Training Center at the State University of Maringá, in a completely randomized design with four replicates in the 5x5 factorial design. It was analyzed relative grain production, relative irrigation depth and water using efficiency. The results show that the bean responds sensitively to the variation of soil moisture, as well as the different structural conditions in development and production.

**Keywords:** soil bulk density, soil moisture, surface values..

## 1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um importante alimento para a população brasileira. A sua importância se justifica por ser um alimento rico em proteínas e um alimento básico para os brasileiros, sendo muitas vezes a única fonte protéica da população mais carente. A demanda por este produto em todo o país é elevada, o que promove oscilações bruscas de preço em função da sua oferta.

No Estado do Paraná, o cultivo do feijoeiro destaca-se como fonte de renda e subsistência para pequenos agricultores, mas também como fonte de rentabilidade para a agricultura em larga escala.

Uma característica relevante desta espécie é a insensibilidade ao fotoperíodo para o florescimento. Esta insensibilidade permite o cultivo do feijoeiro no estado do Paraná em três épocas, denominadas safra das águas, safra da seca e safra de inverno.

A produtividade do feijão no Estado do Paraná é considerada aquém do potencial genético dessa cultura. Entre as causas desta baixa produtividade do feijão no Estado do Paraná, destacam-se a inexistência ou a ineficiência de tratamentos fitossanitários, perdas na colheita, deficiência nutricional e condições físico-hídricas do solo inapropriadas.

A água é um importante fator de produção para o feijoeiro. Em linhas gerais, compreende-se que a água disponível no solo para as plantas é aquela que se encontra entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. De uma maneira geral a umidade do solo próximo à capacidade de campo proporciona um melhor desenvolvimento do feijoeiro. Entretanto sob determinada condição física do solo, a elevação de umidade do solo pode reduzir drasticamente a taxa de trocas gasosas que ocorre no solo, gerando condição de hipoxia às raízes, promovendo um efeito deletério à cultura. Em outra condição extrema, a baixa umidade do solo promove uma supressão do desenvolvimento do feijoeiro, uma vez que em condição de baixa umidade do solo, as raízes do feijoeiro estão submetidas à baixo potencial hídrico do solo,

restringindo a migração da água do solo para o sistema radicular, e por consequência, o processo de transpiração.

Justifica-se o estudo e quantificação dos processos que envolvem a transpiração, uma vez que a transpiração está relacionada com a produção vegetal. Outro aspecto importante é a quantificação da transpiração, ela permite a obtenção da variável eficiência na utilização da água (EUA). Essa variável é obtida pela razão da produção de grãos pelo consumo de água. O conhecimento da EUA permite a identificação das condições de contorno que promovem a utilização da água de forma econômica, por meio da comparação entre a rentabilidade gerada pela produção e o custo para realizar a irrigação.

Na tentativa da busca de um indicador de qualidade física do solo, tem-se estudado as variáveis: densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade de aeração (PA), densidade de solo crítica ( $D_{sc}$ ), condutividade hidráulica (Ch) e a resistência do solo à penetração radicular (RP).

Neste trabalho tem-se como hipótese que a cultura de feijão responde favoravelmente, em termos de desenvolvimento e de produção, à manutenção do conteúdo de água no solo em valores mais elevados, próximos à capacidade de campo, podendo responder negativamente a estes níveis mais altos, caso haja restrição a trocas gasosas. Por outro lado, a cultura responde negativamente ao aumento da densidade do solo, o que deve restringir o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o desenvolvimento e a produção.



## 2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

### 2.1 *Phaseolus vulgaris* L.

*Phaseolus vulgaris* L. pertence à família Leguminosae, tribo Phaseoleae, subfamília Papilionoideae e gênero Phaseolus, possui hábito de crescimento determinado ou indeterminado (GRAHAM & RANNALLI, 1997). Apresenta a mais ampla distribuição geográfica, sendo cultivada em todos os continentes com amplitude térmica entre 10 e 35 graus Celsius (SANTANA et al., 2009).

No Brasil, a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) constitui-se numa das mais representativas explorações agrícolas, não só pela área de cultivo, como também pelo valor da produção (MONTANARI et al., 2010).

O feijoeiro comum é a espécie mais cultivada no mundo entre as demais do gênero Phaseolus, sendo o Brasil o maior produtor e consumidor (FARINELLI & LEMOS, 2010). A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) constitui uma das mais importantes do Brasil, já que o feijão é considerado a principal fonte de proteína das camadas sociais de menor poder aquisitivo (SANTOS et al., 2005a).

O feijoeiro representa uma importante fonte de proteína na alimentação humana, possuindo uma ampla faixa de adaptação sendo cultivado praticamente em todo o país (GARCIA et al., 2009). Além dele ser um alimento altamente proteico, rico em ferro e carboidratos, juntamente com o arroz, faz parte da dieta alimentar da maioria dos brasileiros (SOUSA et al., 2009b).

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), no Brasil, pode ser cultivado em qualquer época do ano, desde que não existam limitações de temperatura e umidade do solo (SANTOS et al., 2005). A semeadura é realizada em diversas épocas, o que condiciona uma diversidade de condições climáticas, que atrelada a diferentes níveis de tecnologia, contribuem para a baixa produtividade média nacional e instabilidade da produção (GUIMARÃES et al., 2006). O feijão é tradicionalmente cultivado na época das águas, semeado em outubro e novembro, e das secas, semeado em janeiro e fevereiro; podendo

ser semeado, em algumas regiões na época de inverno, entre maio e setembro (VICENTE et al., 2007).

A produtividade do feijoeiro é função de vários fatores, dentre eles podem-se citar: qualidade das sementes, variedade, clima e aspectos físico-químicos do solo (REZENDE et al., 2004).

Temperaturas inferiores a 15 graus Celsius inviabilizam o funcionamento normal dos órgãos reprodutivos, na faixa de 2 a 10 graus Celsius as plantas reduzem a produção de biomassa e retardam o desenvolvimento devido às alterações metabólicas provocadas pelo resfriamento (PEREIRA et al., 2003). Temperaturas entre 17 e 25 graus Celsius são considerados ótimas para o feijoeiro (SANTANA et al., 2009).

Entre os fatores climáticos, a deficiência hídrica para o feijoeiro é o mais importante (GUIMARÃES et al., 2006). O feijoeiro é uma cultura sensível ao déficit de água no solo, sendo esse fator um dos mais limitantes para obtenção de altas produtividades (REZENDE et al., 2004). Aproximadamente 60% do feijão comum produzido em todo mundo cresce em regiões sujeitas a estresse hídrico, fazendo a seca, depois das doenças, a segunda maior contribuição para a redução do cultivo desta espécie (MARTÍNEZ et al., 2007).

A ocorrência do déficit hídrico em qualquer etapa fisiológica no feijoeiro diminui a produção (SOUSA et al., 2009a). Em condições de estresse hídrico, a biomassa da parte aérea e de seus componentes, como folhas, ramos e vagens e o índice de área foliar são reduzidas, considerando feijoeiro irrigado comparando com feijoeiro não irrigado (GOMES et al., 2000). EMAM et al. (2010) relata que o feijoeiro em condição de estresse hídrico, reduziu a altura de plantas, área foliar e massa seca de plantas. Do ponto de vista fisiológico, deficiência hídrica, diminui o tamanho da camada do parênquima palissático e lacunoso (NAVEA et al., 2002), reduz a multiplicação e a expansão das células, resultando em menor crescimento do dossel vegetativo das plantas (CARLESSO et al., 2007).

COSTA et al. (1991) constatou que o estresse hídrico cíclico (-0,03 a -1,0 MPa) reduziu os componentes de produção do feijoeiro, número de sementes, número de vagens, número de grãos por vagem e área foliar.

A produtividade do feijoeiro é reduzida mais drasticamente na condição em que a supressão da irrigação ocorre na fase inicial vegetativa (SOUSA et al., 2009a). Supressão hídrica no estágio de vegetativo reduz o número de vagens por planta para o feijoeiro (SOUSA et al., 2009a).

O feijão é particularmente susceptível à seca durante o florescimento, com significativo aborto floral quando a escassez de água ocorre nesse estágio (GRAHAM & RANALLI, 1997). Estresse hídrico nos estádios de desenvolvimento do feijoeiro préfloração e plena-floração aumenta a síntese de ácido abscísico e etileno no pedúnculo da flor, provocando a sua queda ao menor movimento, e impedindo a formação de vagens e grãos (SOUSA et al., 2009a).

O estresse hídrico durante o estágio de enchimento de grãos produz abortamento de vagens jovens e produção de vagens chochas nas pontas, tendo em vista que o enchimento ocorre na base para as pontas (SOUSA et al., 2009a).

Como estratégia para contornar o estresse hídrico, plantas de feijão podem promover processos de endurecimento, tornando-as menos sensíveis ao estresse de água (COSTA et al., 1991).

Parte da sensibilidade do feijoeiro ao estresse hídrico é gerada pela capacidade do feijoeiro em explorar uma incipiente camada de solo, na qual esta cultura concentra elevada porcentagem do sistema radicular, que corresponde à camada superficial do solo (CARLESSO et al., 2007; SANTANA et al., 2009; SIMSEK et al., 2011). Bizari et al. (2010) relatam que o sistema radicular efetivo da variedade Pérola encontram-se nas camadas: 0 a 15 cm para o desenvolvimento vegetativo, de 0 a 20cm para o florescimento/enchimento de grãos, e de 0 a 25 cm no início da maturação fisiológica. STONE & SILVEIRA (1999) trabalhando com diferentes sistemas de preparo, constataram que cerca de 80 a 92% do sistema radicular do feijoeiro concentra-se até 30 cm de profundidade. Destaca-se que, um sistema radicular profundo é a característica de cultivares tolerantes à seca (SOUSA et al., 2009b).

## 2.1 Densidade do Solo (Ds)

A capacidade do solo em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas é denominada qualidade física do solo (TORMENA et al., 1998; COLLARES et al., 2006). O interesse em avaliar a qualidade do solo tem aumentado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e na sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola (LIMA et al., 2006).

Vários fatores físicos podem limitar o crescimento da raiz, como a disponibilidade de oxigênio e água, resistência mecânica do solo à deformação para o crescimento da raiz (BENGOUGH et al., 1997). A água, o oxigênio, a temperatura e a resistência à penetração são fatores físicos do solo que pode diretamente influenciar o crescimento das plantas (WU et al., 2003).

Estudos de alguns aspectos da fisiologia da impedância mecânica têm ficado aquém de outros estresses devido ao fato das dificuldades para a observação em situ e dificuldades de obtenção de amostras não destruídas (BENGOUGH et al., 1997).

Compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual ocorre um aumento de sua densidade em consequência da redução do seu volume (SILVA et al., 2006b), acarretando em alteração na estrutura física do solo de modo a reduzir os espaços internos que normalmente são ocupados por água e ar. O intenso tráfego de maquinaria agrícola pode implicar na compactação do solo, caracterizada por apresentar abrupta elevação da densidade na camada imediatamente abaixo da profundidade de trabalho dos implementos, tais como: o arado e a grade (SANTOS et al., 2005).

As condições de umidade do solo durante o preparo, o teor de argila e de matéria orgânica do solo, a profundidade de mobilização e o tipo de implemento utilizado podem levar a modificações da estrutura do solo, acarretando restrições ao crescimento das raízes (DE MARIA et al., 1999).

A compactação pode reduzir os espaços internos que normalmente são ocupados por água e ar. Em decorrência disso, a disponibilidade desses

elementos no solo torna-se reduzida, dificultando, assim, o bom desenvolvimento das culturas (ASSIS et al., 2009).

Várias variáveis físicas do solo são utilizadas para avaliar o estado de compactação do solo, entre elas, a densidade, a porosidade do solo e a resistência mecânica à penetração (FREDDI et al., 2007). A densidade do solo e a resistência do solo à penetração (RP) são as variáveis mais utilizadas para avaliar a compactação do solo, tendo estreitas correlações com o crescimento radicular (MONTANARI et al., 2010). A densidade do solo definida como o quociente de sua massa de sólidos por seu volume total, é afetada por cultivos, que alteram a estrutura e por consequência o arranjo e volume de poros (KLEIN, 2006). A RP é uma variável obtida por meio de equipamentos ou por estimativas através de equações, que fornecem um valor hipotético de resistência mecânica à compressão do solo que as raízes das plantas estariam submetidas durante o processo de expansão celular.

A presença de uma estrutura maciça e adensada nas camadas superficial e subsuperficial são comuns na maioria dos solos cultivados intensivamente. Com valores de densidade do solo mais elevados, a aeração, penetração e a proliferação de raízes também são prejudicadas (RICHART et al., 2005).

A compactação tem se destacado em nível mundial como um dos principais responsáveis pela degradação da qualidade físico-hídrica de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo e pela redução da produtividade das culturas (LIMA et al., 2006). QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000), afirmam que um solo apesar de ter com boa fertilidade química, se há compactação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado, e estas as que apresentam maior taxa de absorção.

Compactação pode ser definida como processo do aumento da densidade do solo (STONE et al., 2002), redução da macroporosidade (STONE et al., 2002; BEUTLER & CENTURION, 2004a), redução da porosidade total e aumento da microporosidade (BEUTLER & CENTURION, 2004a).

Com a compactação, diminuem os espaços livres do solo e, conseqüentemente, a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera, podendo ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos da planta (LIMA et al., 2003). Em condições de deficiência de aeração, o menor desenvolvimento vegetativo é atribuído a algumas alterações nas plantas como: inibição na absorção e transporte de nutrientes em razão do menor crescimento radicular e da ineficiência da respiração anaeróbica em fornecer energia para absorção ativa de íons e em aumentar a permeabilidade da membrana das células das raízes (BEUTLER et al, 2007) .

O crescimento radicular sofre restrições na camada compactada, o que, por sua vez, vai reduzir grandemente a absorção, pela planta, daqueles nutrientes menos móveis como P e K, especialmente em solos com baixos níveis desses nutrientes (ALVARENGA et al., 1997).

A compactação ao causar modificações na estrutura do solo, pode limitar a absorção de nutrientes e por sua vez, resultar em problemas no estabelecimento e no crescimento de raízes (LIMA et al., 2006).

ALVARENGA et al. (1997), trabalhando com feijão-de-porco e feijão-bravo-do-ceará concluíram que as raízes dessas espécies submetidas a condições de compactação, promovem uma redução ou alteração das funções fisiológicas, associadas ao menor volume de solo explorado por elas, que por sua vez acarreta em uma nutrição deficiente das plantas de modo que elas não conseguem manter um mesmo padrão de crescimento em relação à condição de menor nível de compactação do solo. Contudo, MARIA et al. (2009), em seu trabalho com soja afirmam que maiores valores de resistência e densidade não determinaram necessariamente redução na densidade de raízes.

SILVA et al. (2006a) trabalhando com milho, soja, algodão e *Brachiaria brizantha*, constatou que o crescimento da parte aérea obedece a uma função quadrática com ponto de máximo com os valores de densidade de 1,12; 1,11; 1,12 e 1,16 Mg.m<sup>-3</sup> para cada cultura respectivamente. Os mesmos autores detectaram que a altura da soja não foi influenciada pelo aumento da compactação. BEUTLER et al. (2009), não encontraram resposta deletéria na produção de grãos de soja submetidos à densidade de 0,93 a 1,6 Mg.m<sup>-3</sup> em Latossolos Vermelho distrófico em casa de vegetação. Contudo, o incremento

de densidade restringiu a altura de plantas, comprimento de entrenós e o número de vagens por planta. SILVA et al. (2006a) trabalhando com milho, soja, algodão e *Brachiaria brizantha*, constataram que ocorre uma redução do consumo de água em função do aumento da densidade do solo .

A habilidade das raízes penetrarem no perfil do solo diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam (REINERT et al., 2008). As propriedades do solo e os processos afetados pela compactação são fatores responsáveis pelo aumento da resistência mecânica, pela destruição da continuidade dos poros e alteração do fluxo de água e calor (ALVARENGA et al., 1997).

Resistência do solo à penetração é apontada como um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, pois ela expressa o grau de compactação do solo, varia com o tipo de solo e com a espécie cultivada, sendo que suas causas têm sido atribuídas ao tráfego de máquinas agrícolas (RICHART et al., 2005).

Segundo KLEIN et al. (2007), o aumento da compactação do solo aumenta a RP acarretando situações em que mesmo havendo água disponível para as plantas, cessa o crescimento do sistema radicular, afetando o desenvolvimento das plantas e sua produção. Resistência mecânica do solo afeta a penetração e o crescimento da raiz da planta em todos os solos, e não somente naqueles com alta resistência (MISRA et al., 1986).

A diminuição do teor de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão experimentem um impedimento mecânico cada vez maior (COLLARES et al., 2008).

Embora a RP possa promover redução tanto no crescimento de plantas quanto na absorção de nutrientes, isto é uma resposta que vai depender da espécie vegetal e das condições físicas, químicas e biológicas do solo nas quais ela está crescendo (ALVARENGA et al., 1997).

COLLARES et al. (2006), em seu trabalho relatam que a resistência à penetração é o fator que mais afeta o crescimento radicular das plantas afetando a produtividade do feijoeiro.

Raízes das plantas que crescem em solos com alta resistência mecânica à penetração apresentam modificações morfológicas (SENRA et al.,

2007). O aumento da RP provoca modificações morfológicas e fisiológicas específicas em cada espécie a cultivar (RICHART et al., 2005). Entre essas modificações morfológicas e fisiológicas destacam-se o decréscimo na divisão celular no meristema e o aumento no diâmetro da raiz, resultante do aumento na espessura do córtex, reduzindo a área de solo explorado pelas raízes, e conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes (BENGOUGH et al., 1997).

A habilidade das raízes de diferentes espécies de plantas na penetração em um dado solo pode ser muito diferente. Em uma estrutura macroscópica isto pode depender das propriedades das raízes. A máxima resistência do solo à penetração que uma raiz pode suportar é dada pela pressão de turgor máximo que é gerado dentro da zona de alongamento da raiz e pelas características de forma e de atrito na ponta da raiz (BENGOUGH et al., 1997).

## **2.2 Déficit hídrico, Evapotranspiração e Eficiência na Utilização da Água**

Desde os antigos povos sumérios, o homem tem procurado uma alternativa mais efetiva do aproveitamento da água para superar os efeitos do déficit hídrico às plantas (SANTOS & CARLESSO, 1998). Para a maximização da produtividade, é necessário aplicar a quantidade requerida de água no momento adequado (PEITER & CARLESSO, 1996).

As características químicas, físicas e biológicas do solo têm influência direta na quantidade de água no solo disponível às plantas. Assim, se houve qualquer restrição física, química ou biológica, em alguma camada do perfil do solo, que altere o desenvolvimento do sistema radicular, a disponibilidade será afetada porque essa água armazenada não pode ser extraída pelas plantas (SANTOS & CARLESSO, 1998).

O crescimento de um vegetal depende, em termos gerais, da divisão, do desenvolvimento e da expansão celular, processos sensíveis ao déficit hídrico, principalmente na fase de alongamento celular. Depois desta fase, a



célula se encontra preparada para expandir, bastando que haja pressão hidrostática interna, ou de turgor (NÓBREGA et al., 2001).

A manutenção do turgor tem sido consolidada como essencial para a normal atividade celular e contribui para crescimento sob baixa disponibilidade de água (MARTÍNEZ et al., 2007).

Quando a planta está sujeita a estresse hídrico, muitos de seus processos fisiológicos são afetados, tais como: abertura estomática, fotossíntese, síntese de proteínas, atividade enzimática e hormonal, dentre outros (VILELA & BULL, 1999). A deficiência hídrica provoca alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta (SANTOS & CARLESSO, 1998).

O suprimento de água para uma cultura resulta de interações que se estabelecem ao longo do sistema solo planta atmosfera (SANTOS & CARLESSO, 1998). O conteúdo de água no solo afeta a relação entre resistência do solo à penetração e o alongamento da raiz (ROSOLEM et al., 2009).

VEIHMEYER & HENDRICKSON (1931), citados por COSTA et al. (2009), introduziram o conceito de capacidade de campo definido como a quantidade de água retida no solo depois do excesso da água gravitacional ter sido drenado e após a taxa de movimento da mesma para baixo ter diminuído significativamente.

Limitação na disponibilidade de água no solo durante o período de pre-florescimento afeta o desenvolvimento das estruturas vegetativas das plantas, reduzindo a capacidade de produção de fitomassa pela cultura (SANTOS & CARLESSO, 1998).

O déficit hídrico tem maior impacto sobre o rendimento de grãos de milho quando ocorre no florescimento (BERGAMASCHI et al., 2006). Há redução no rendimento de grãos de milho em função do déficit hídrico no florescimento, ajustando-se uma função quadrática (BERGAMASCHI et al., 2006).

Por evapotranspiração entende-se a perda de água na forma de vapor através da superfície do solo (evaporação) mais aquela que ocorre na superfície foliar (transpiração) (ASSIS & VERONA, 1991).

A água se movimenta na planta, basicamente, pela diferença entre o potencial de vapor de água na atmosfera em torno das folhas e o potencial da água do solo (PEREIRA et al., 2006), processo denominado de transpiração. Portanto a tensão da água no solo pode limitar o processo de transpiração. A tensão crítica da água no solo em termos produtivos para a cultura do feijoeiro tem sido quantificada por diversos autores, -40 kPa (SOUSA et al., 2009a), -22 kPa (SANTANA et al., 2009).

A umidade do solo promove uma intensificação ou redução no processo de transpiração, uma vez que o potencial da água no solo está relacionado com a sua umidade. Portanto, um aumento de umidade do solo ou um aumento no valor de potencial de água no solo, promove um aumento da transpiração das plantas desde que esta umidade do solo não restrinja a disponibilidade de oxigênio às raízes. Esse fenômeno é corroborado em trabalhos com feijão (SALVESTRO, 2010; BRANDÃO, 2012; SOUSA et al., 2009a; NASCIMENTO et al., 2004); em milho (ROSOLEM et al., 2003); em *Eucalyptus citriodora* (SILVA et al., 2004); em *Eucalyptus grandis* (SILVA et al., 2004); em *Brachiaria brizantha* (SILVA et al., 2004) em trigo (FREITAS et al., 1985) em milho (ALVES et al., 2009); em melancia (AZEVEDO et al., 2005).

A relação da produção com o consumo de água pelas plantas no processo de evapotranspiração é denominada de eficiência na utilização da água (SOUSA et al., 2000). A utilização eficiente da água pelas culturas agrícolas depende, sobretudo, das condições físicas do solo, das condições atmosféricas, do estado nutricional das plantas, de fatores fisiológicos, da natureza genética e do seu estágio de desenvolvimento (CALVACHE et al., 1997).

Muitos trabalhos apontam que a eficiência na utilização da água aumenta à medida que aumenta a disponibilidade hídrica, como em feijoeiro (GARCIA et al., 2009; WAKRIM et al., 2005); em milho (BERGAMASCHI et al., 2006); em gergelim (NASCIMENTO et al., 2011); em mamona (JUNIOR et al., 2011) e em alface (SANTOS & PEREIRA, 2004). Quando a elevação da

umidade do solo reduz a porosidade de aeração de modo a tornar-se limitante para a cultura, a eficiência na utilização da água pode decrescer em condições de alta umidade, como pode ser observado nos trabalhos de SANTANA et al. (2009) e de JUNIOR et al. (2002).

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Localização**

O trabalho foi conduzido em ambiente protegido situado na unidade de pesquisa em agricultura irrigada, Centro Técnico de Irrigação (CTI) da Universidade Estadual de Maringá, situado em latitude de 23<sup>o</sup> 25' sul e longitude de 51<sup>o</sup> 57' oeste de Greenwich.

### **3.2 Tratamentos e delineamento experimental**

Adotou-se o delineamento estatístico inteiramente casualizado, em esquema de arranjo de tratamentos fatorial 5x5, realizando-se 4 repetições. Os fatores são: umidade do solo em base massa (U) e densidade do solo (Ds), compondo um total de 100 parcelas experimentais.

Os níveis para Ds foram: 0,96; 1,01; 1,06; 1,10; 1,18 Mg.m<sup>-3</sup>. Os níveis de U foram: 0,34; 0,32; 0,30; 0,28 e 0,26 kg.kg<sup>-1</sup>.

O experimento foi conduzido entre os meses de janeiro e maio de 2012. Foram adotadas na análise estatística três repetições por tratamento, em virtude da perda de parcelas experimentais gerado pelo fungo *Sclerotinia rolfici*.

### **3.3 Preparo da unidade experimental**

As parcelas experimentais foram constituídas utilizando-se vasos de material plástico com volume total de 0,0095 m<sup>3</sup>, com diâmetro interno inferior de 0,18 m e diâmetro interno superior de 0,26 m, com altura de 0,28 m. O volume útil da parcela experimental é de 0,00878 m<sup>3</sup>, contendo no interior dos vasos um NITOSSOLO Vermelho distroférico. Este solo é proveniente da área experimental do Centro Técnico de Irrigação, Maringá, Paraná, utilizando a camada superficial, de 0 a 0,2 metros de profundidade. A composição

granulométrica 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. O solo utilizado para a construção das parcelas experimentais foi peneirado, utilizando uma peneira de malha de 0,002 m, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA).

As 100 parcelas experimentais foram agrupadas em 5 classes de D<sub>s</sub> (0,96; 1,01; 1,06; 1,10; 1,18 Mg.m<sup>-3</sup>), em que cada classe de D<sub>s</sub> é composta por 20 vasos com valores da mesma classe de D<sub>s</sub>, totalizando 100 parcelas experimentais.

Para obter o valor de D<sub>s</sub> desejada em cada parcela experimental, cada vaso foi submetido a uma determinada energia de compactação, padronizado para a correspondente classe de densidade. No processo de compactação utilizou-se o método da queda livre de um martelo, descrito por BEUTLER (2003), em diferentes alturas, resultando em diferentes quantidades de movimento (massa.velocidade) e diferentes números de repetições da queda do martelo. Optou-se por variar o número de quedas no processo de compactação do solo, devido à limitação da altura da queda do martelo. O número de quedas do martelo variou de 1 a 3 quedas. O martelo é composto por uma base sólida circular de madeira, sobre o qual foi anexado um cilindro de concreto, construído de forma a ter uma massa padrão.

Foram utilizados dois martelos com diferentes massas e tamanhos, em virtude das paredes dos vasos terem formato cônico. O martelo número 1 apresenta a base sólida circular de madeira com um raio de 0,21 m e com uma massa de 12,0 kg. O martelo número 2 tem a base sólida circular de madeira com um raio de 0,235 m e 14,9 kg. O martelo número 1 foi utilizado para compactar o solo na porção inferior do vaso, enquanto que o martelo número 2 foi utilizado para compactar o solo na porção superior. Ambos os martelos exercem uma mesma pressão estática sobre o solo a ser compactado, sendo que esta pressão estática foi de 3400 N.m<sup>-2</sup>.

O processo de compactação seguiu a seguinte metodologia: primeiramente era realizado o umedecimento de TFSA por meio da pulverização da água por um pulverizador costal, revolvendo o solo de modo a realizar a sua homogeneização. O umedecimento tinha como finalidade propiciar o aumento da eficiência no processo de compactação, buscando-se a

máxima umidade do solo anterior ao ponto no qual o mesmo começaria a aderir à superfície de madeira do martelo. Esta verificação foi realizada experimentalmente, em uma primeira etapa. Em seguida, a proporção entre o volume de água e o de TFSA foi mantida constante, de forma a padronizar a umidade do material a ser utilizado no preenchimento dos vasos.

Após o umedecimento do solo e sua homogeneização, coletavam-se três amostras deformadas para determinação da umidade em base massa (conhecimento da umidade do solo em base massa foi necessário para se determinar a massa de solo seco de cada parcela experimental). A massa de solo seco de cada parcela experimental pode ser obtida por meio da equação:

$$MSS = MSU \cdot (1 + U)^{-1} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

MSS é a massa de solo seco (kg);

MSU é a massa de solo úmido (kg);

U é a umidade em base massa ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

Com TFSA umedecida e homogeneizada, era dada a sequência no processo de confecção de cada parcela experimental. Primeiramente era adicionado dentro dos vasos, um volume inicial de  $0,001 \text{ m}^3$  de solo umedecido. Posteriormente realizavam-se ciclos sucessivos de adição de um volume de  $0,002 \text{ m}^3$  de solo umedecido e compactação, até que se atingisse o volume desejado ( $0,00878 \text{ m}^3$ ).

Foram empregados cinco níveis de intensidade no processo de compactação, de acordo com a classe desejada de Ds. Para obter primeiro nível do fator Ds, a compactação era por meio de uma única queda do martelo (1 e 2) em uma altura de 0,1 m para cada  $0,002 \text{ m}^3$  de solo adicionado. Para obter o segundo nível, foram adotadas duas quedas livres sucessivas do martelo (1 e 2) em uma altura de 0,1 m para cada  $0,002 \text{ m}^3$  de solo adicionado. Para obter o terceiro nível, foi realizada a compactação por meio de duas quedas livres do martelo (1 e 2) em uma altura de 0,2 m para cada  $0,002 \text{ m}^3$  de solo adicionado. Para obter quarto nível, foi realizada a compactação por meio

de três quedas livres do martelo (1 e 2) em uma altura de 0,2 m para cada 0,002 m<sup>3</sup> de solo adicionado. Para obter quinto nível, foi realizada a compactação por meio de três quedas livres do martelo (1 e 2) em uma altura de 0,4 m para cada 0,002 m<sup>3</sup> de solo adicionado.

### 3.4 Determinação dos níveis do fator umidade do solo

A Figura 1 apresenta a curva de retenção de água no solo, baseado no modelo empregado por ROSS et al.(1991), para o NITOSSOLO Vermelho distroférico, ajustado por (BLAINSK, 2007).

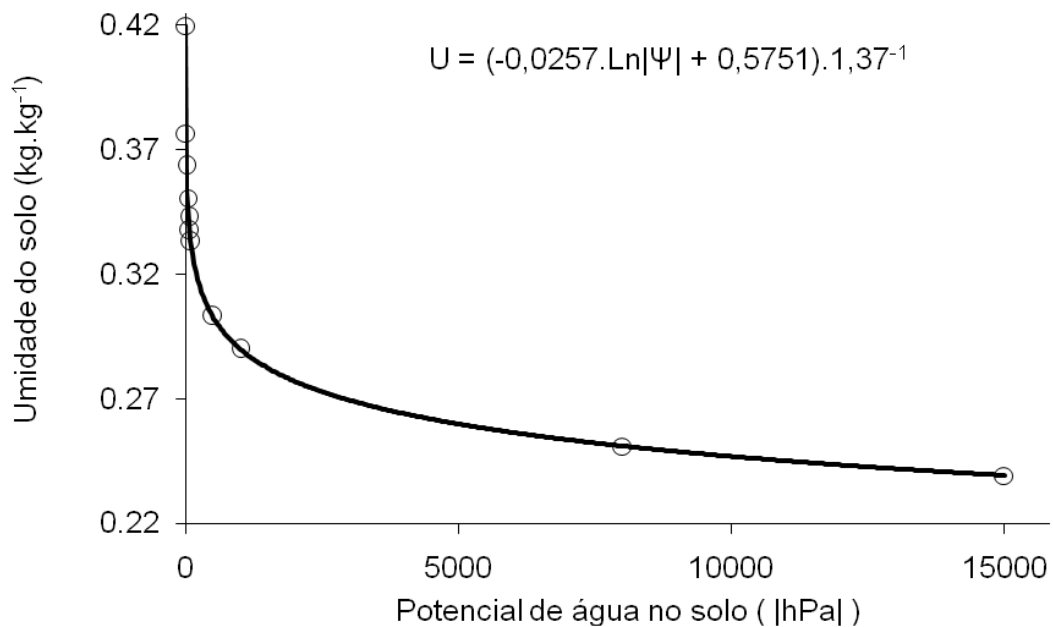


Figura 1- Curva de retenção de água no solo (kg.kg<sup>-1</sup>) em função do potencial de água no solo (|hPa|).

A seguir são apresentadas as equações da curva de retenção de água no solo da Figura 1.

$$U = (-0,0257.Ln|\psi|+0,5751).1,37^{-1} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

U é a umidade do solo em base massa (kg.kg<sup>-1</sup>);

$|\psi|$  é o módulo do potencial de água no solo (hPa).

$$|\Psi| = \exp^{[(U \cdot 1,37) - 0,5751] \cdot 0,0257^{-1}} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

$|\psi|$  é o módulo do potencial de água no solo (hPa);

U é a umidade do solo em base massa ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ).

Os níveis de umidade do solo utilizados foram originados a partir do seguinte processo: primeiramente utilizaram-se valores da umidade em base massa (U) na capacidade de campo ( $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$ ) e no ponto de murcha ( $0,24 \text{ kg.kg}^{-1}$ ), adotando-se a tensão de água no solo para capacidade de campo e ponto de murcha permanente utilizando os valores de -60 e -15000 hPa respectivamente com base na equação (2). Determinou-se a densidade média referente aos valores empregados de Ds no presente trabalho, a qual foi de  $1,06 \text{ Mg.m}^{-3}$ . De posse deste valor, obteve-se a umidade base volume na capacidade de campo ( $\Theta_{cc}$ ) e no ponto de murcha ( $\Theta_{pm}$ ), para o solo em questão, o que permitiu identificar a faixa de água disponível (AD) média para este.

A partir dos valores de  $\Theta_{cc}$  e AD, foram estabelecidos cinco níveis do fator umidade do solo, a saber: ( $\Theta_{cc}$ ); ( $\Theta_{cc} - 20\%AD$ ); ( $\Theta_{cc} - 40\%AD$ ); ( $\Theta_{cc} - 60\%AD$ ) e ( $\Theta_{cc} - 80\%AD$ ). Os valores de umidade assim obtidos, com base em volume, foram transformados para base massa, o que deu origem aos seguintes valores empregados no trabalho: 0,34; 0,32; 0,3; 0,28 e  $0,26 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

### 3.5 Semeadura e imposição do fator umidade do solo

Foi utilizada no experimento a cultivar de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) IPR Tangará, grupo carioca, com hábito de crescimento indeterminado, ciclo médio de 87 dias da emergência e potencial produtivo médio de  $3.326 \text{ kg.ha}^{-1}$  (IAPAR, 2012).



Foram utilizadas oito sementes de feijão por parcela experimental na semeadura (11/01/2012). Após a expansão completa do primeiro trifólio (31/01/2012) foi realizado o desbaste, deixando duas plantas por parcela experimental.

No período da semeadura até a expansão do segundo trifólio (11/02/2012), a umidade do solo foi mantida próxima da capacidade de campo, em todas as parcelas experimentais. Posteriormente à expansão do segundo trifólio foi imposta em todas as parcelas, a supressão hídrica (EMAM et al., 2010), até atingir a umidade 26% em base massa. Após esse processo, deu-se início aos tratamentos por meio da adição da água na parcela experimental, de modo que atingisse a umidade desejada.

A umidade desejada pode ser obtida, por meio da soma da MSS com o produto da MSS com a U. A umidade do solo foi mantida constante por meio da pesagem diária dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água por meio de tubo PVC perfurado e instalado no centro geométrico do vaso (BEUTLER & CENTURION, 2004b). Para esta medida foi utilizada uma balança da marca Kern CB 24 K2N com precisão de 2 gramas. Foi realizada a adição da água na porção central da unidade experimental por meio de um tubo de PVC 0,050 m, com o objetivo de garantir que a água fosse aplicada a partir da região central da distribuição do sistema radicular das plantas. O tubo de PVC com 0,10 m de comprimento, aberto nas extremidades, foi instalado com uma delas tangenciando a superfície do solo, de forma que a outra atingisse profundidade equivalente ao seu comprimento. Na sua parede foram feitas diversas perfurações, para possibilitar a distribuição de água no perfil do solo.

### **3.6 Adubação**

A adubação de semeadura em cada parcela experimental foi feita conforme a análise química do solo (tabela1) e de acordo com a recomendação técnica para a cultura do feijoeiro (IAPAR, 2003). Foi feito o planejamento da adubação de cada planta, tendo por referência a tabela de adubação para esta

cultura (IAPAR, 2003), a qual recomenda massa de adubo por unidade de área. Foi considerado no cálculo da quantidade de adubo necessário, duas observações por unidade experimental (correspondentes a duas plantas) e adotou-se uma densidade de semeadura de 200000 plantas por hectare (espaçamento 0,5 m; 10 plantas por metro), correspondente à população de plantas recomendada para a cultivar IPR Tangará.

A adubação de semeadura na unidade experimental foi de 0,95 gramas de sulfato de amônio; 2,30 gramas do formulado 0-20-0 e 0,52 gramas de cloreto de potássio. A adubação foi incorporada em cada vaso a 0,05m de profundidade abaixo das sementes de feijão.

Os valores de potássio, cálcio e magnésio enquadram-se como excelentes níveis para o fósforo apresenta teor médio e as relações Ca/Mg, Ca/K, Mg/K e (Ca+Mg)/K estão em teores ótimos.

A adubação de cobertura foi realizada nos 15 e 25 dias após a emergência das plantas, utilizando uma dose de 1,2 gramas de sulfato de amônio aos 15 dias após a emergência e 1,1 gramas de sulfato de amônio aos 25 dias após a emergência.

Tabela 1 - Análise de macronutrientes e micronutrientes do solo (camada 0 a 0,2 m), utilizado no experimento

Variável	Unidade	Quantidade
P	mg.dm <sup>-3</sup>	6,85
K	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,56
Ca	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	4,31
Mg	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	1,7
SB	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	6,57
CTC	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	11,92
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	5,35
H <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	5,3
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,05
Cu	mg.dm <sup>-3</sup>	15,5
Zn	mg.dm <sup>-3</sup>	4,5
Fe	mg.dm <sup>-3</sup>	44
Mn	mg.dm <sup>-3</sup>	175
MO	g.kg <sup>-1</sup>	76
Mo	g.dm <sup>-3</sup>	43,67
C	g.dm <sup>-3</sup>	25,33
V%		55,12
pH CaCl <sub>2</sub>		5
pH H <sub>2</sub> O		5,5
pH SMP		5,9
K%		4,7
Ca%		36,16
Mg%		14,26
Al%		0,42
H%		44,46
Ca/Mg		2,53
Ca/K		7,7
Mg/K		3,04
(Ca+Mg)/k		10,73

### **3.7 Tratos culturais**

Foi realizado o tutoramento do feijoeiro com ajuda de uma haste metálica instalada no centro do vaso. Quando necessário, foram realizadas aplicações de inseticidas para controle de população de afídeos e insetos desfolhadores.

### **3.8 Avaliação dos componentes de produção**

O término da coleta de dados das parcelas experimentais ocorreu no dia 16 de maio de 2012. Adotaram-se no trabalho, as seguintes variáveis respostas: massa relativa de grãos, lâmina relativa evapotranspirada e eficiência relativa na utilização da água. Na análise estatística foi fixado um nível de significância de 10%. As variáveis respostas de cada parcela experimental foram originadas por meio da média aritmética das observações de cada planta.

Foi realizada análise de regressão dos fatores principais para densidade do solo e umidade do solo e os desdobramentos dos fatores umidade do solo e densidade do solo.

Realizou-se análise de regressão múltipla das variáveis, sendo as equações da regressão múltipla validadas pelo teste “t”. Adotou-se o seguinte modelo matemático na regressão múltipla:  $Y = b_0 + b_1.Ds + b_2.U + b_3.Ds^2 + b_4.U^2 + b_5.Ds.U + b_6.Ds^2.U + b_7.U^2.Ds + b_8.Ds^3.U + b_9.U^3.Ds + E$ , sendo que Y é a variável resposta,  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_7, b_8, b_9$  são os coeficientes do modelo e E é o erro experimental.

### **3.9 Produção relativa de grãos (PRG)**

Foi determinada a massa de grãos média por planta, por meio da secagem em estufa a 62 graus Celsius por 72 horas, corrigindo para a umidade de 13% em base úmida. Posteriormente, os valores de cada parcela

experimental foram relativizados por meio da razão dos valores da parcela, pelo maior valor encontrado entre as 75 parcelas experimentais, transformando posteriormente essa variável em porcentagem, pela multiplicação por 100, obtendo a produção relativa de grãos (PRG).

### **3.10 Lâmina relativa evapotranspirada (LRE)**

Foi determinado a evapotranspiração média em cada vaso por meio da pesagem diária da parcela experimental. Os dados do processo de evapotranspiração média de cada parcela experimental foram somados, contando do início da coleta dos dados (11 de fevereiro de 2012) até o término do experimento (16 de maio 2012). O somatório dos valores de evapotranspiração foi transformado em lâmina total evapotranspirada. A lâmina total evapotranspirada foi relativizada por meio da razão dos valores da parcela pelo maior valor encontrado entre as 75 parcelas experimentais, transformando posteriormente essa variável em porcentagem pela multiplicação por 100.

### **3.11 Eficiência relativa na utilização da água (ERUA)**

Foi realizada a razão da produção de grãos (kg) pela quantidade de água consumida ( $m^3$ ) durante a imposição do fator U. Os valores dessa variável resposta foram relativizados em porcentagem, pelo maior valor encontrado entre as 75 parcelas experimentais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produção relativa de grãos (PRG)

Na Tabela 2 são apresentados alguns momentos estatísticos da distribuição dos valores obtidos para a produtividade (P) expressa em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Tabela 2 - Momentos estatísticos da distribuição de valores da P ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Coefficiente de variação %	Coefficiente de Assimetria	Coefficiente de Curtose
1391,6	1180,1	185,7	3810,5	870,9	63	0,74	-0,06

Destaca-se que a produção máxima foi de  $3810 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , (considerando uma população de referência adotada neste trabalho de 200000 plantas por hectare) esta produtividade é superior à média nacional desta cultura irrigada sob pivô central ( $2700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (FERNANDES, 2012). O coeficiente de variação da ordem de 63% permite verificar que o efeito dos fatores de tratamento impostos foi marcante, ocasionando substancial variação na resposta da cultura.

Para avaliar o efeito dos tratamentos sobre a produção da cultura, inicialmente buscou-se relacionar a PRG com a densidade do solo, tomando-se os valores médios desta variável em cada nível do fator umidade, para cada classe de densidade (Ds). Ajustou-se um modelo linear de PRG em função de Ds, conforme apresentado na Figura 2, o qual mostrou significativo para  $p < 0,1$ . Destaca-se que o aumento da Ds foi associado ao aumento da PRG, levando a uma produção 30% menor considerando a menor densidade do solo em relação a maior densidade do solo. Estes resultados permitem constatar que, para os valores médios de umidade, o incremento de densidade do solo, na faixa de valores empregados, está associado a um efeito benéfico sobre a produção da cultura, associado a uma melhor absorção de água pelas raízes das plantas como pode ser confirmado na Figura 8, sem atingir uma condição

restritiva, em termos de desenvolvimento do sistema radicular, que pudesse ter efeitos deletérios na produção.

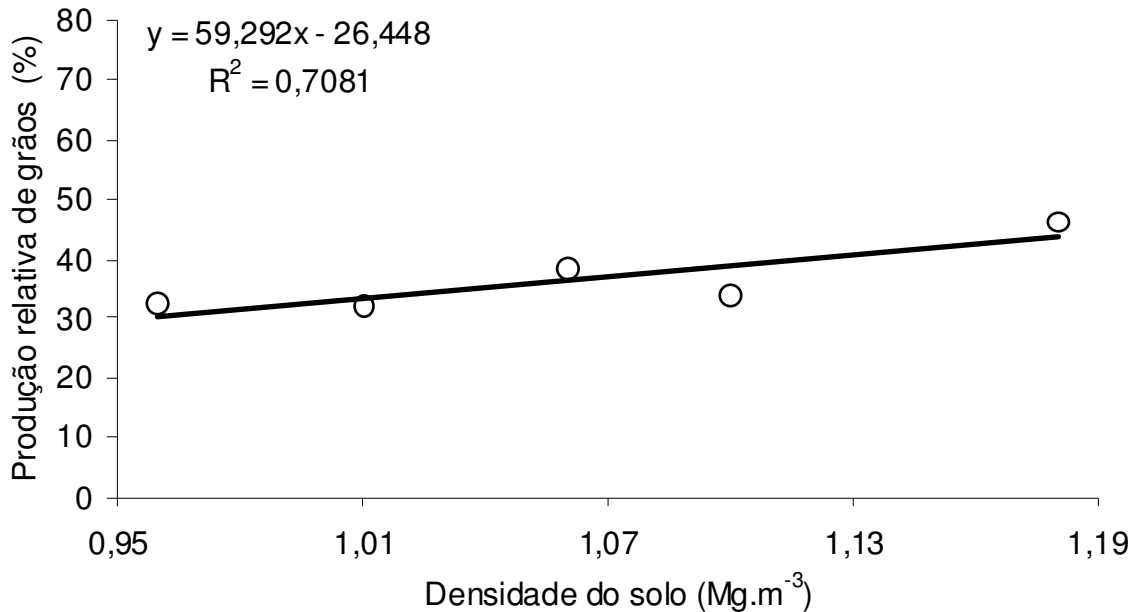


Figura 2 - Valores médios de PRG, nas diferentes umidades do solo, em função dos valores de Ds e modelo linear ajustado via regressão, significativo para  $p < 0,1$ .

Para avaliar o efeito do nível de umidade do solo sobre a produção da cultura, relacionaram-se os valores de PRG com a umidade do solo, tomando-se os valores médios desta variável nas diferentes densidades do solo, para cada classe de umidade (U). Ajustou-se um modelo quadrático de PRG em função de U, conforme apresentado na Figura 3, o qual se mostrou significativo para  $p < 0,1$ .

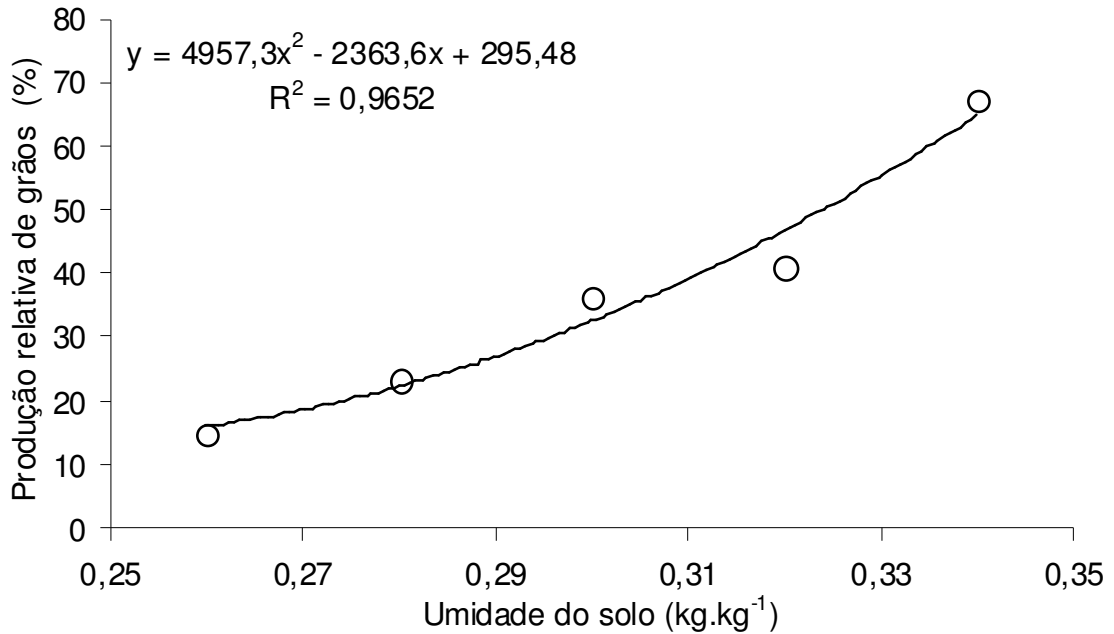


Figura 3 - Valores médios de PRG, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de U e modelo linear ajustado via regressão, significativo para  $p < 0,1$ .

Este modelo evidencia que os valores de PRG crescem com o acréscimo dos valores de U. Observa-se que, em média, a manutenção de U no valor de  $0,26 \text{ kg.kg}^{-1}$  implica em que a PRG seja cerca de 75% menor que o valor obtido para umidade de  $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

De acordo com a equação (3), valores de U de  $0,26$  e  $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$  apresentam potenciais de água no solo de  $-5000$  e  $-60 \text{ hPa}$  respectivamente. De forma semelhante, GUERRA (1995), trabalhando com três níveis de tensão de água no solo ( $-187$ ,  $-824$  e  $-1000 \text{ kPa}$ ) aplicados em três fases de desenvolvimento da cevada, relata que na condição de maior umidade do solo ( $-187 \text{ kPa}$ ), a cultura apresentou maior rendimento de grãos. SOUSA et al. (2009a) destacaram que a supressão da irrigação durante os diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro, interferiu, de modo negativo, nos componentes de rendimento, exceto para massa de 100 grãos. OLIVEIRA et al. (2011) estudando o efeito de lâminas de irrigação e de doses de fósforo na produção do feijão-caupi em campo, detectou efeito linear da lâmina de irrigação na resposta da produção de grãos.



A manutenção do turgor é essencial para a normal atividade celular e contribui para crescimento sob baixa disponibilidade de água (MARTÍNEZ et al., 2007). Quando a planta está sujeita a estresse hídrico, muitos de seus processos fisiológicos são afetados, tais como: abertura estomática, fotossíntese, síntese de proteínas, atividade enzimática e hormonal, dentre outros (VILELA & BULL, 1999).

Na literatura encontram-se valores de limite inferior de tensão de água no solo considerados como ótimos para o momento da irrigação para obtenção de altas produtividades, como nos trabalhos de (SOUSA et al., 2009a) e (SANTANA et al., 2009). Os autores encontraram valores de tensão de água no solo de -40 kpa e -22 kPa respectivamente. Utilizando a equação (2), a umidade do solo correspondente as tensões de -40 e -22 kPa, corresponde a valores de U de 0,31 e 0,32 kg.kg<sup>-1</sup> respectivamente. A manutenção do feijoeiro no valor U nos valores 0,31 e 0,32 kg.kg<sup>-1</sup>, mostra que há uma redução respectiva de 40% e 28% na PRG, comparando-se a produção na umidade do solo no valor de 0,34 kg.kg<sup>-1</sup>.

Ao se avaliar as relações entre PRG e Ds em cada nível de umidade (U), verifica-se na Figura 4, que ocorreram diferentes tendências, conforme o valor da umidade. Considerando o desdobramento da Ds dentro U no valor de 0,28 kg.kg<sup>-1</sup>, mostrado na Figura 4a, observa-se um efeito quadrático com ponto máximo de valor para a densidade de 1,1 Mg.m<sup>-3</sup>. QUEIROZ-VOLTRAN et al. (2000), estudando efeito da compactação no desenvolvimento da soja cultivar IAC-8, constatou que o número de folhas, área foliar, número de vagens, altura da planta, peso da matéria seca da raiz, do caule e da folha apresentaram relação quadrática com a densidade do solo, com redução de valores das mesmas para as maiores densidades.

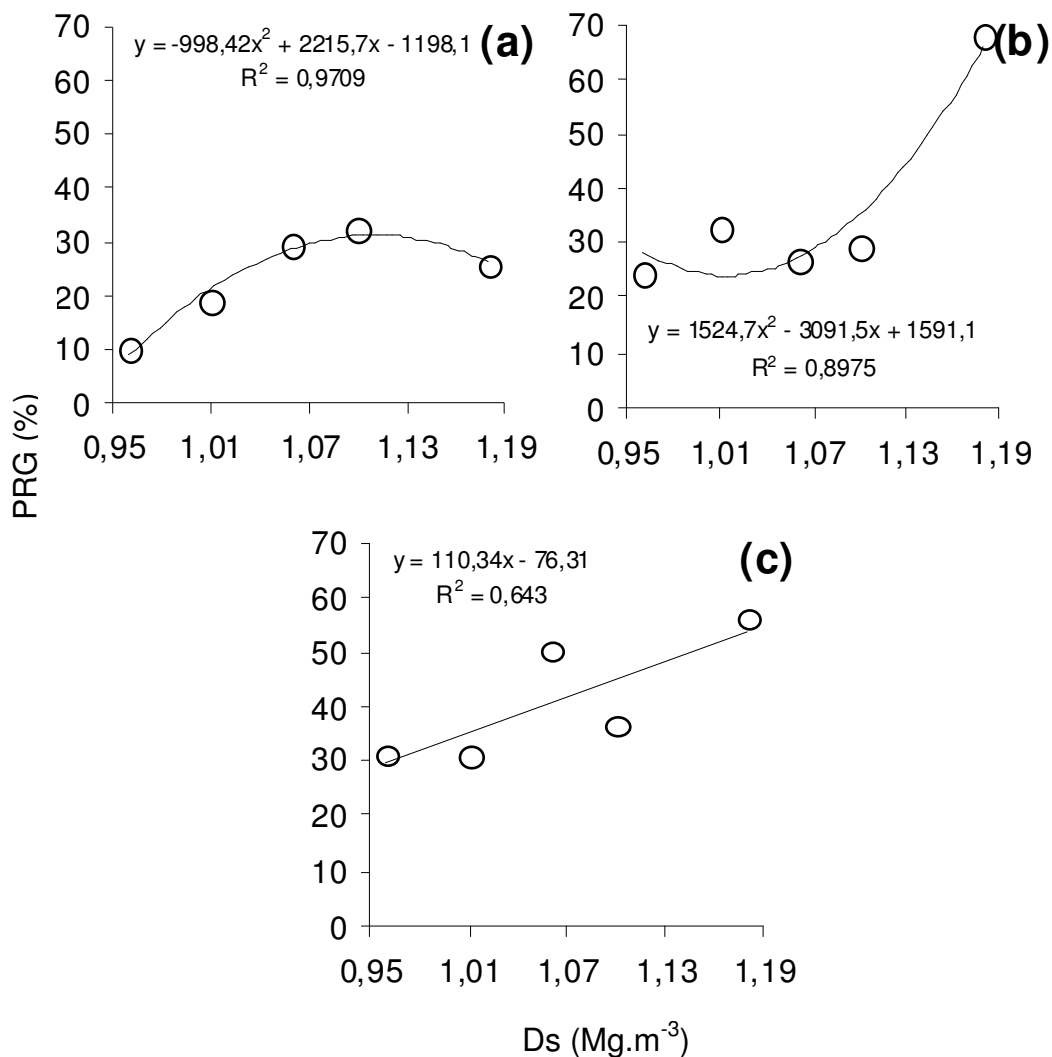


Figura 4 - Valores médios de PRG (%) em função dos valores de Ds (Mg.m<sup>-3</sup>), em três níveis de umidade do solo: 0,28 kg.kg<sup>-1</sup>(a); 0,3 kg.kg<sup>-1</sup>(b); 0,32 kg.kg<sup>-1</sup>(c) e modelos ajustados via regressão,  $p < 0,1$ .

Para os desdobramentos nas umidades 0,3 e 0,32 kg.kg<sup>-1</sup> (Figura 4b, c) verifica-se que o aumento da densidade do solo promoveu aumento dos valores de PRG. É provável que o aumento da Ds tenha proporcionado um melhor contato do sistema radicular com a matriz do solo, facilitando o acesso à água e, para essas condições de umidade do solo, não tenham ocorrido restrições físicas ao desenvolvimento radicular. Segundo VALICHESKI et al.(2012) a compactação melhora o contato do solo com a raiz, favorecendo a absorção de água e nutrientes, promovendo aumento da produção.

Observa-se que para a condição de umidade correspondente a 0,3 kg.kg<sup>-1</sup>, conforme Figura 4b, a produção na Ds de 0,96 Mg.m<sup>-3</sup> foi 57% inferior

em relação à produção obtida para o valor de  $D_s$  igual a  $1,18 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Para a condição de umidade correspondente a  $0,32 \text{ kg.kg}^{-1}$  conforme Figura 4c, a produção na  $D_s$  de  $0,96 \text{ Mg.m}^{-3}$  foi 45% inferior em relação à produção obtida para  $D_s$  de  $1,18 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Nota-se um menor benefício do aumento da  $D_s$  na PRG para o desdobramento na umidade de  $0,32 \text{ kg.kg}^{-1}$  em relação ao desdobramento na  $U$  de  $0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$ .

A análise das relações de valores entre PRG e umidade do solo, nas diferentes classes de  $D_s$ , segundo o desdobramento dos efeitos dos tratamentos, pode ser realizada a partir da observação da Figura 5. Nos gráficos apresentados (Figuras 5a, b, c, d, e), os valores de PRG apresentam a tendência geral de crescimento com o acréscimo dos valores de umidade do solo. Para a cultura de soja, BEUTLER & CENTURION (2003b) também identificaram este padrão de variação. A variação entre os valores máximo e mínimo de umidade acarretou uma redução de 72, 70, 84, 78 e 87%, respectivamente, para as densidades de 0,96; 1,01; 1,06; 1,1 e  $1,18 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Destaca-se que apenas para a menor densidade ( $0,96 \text{ Mg.m}^{-3}$ ), observou-se leve redução de PRG com a elevação da umidade, no primeiro intervalo de valores de umidade. As razões pela qual isto ocorreu devem estar associadas a fatores não controlados no presente trabalho mas não mudam a tendência principal descrita, evidenciada em todas as demais situações.

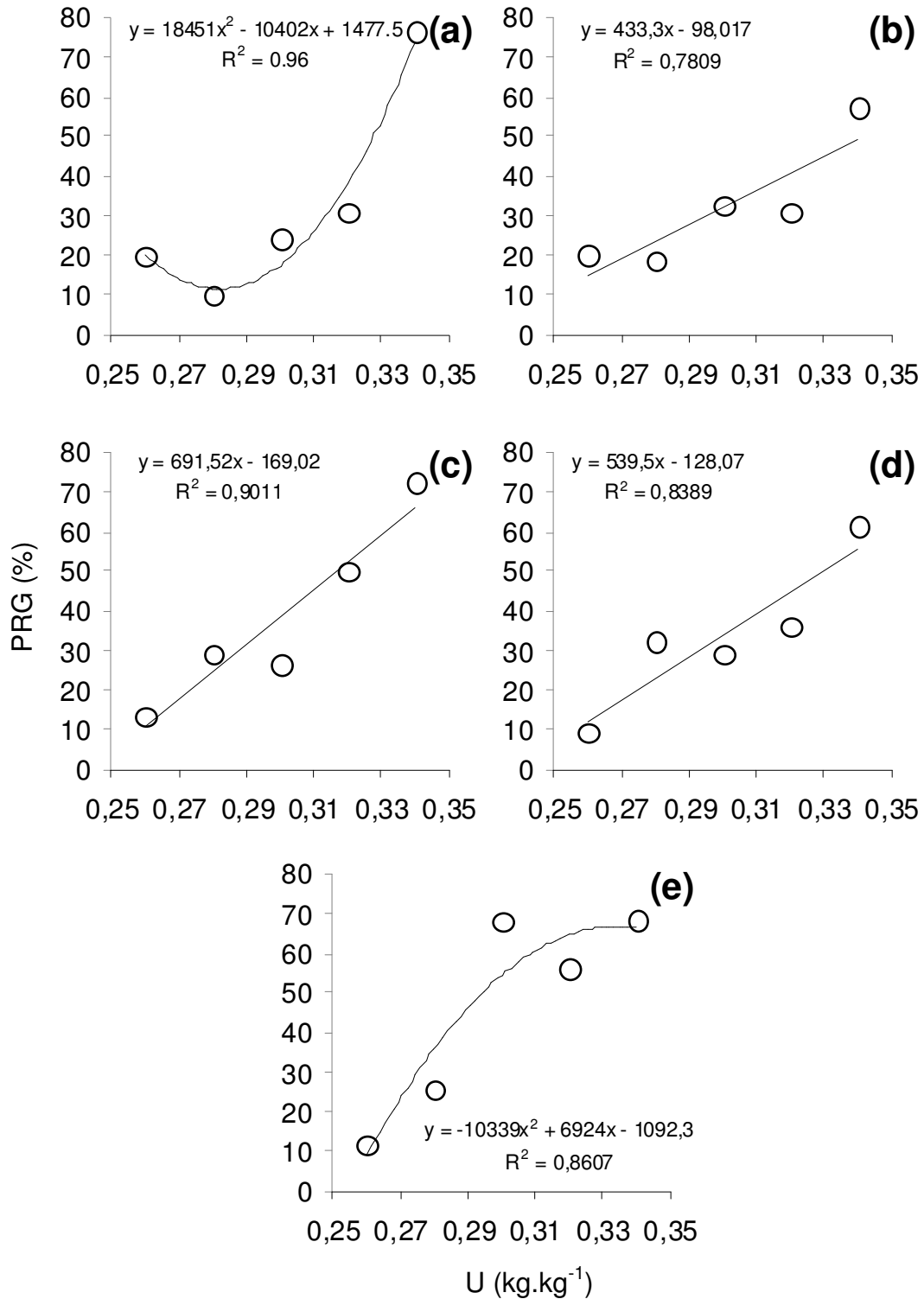


Figura 5 Valores médios de PRG em função dos valores de umidade, em cinco níveis de densidade do solo: 0,96 (a); 1,01 (b); 1,06 (c), 1,1 (d) e 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> (e) e modelos ajustados via regressão,  $p < 0,1$ .

Na Figura 6 é apresentada a superfície de valores de PRG em função de Ds e de U. A expressão que gera esta superfície foi ajustada via análise de regressão ao conjunto de valores experimentais, de acordo com a expressão:

$$\text{PRG} = 11367,17 - 10679,56.D_s - 78566,4.U + 131126,6.U^2 + 71754,03.D_s.U - 118803,5.U^2.D_s$$

Equação (4)

Em que:

PRG é a produção relativa de grãos (%);

Ds é a densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ );

U é a umidade do solo ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ).

O domínio desta função compreende valores de Ds entre 0,96 e 1,18  $\text{Mg.m}^{-3}$  e valores de U entre 0,26 e 0,34  $\text{kg.kg}^{-1}$ . Modelo polinomial significativo,  $P < 0,1$

Observa-se na Figura 6 que as maiores produções foram obtidas para U no valor de 0,34  $\text{kg.kg}^{-1}$ , independente da variação da Ds, fato corroborado pela não significância na análise de regressão para o desdobramento da Ds nesse nível de U. Para o valor fixo de U em 0,26  $\text{kg.kg}^{-1}$ , pode-se observar que existe uma relação linear inversa entre PRG e Ds.

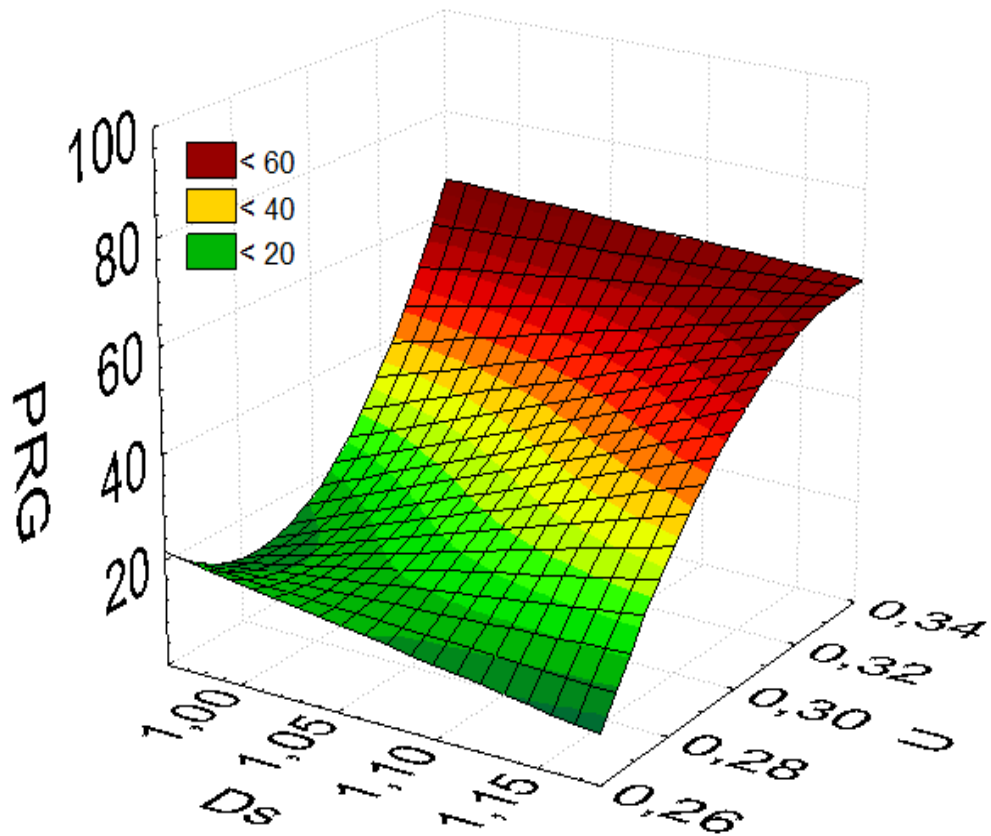


Figura 6 - Superfície de valores de PRG em função da  $D_s$  ( $Mg.m^{-3}$ ) e  $U$  ( $kg.kg^{-1}$ ).

Para melhor compreensão do efeito da densidade do solo sobre a PRG, ao longo do intervalo de valores de umidade do solo empregados no presente trabalho, a superfície de valores apresentada na Figura 6 foi seccionada em alguns valores intermediários, entre os limites extremos empregados. As linhas correspondentes à intersecção do plano de corte com a superfície são apresentadas na Figura 7.

As linhas (a, b, c, d) correspondem ao intercepto nos valores de umidade de 0,260; 0,261; 0,263 e 0,264  $kg.kg^{-1}$  respectivamente. Entre os valores de 0,260 e 0,264  $kg.kg^{-1}$ , o aumento de  $D_s$  promove redução de PRG. Para o valor de 0,265; 0,266; 0,267; 0,268  $kg.kg^{-1}$ , conforme as linhas (e, f, g, h), verifica-se que a variação da  $D_s$  não promove variação nos valores de PRG.

As linhas (i, j, k, l, m, n, o, p) correspondem aos valores da umidade do solo de 0,269; 0,272; 0,280; 0,290; 0,300; 0,310; 0,320 e 0,330  $kg.kg^{-1}$ , respectivamente. Pode-se verificar que à medida que cresce o valor da umidade do solo, torna-se mais evidente o efeito do crescimento da  $D_s$  no

crescimento dos valores de PRG, até valores da ordem de  $0,320 \text{ kg.kg}^{-1}$ . A partir deste valor, a declividade da reta torna-se menor. Destaca-se a evidente interação positiva entre a PRG e a umidade do solo, uma vez que o intercepto das retas cresce à medida que a umidade do solo cresce.

Para os valores de umidade abaixo de  $0,265 \text{ kg.kg}^{-1}$ , o efeito deletério da  $D_s$  sobre a PRG pode estar associado ao fato de que, nestas condições, o aumento da  $D_s$  é suficiente para promover restrição física ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, restringindo a produção. Para os valores mais elevados de umidade, esta restrição física não foi atingida, permitindo que as plantas respondessem positivamente ao aumento da densidade, por meio de uma maior facilidade de acesso à água.

Com base nos resultados identificados no presente trabalho, observa-se que a RP que esteve associada a restrições nos valores de PRG, assumiu valores bem mais elevados que os usualmente identificados em literatura.

De acordo com a equação (3), para potenciais entre  $-3100 \text{ hPa}$  e  $-60 \text{ hPa}$  para a condição de umidade entre  $0,269$  e  $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$  respectivamente, o aumento de  $D_s$  promove incrementos na PRG. Para potenciais entre  $-4000$  e  $-5000 \text{ hPa}$  para a condição de umidade entre  $0,264$  e  $0,260 \text{ kg.kg}^{-1}$  respectivamente, o aumento de  $D_s$  promove decréscimos na PRG.

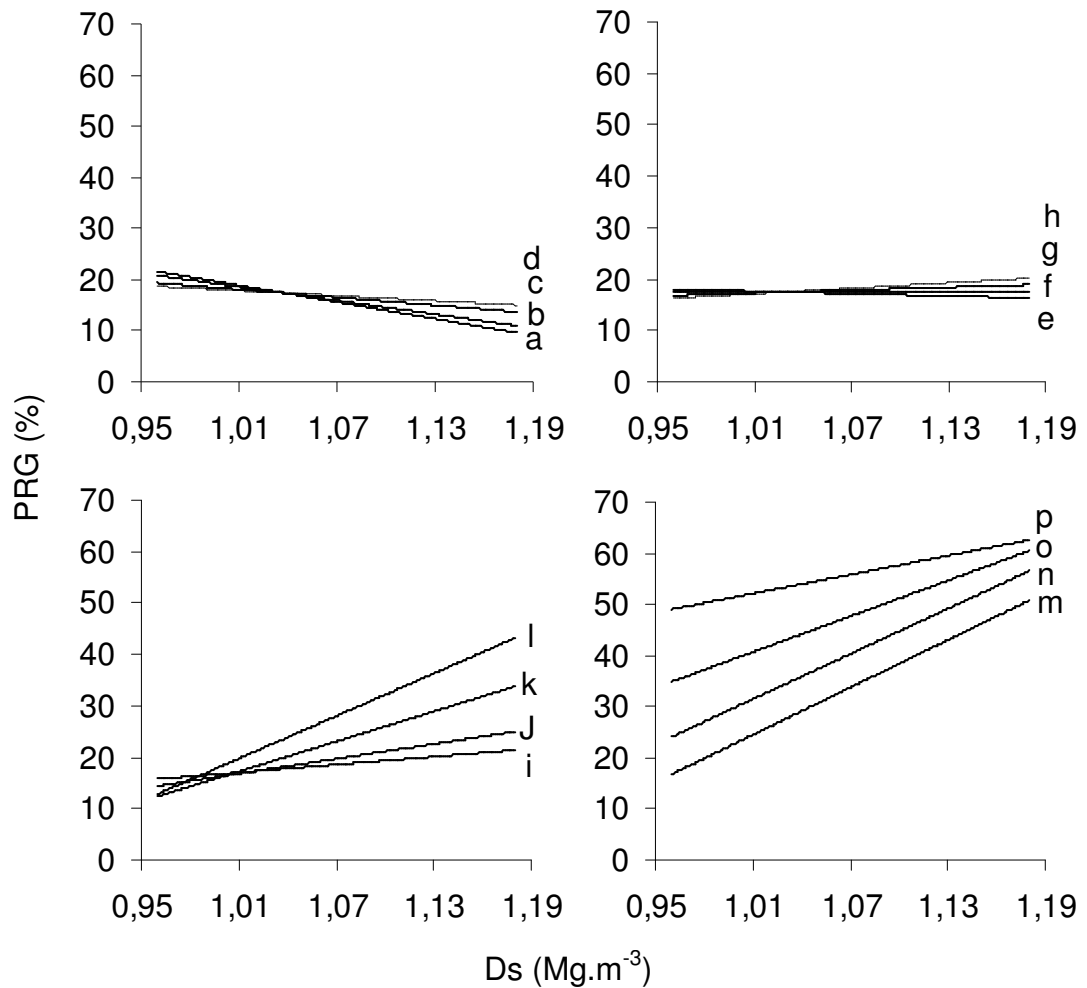


Figura 7 – Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da PRG com variação da  $D_s$  ( $Mg.m^{-3}$ ). As retas a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p apresentam as linhas de corte com a superfície de valores nos valores de  $U$ ,  $0,26 kg.kg^{-1}$  (a);  $0,261 kg.kg^{-1}$  (b);  $0,263 kg.kg^{-1}$  (c);  $0,264 kg.kg^{-1}$  (d);  $0,265 kg.kg^{-1}$  (e);  $0,266 kg.kg^{-1}$  (f);  $0,267 kg.kg^{-1}$  (g);  $0,268 kg.kg^{-1}$  (h);  $0,269 kg.kg^{-1}$  (i);  $0,272 kg.kg^{-1}$  (j);  $0,28 kg.kg^{-1}$  (k);  $0,29 kg.kg^{-1}$  (L);  $0,30 kg.kg^{-1}$  (M);  $0,31 kg.kg^{-1}$  (n);  $0,32 kg.kg^{-1}$  (o);  $0,33 kg.kg^{-1}$  (p).

#### 4.2 Lâmina relativa evapotranspirada (LRE)

Na Tabela 3 são apresentados alguns momentos estatísticos da distribuição dos valores obtidos para a lâmina evapotranspirada (L) em mm. O valor máximo da lâmina evapotranspirada observado é semelhante ao valor encontrado no trabalho de (GUERRA, 1995).



Tabela 3 - Momentos estatísticos da distribuição de valores da L (mm)

Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Coefficiente de variação %	Coefficiente de Assimetria	Coefficiente de Curtose
323,2	302,3	97,6	891,7	169,1	52	0,99	0,95

De acordo com a análise de regressão do fator principal Ds (Figura 8), verifica-se que, em média, o aumento da Ds promoveu um aumento da LRE. Observa-se que a LRE com Ds de 0,96 é cerca de 21% menor comparando-se com o valor obtido com Ds de 1,18 Mg.m<sup>-3</sup>. Considerando a análise de regressão do fator principal Ds, observa-se que uma queda na LRE na ordem de 21% (Figura 8), acarretou um declínio PRG na ordem de 30% (Figura 2).

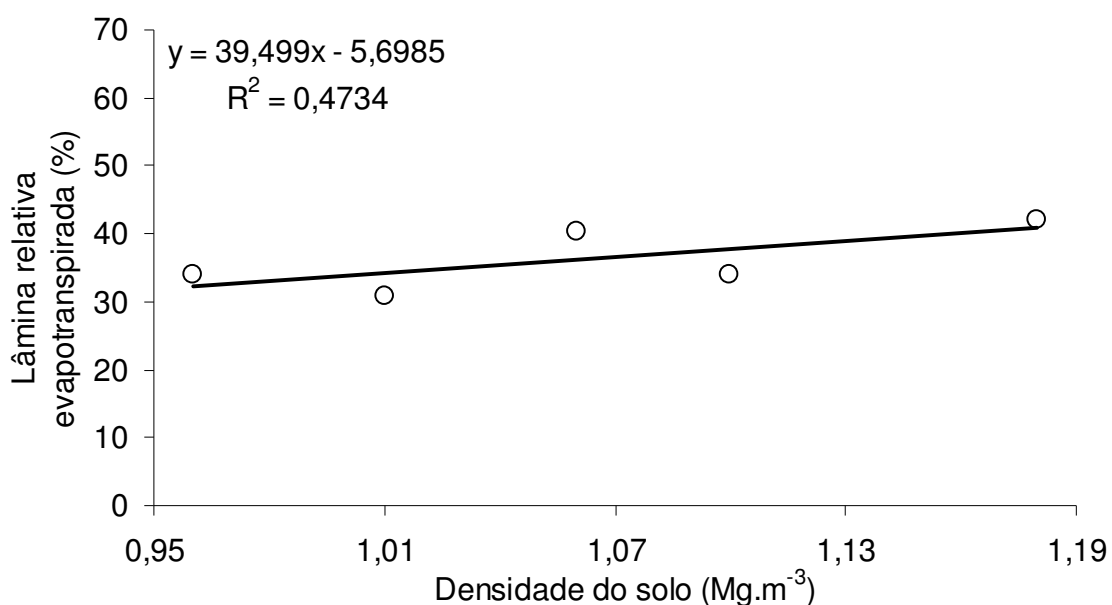


Figura 8 - Valores médios de LRE, nas diferentes umidades do solo, em função dos valores de Ds e modelo linear ajustado via regressão, significativo para  $p < 0,1$ .

Na análise de regressão do fator principal U (Figura 9), observa-se que, em média, a manutenção de U no valor de 0,26 kg.kg<sup>-1</sup> apresenta uma LRE de 66% menor comparando-se com a condição de U de 0,34 kg.kg<sup>-1</sup>. Observa-se na Figura 9, que maior U acarreta em maior LRE. Resultados semelhantes

foram observados nos trabalhos com *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus grandis* e *Brachiaria brizantha* (SILVA et al., 2004); em mamona (JUNIOR et al., 2008); em alface (SANTOS & PEREIRA, 2004) e em feijão (WAKRIM et al., 2005). Uma redução na LRE de 66% relacionou-se com uma queda nos valores de PRG de 75%.

Constata-se que, uma pequena redução da LRE acarreta um maior decréscimo da PRG, como ocorre na regressão do fator principal Ds (Figura 8).

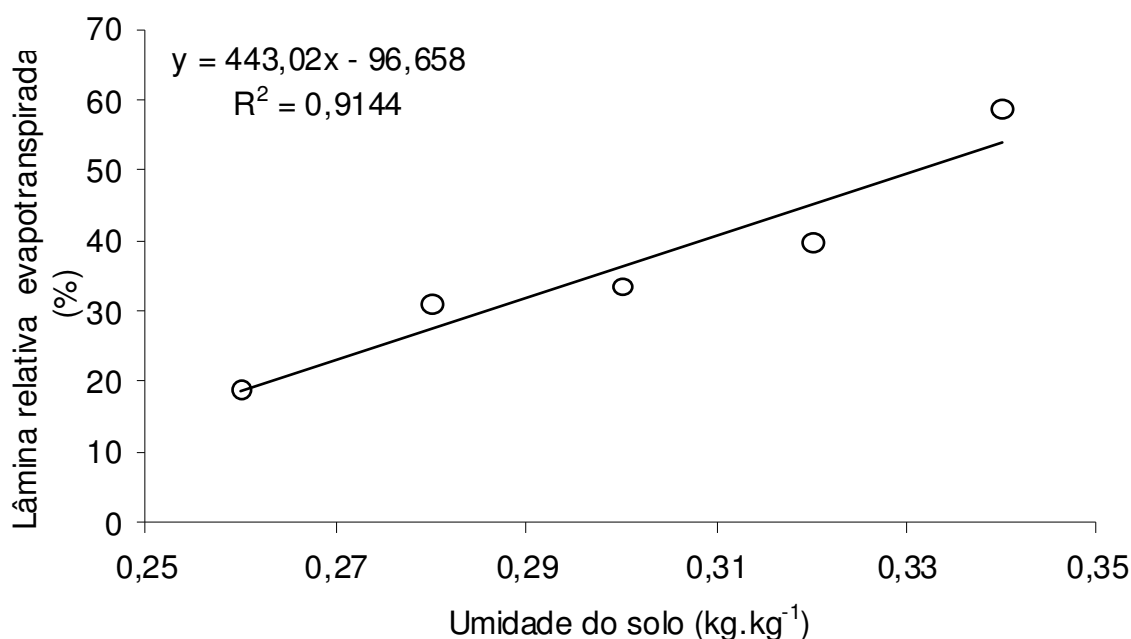


Figura 9 - Valores médios de LRE, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de U e modelo linear ajustado via regressão, significativo para  $p < 0,1$ .

Nos desdobramentos da LRE, observa-se que a U no valor de 0,28 kg.kg<sup>-1</sup> (Figura 10), há um efeito quadrático em função da Ds, com ponto de máximo de 1,08 Mg.m<sup>-3</sup>.

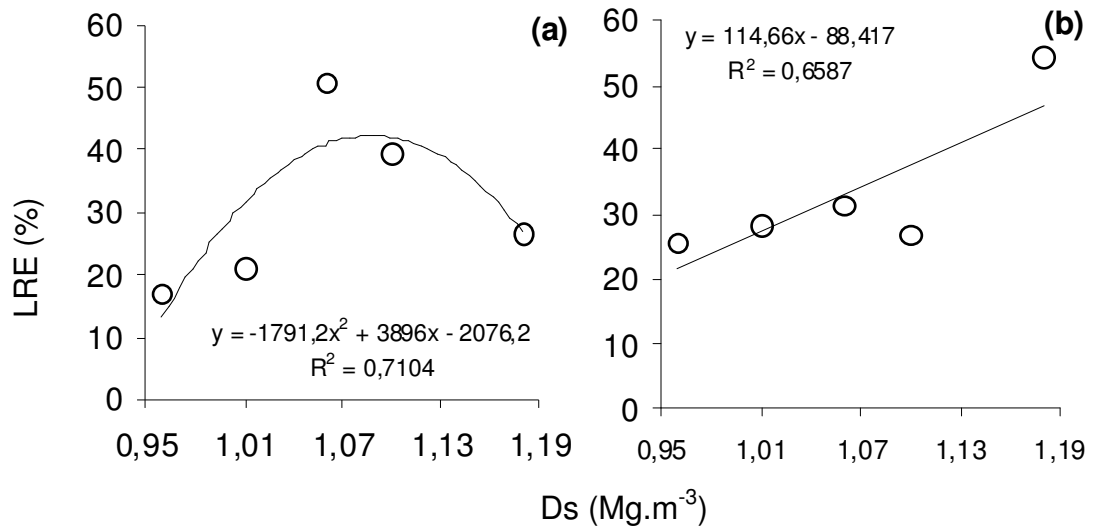


Figura 10 - Valores médios da LRE em função dos valores de DS, em dois níveis de U : 0,28 kg.kg<sup>-1</sup>(a); 0,3 kg.kg<sup>-1</sup> (b) e modelos ajustados via regressão,  $p < 0,1$ .

Para os desdobramentos da LRE em função de U nos diferentes níveis de Ds, observa-se que para todos os desdobramentos (Figura 11), ocorre o aumento da produção com acréscimo da U. Quando a umidade do solo é reduzida de 0,34 a 0,26 kg.kg<sup>-1</sup>, há uma queda da LRE na ordem de 74; 73; 58; 59 e 51% nos níveis de Ds de 0,96; 1,01; 1,06; 1,1 e 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> respectivamente. A menor resposta da variação da U quando ocorre o aumento da Ds é devido ao aumento da facilidade da transferência da água do solo para o sistema radicular gerada pelo adensamento do solo.

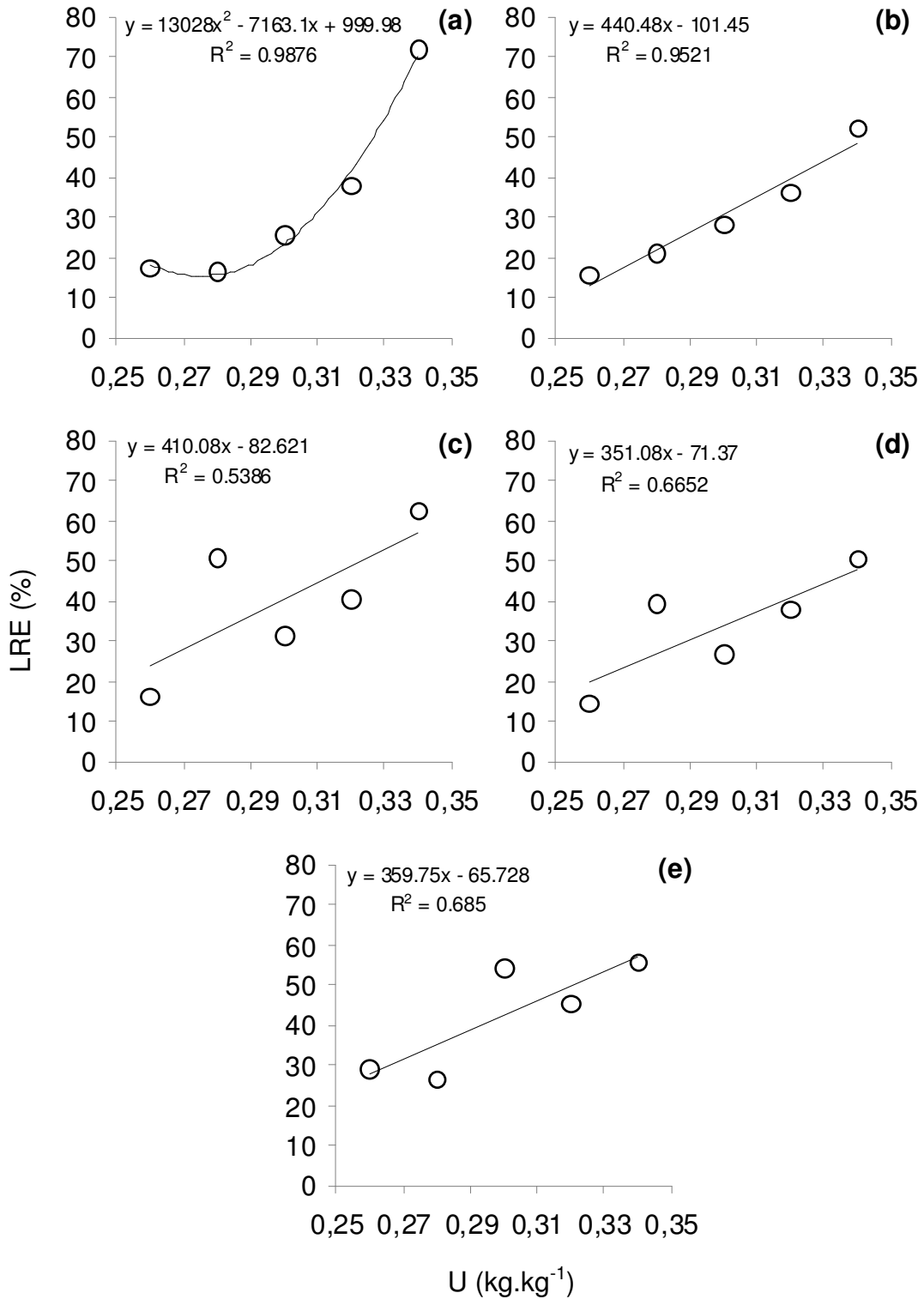


Figura 11 - Valores médios da LRE em função dos valores de U, em cinco níveis de densidade do solo 0,96 Mg.m<sup>-3</sup> (a); 1,01 Mg.m<sup>-3</sup> (b); 1,06 Mg.m<sup>-3</sup> (c); 1,1 Mg.m<sup>-3</sup> (d); 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> (e) e modelos ajustados via regressão,  $p < 0,1$ .

Na Figura 12 é apresentada a superfície de valores da LRE em função de Ds e de U. A expressão que gera esta superfície foi ajustada via análise de regressão ao conjunto de valores experimentais, de acordo com a expressão:

$$\text{LRE} = -2407,86 - 3877,86.Ds^2 + 28588,52.U^2 + 50631,78.Ds.U - 246132,97.U^2.Ds + 246582,89.U^3.Ds$$

Equação 5

Em que:

LRE é a lâmina relativa evapotranspirada (%);

Ds é a densidade do solo ( $\text{Mg.m}^{-3}$ );

U é a umidade do solo ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ).

O domínio desta função compreende a valores de Ds entre 0,96 e 1,18  $\text{Mg.m}^{-3}$  e valores de U entre 0,26 e 0,34  $\text{kg.kg}^{-1}$ . Modelo polinomial significativo,  $P < 0,1$ .

Pode-se observar na Figura 12, que a U tem efeito diretamente proporcional na LRE. Observa-se que a U é o fator mais relevante no processo de evapotranspiração.

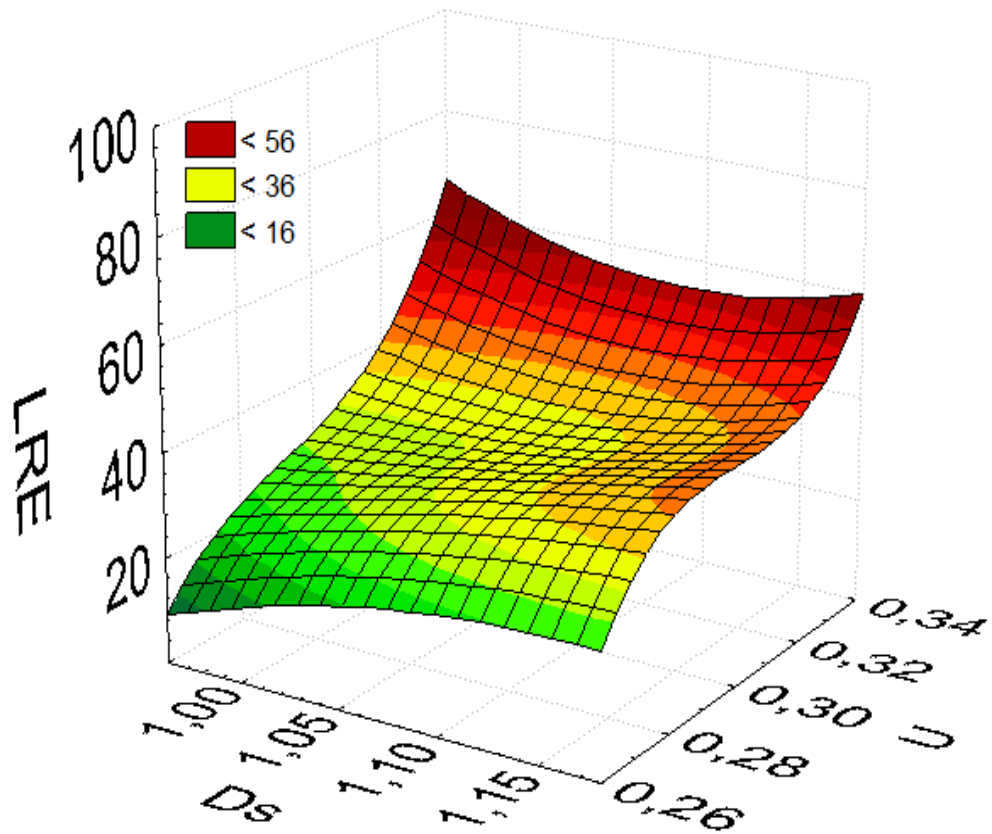


Figura 12 - Superfície de valores de LRE em função da  $D_s$  ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ) e  $U$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ).

A Figura 13 corresponde à intersecção do plano de corte com a superfície de valores. Percebe-se que entre no intervalo de  $U$  entre 0,318 a 0,324  $\text{kg.kg}^{-1}$  (linha e, f, g, h), praticamente não há variação da LRE em função da  $D_s$ . Nos valores de  $U$  menores que 0,318  $\text{kg.kg}^{-1}$  (linha e), repara-se o aumento da  $D_s$  promove um aumento da LRE. Nota-se que  $U$  maior que 0,324  $\text{kg.kg}^{-1}$  (linha h) o aumento da  $D_s$  reduziu a LRE.

Utilizando a equação (3), para a condição de contorno 0,318 a 0,324  $\text{kg.kg}^{-1}$  e  $D_s$  variando entre 0,96 e 1,18  $\text{Mg.m}^{-3}$ , a faixa de potencial de água no solo entre -164 e -227 hPa não há variação na LRE em função da variação da  $D_s$ .

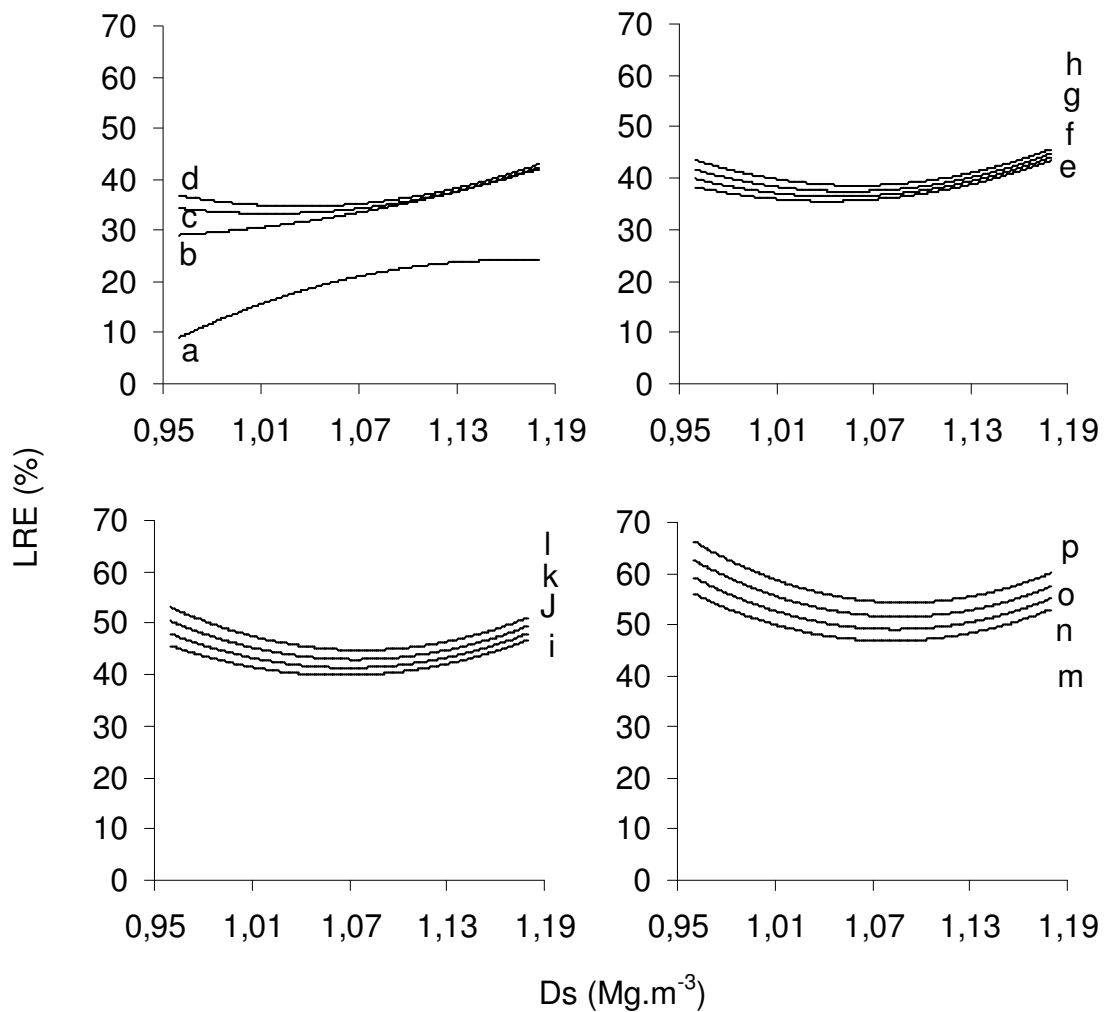


Figura 13 Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da LRE com variação da  $D_s$  ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ). As retas a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p apresentam as linhas de corte com a superfície de valores nos valores de  $U$ ,  $0,26 \text{ kg.kg}^{-1}$  (a);  $0,30 \text{ kg.kg}^{-1}$  (b);  $0,312 \text{ kg.kg}^{-1}$  (c);  $0,316 \text{ kg.kg}^{-1}$  (d);  $0,318 \text{ kg.kg}^{-1}$  (e);  $0,32 \text{ kg.kg}^{-1}$  (f);  $0,322 \text{ kg.kg}^{-1}$  (g);  $0,324 \text{ kg.kg}^{-1}$  (h);  $0,326 \text{ kg.kg}^{-1}$  (i);  $0,328 \text{ kg.kg}^{-1}$  (j);  $0,33 \text{ kg.kg}^{-1}$  (k);  $0,332 \text{ kg.kg}^{-1}$  (L);  $0,334 \text{ kg.kg}^{-1}$  (M);  $0,336 \text{ kg.kg}^{-1}$  (n);  $0,338 \text{ kg.kg}^{-1}$  (o);  $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$  (p).

#### 4.2 Eficiência relativa na utilização da água (ERUA)

Na Tabela 4 são apresentados alguns momentos estatísticos da distribuição dos valores obtidos para eficiência na utilização da água (EUA) em  $\text{kg.m}^{-3}$ .

O valor máximo obtido é próximo aos valores encontrados na literatura como nos trabalhos de (OLIVEIRA et al., 2005; FARIA et al., 2012; ANTUNES, 2012).

Tabela 4 - Momentos estatísticos da distribuição de valores da EUA ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de variação %	Coeficiente de Assimetria	Coeficiente de Curtose
0,52	0,55	0,048	0,96	0,17	33	-0,41	0,24

O desdobramento do fator principal U (Figura 14), revela-se que há uma redução linear de 24% na ERUA quando ocorre uma redução no valor de U de 0,34 para 0,26  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de JUNIOR et al. (2008), trabalhando com duas cultivares de mamona submetida a diferentes umidades do solo, constataram que a eficiência na utilização da água em função da água disponível, tem efeito linear crescente. Contudo, NASCIMENTO et al. (2011) trabalhando com diferentes umidades do solo para a cultura do gergelim, encontraram resposta linear decrescente da eficiência na utilização da água em função de maiores níveis de água disponível no solo, contrariando os resultados encontrados neste trabalho.



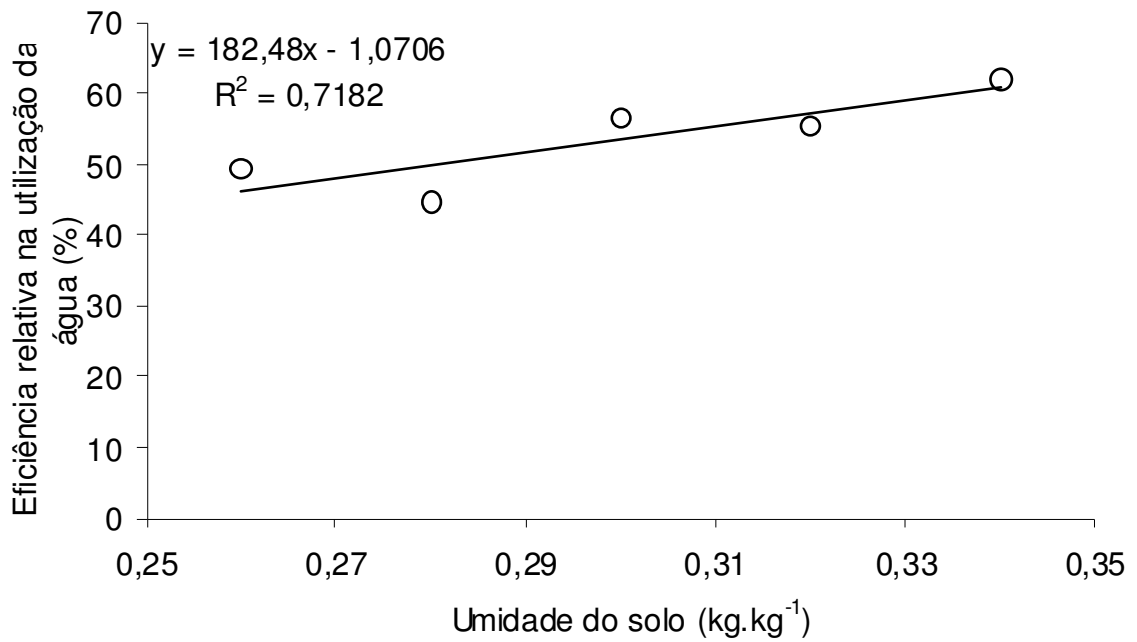


Figura 14 - Valores médios de ERUA, nas diferentes densidades do solo, em função dos valores de U e modelo linear ajustado via regressão, significativo para  $p < 0,1$ .

Para a EURA, não encontrou ajuste para os conjuntos de dados na análise de regressão do fator principal Ds. Observa-se na Figura 15 que o desdobramento da ERUA em função de Ds, para o nível de U de  $0,26 \text{ kg.kg}^{-1}$ , há um decréscimo médio de 59 % na ERUA com o aumento da Ds de  $0,96$  para  $1,18 \text{ Mg.m}^{-3}$ .

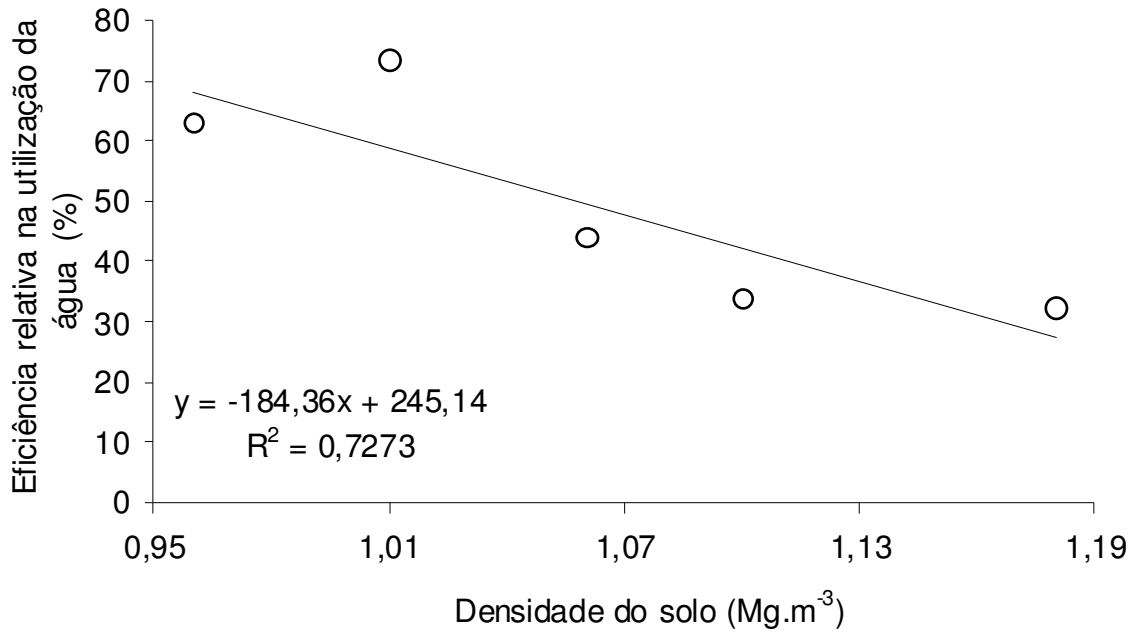


Figura 15 - Valores médios de ERUA em função dos valores de Ds, no nível de umidade do solo: 0,26 kg.kg<sup>-1</sup>. Modelo ajustado via regressão,  $p < 0,1$ .

Nas figuras 16a e 16b observa-se que para esses desdobramentos nos níveis de Ds 1,06 e 1,1 Mg.m<sup>-3</sup> há uma relação linear crescente entre a ERUA em função da U. Entretanto, para o desdobramento no nível de Ds de 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> ocorre um efeito quadrático com ponto de máximo de 0,32 kg.kg<sup>-1</sup>. O efeito quadrático para o desdobramento no nível de Ds de 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> é justificado pela regressão quadrática no desdobramento da PRG e do efeito linear na LRE para o nível de Ds de 1,18 Mg.m<sup>-3</sup>. Resultados semelhantes são encontrados nos trabalhos com feijoeiro de (SANTANA et al., 2009; JUNIOR et al., 2002).

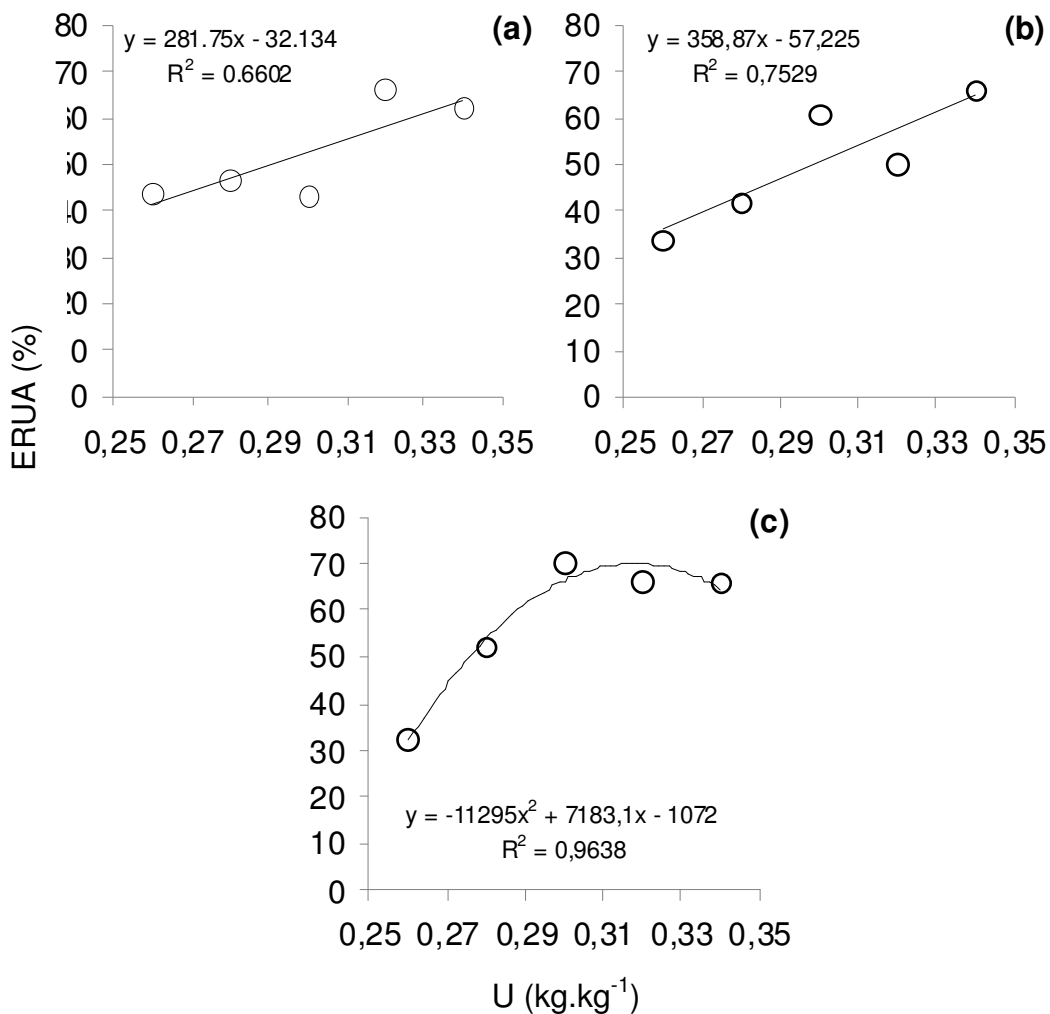


Figura 16 - Valores médios da ERUA em função dos valores de U, em três níveis de densidade do solo: 1,06 Mg.m<sup>-3</sup> (a); 1,1 Mg.m<sup>-3</sup> (b); 1,18 Mg.m<sup>-3</sup> (c). Modelos ajustados via regressão,  $p < 0,1$ .

Na Figura 17 é apresentada a superfície de valores da ERUA em função de Ds e de U. A expressão que gera esta superfície foi ajustada via análise de regressão ao conjunto de valores experimentais, de acordo com a expressão:

$$ERUA = 10534,12 - 6769,93.Ds - 68245,9.U + 109871,1.U^2 + 33080,63.Ds.U - 11312.U^3.Ds. \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

ERUA é a eficiência relativa da utilização da água (%);

Ds é a densidade do solo (Mg.m<sup>-3</sup>);

U é a umidade do solo ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ).

O domínio desta função compreende valores de Ds entre 0,96 e 1,18  $\text{Mg.m}^{-3}$  e valores de U entre 0,26 e 0,34  $\text{kg.kg}^{-1}$ . Modelo polinomial significativo,  $P < 0,1$ .

Observando a superfície de resposta da ERUA, nota-se que em condições de U de 0,26  $\text{kg.kg}^{-1}$ , o aumento da Ds gera uma acentuada queda na ERUA, à medida que aumenta o valor de U, há uma redução do efeito deletério da Ds na ERUA, até o ponto que a Ds não apresenta efeito na ERUA.

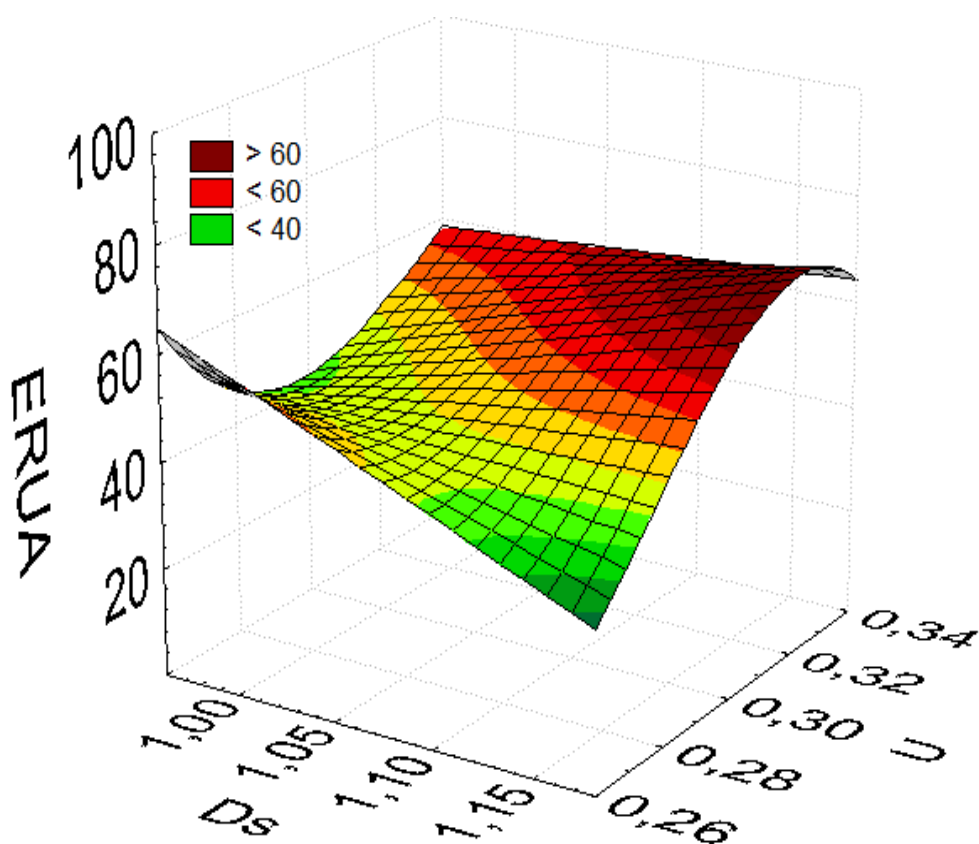


Figura 17 - Superfície de valores da ERUA em função da Ds em  $\text{Mg.m}^{-3}$  e U em  $\text{kg.kg}^{-1}$ .

Na Figura 18 estão apresentadas as linhas correspondentes à intersecção do plano de corte com a superfície de valores.

As linhas (e, f, g, h) (Figura 18) correspondem ao intercepto no valor de U de 0,278; 0,279; 0,280; 0,281  $\text{kg.kg}^{-1}$  respectivamente. Observa-se que para estas condições a variação da Ds não alterou mudanças perceptíveis na

ERUA. Contudo quando a  $U$  é menor que  $0,278 \text{ kg.kg}^{-1}$  (linha e), o aumento da  $D_s$  promove uma redução na ERUA. Para valores de  $U$  maior que  $0,281 \text{ kg.kg}^{-1}$  (linha h), observa-se que o aumento da  $D_s$  promove melhoria na ERUA.

De acordo com a equação (3), para valores de  $U$  entre  $0,278$  e  $0,281 \text{ kg.kg}^{-1}$ , tais valores de  $U$  correspondem a valores de potencial de água no solo de entre  $-1900$  e  $-1600 \text{ hPa}$  respectivamente. Portanto, para potenciais entre  $-1900$  e  $-1600 \text{ hPa}$ , a  $D_s$  não limitou a PRG. Para potenciais entre  $-1550 \text{ hPa}$  e  $-60 \text{ hPa}$  para a condição de umidade entre  $0,282$  e  $0,34 \text{ kg.kg}^{-1}$  respectivamente, o aumento de  $D_s$  promove incrementos na PRG. Para potenciais entre  $-2000$  e  $-5000 \text{ hPa}$  para a condição de umidade entre  $0,277$  e  $0,260 \text{ kg.kg}^{-1}$  respectivamente, o aumento de  $D_s$  promove decréscimos na ERUA

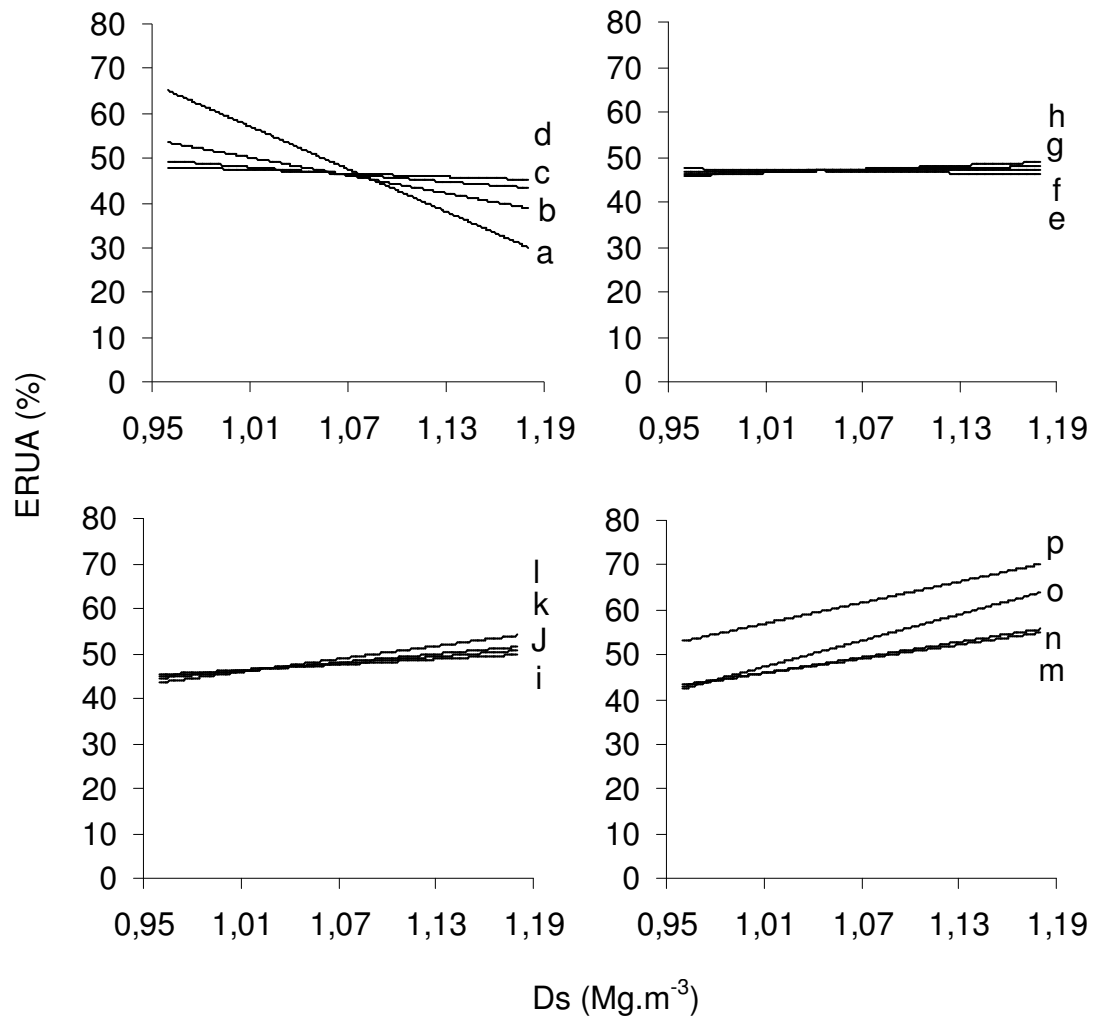


Figura 18 - Linhas de intersecção do plano de corte com a superfície de valores da ERUA com variação da Ds (Mg.m<sup>-3</sup>). As retas a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p apresentam as linhas de corte com a superfície de valores nos valores de U, 0,26 kg.kg<sup>-1</sup> (a); 0,27 kg.kg<sup>-1</sup> (b); 0,275 kg.kg<sup>-1</sup> (c); 0,277 kg.kg<sup>-1</sup> (d); 0,278 kg.kg<sup>-1</sup> (e); 0,279 kg.kg<sup>-1</sup> (f); 0,28 kg.kg<sup>-1</sup> (g); 0,281 kg.kg<sup>-1</sup> (h); 0,282 kg.kg<sup>-1</sup> (i); 0,283 kg.kg<sup>-1</sup> (j); 0,284 kg.kg<sup>-1</sup> (k); 0,287 kg.kg<sup>-1</sup> (L); 0,288 kg.kg<sup>-1</sup> (M); 0,89 kg.kg<sup>-1</sup> (n); 0,30 kg.kg<sup>-1</sup> (o); 0,33 kg.kg<sup>-1</sup> (p).

## **5 CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram constatar que a produção da cultura e a eficiência na utilização da água foi limitada pelos maiores valores de densidade do solo, quando a umidade do solo foi mantida nos menores valores. Para valores de umidade mais elevados, a resposta da cultura foi diretamente relacionada com a densidade do solo.

A lâmina evapotranspirada teve um pequeno decréscimo com o aumento da densidade do solo para valores de umidade mais elevados. Para valores de umidade menores, a lâmina evapotranspirada cresceu com o aumento da densidade do solo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, R. C, COSTA, L. M. da, FILHO, W. M, REGAZZI, A. J. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. *Revista Ceres*, v.44, n.254, p.421-431, 1997.

ALVES, W. W.A.; ALBUQUERQUE, J. H. de.; OLIVEIRA, F. A. de.; AZEVEDO, C. A. V. de.; NETO, J. D. Água disponível no solo e adubação fosfatada: efeito sobre o crescimento e desenvolvimento do milho. *Revista Verde*, Mossoró, v.4, n.1, p.47-53, 2009.

ANTUNES, F. M. Parcelamento da fertirrigação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2012, 48 p. Dissertação de mestrado em agronomia.

ASSIS, F. N. de. & VERONA, L. A. F. Consumo de água e coeficiente de cultura do sorgo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.26, n.5, p.665-670, 1991.

ASSIS, R. L. de.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; FILHO, A. C. Avaliação da resistência à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n.3, p. 5580 568, 2009.

AZEVEDO, B. M. de.; BASTOS, F. G. C.; VIANA, T. V. de. A.; RÊGO, J. de. L.; D'ÁVILLA, J. H. T. Efeitos de níveis de irrigação na cultura da cultura da melancia. *Revista Ciência Agronômica*, v. 36, n.1, 2005.

BENGOUGH, A. G, CROSER, C, PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. *Plant and soil*, v.189, n. 155-164, 1997.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MULLER, S. F.; SANTOS, A. O; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.6, p. 581-588, 2004c.

BEUTLER, A. N. Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agronômicas de soja e arroz de sequeiro. Jaboticabal. Universidade Estadual Paulista. Tese de doutorado em agronomia. 2003a.

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, 2003b.



BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois Latossolos. Engenharia Agrícola, v. 24, n.1, p. 142-149, 2004b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. Ciência Rural, v.34, n.6, p.1793-1800, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P da. C.; LEONEL, C. L.; JOÃO, A. de. 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, p.1223-1232, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; ALVES, B. J.; WAGNER, G. P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. Acta Scientiarum Agronomy, v.31, n.2, p.359-364, 2009.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; CHAMLET, J.; MESQUITA, M.; SALVADOR, C. A. Profundidade efetiva de raízes e sua relação com a parte aérea da cultura do feijoeiro irrigado em sistema plantio direto. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.4, n.3, p.172-183, 2010.

BLAINSK, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, p. 79-87, 2012.

BLAINSKI, E. Utilização do intervalo hídrico ótimo do solo para manejo de área irrigada. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2007, 41 p. Dissertação de mestrado em agronomia.

CALVACHE, A. M.; REICHART, K.; MALAVOLTA, E.; BACCHI, O. O. S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão. Scientia Agrícola, Piracicaba, v.54, n.3, 1997.

CARLESSO, R.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. G.; PETRY, M.; WOLSHICK, D. Efeito da lâmina de irrigação na senescência foliar do feijoeiro. Irriga, Botucatu, v.12, n. 4. p.545-556, 2007.

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.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COSTA, C. S.; RODRIGUES, J. V.; CAVALCANTI, A. C.; MARINHO, L. B.;

NETO, L. A. A.; SILVA, J. A. Água disponível em um Neossolo Quartzarênico após adição de um condicionador mineral do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*. V.13, n.5, p.534-530, 2009.

COSTA, R. C. L.; LOPES N. F.; OLIVA, M. A. Crescimento, morfologia, partição de assimilados e produção de matéria seca em *Phaseolus vulgaris* L. submetido a três níveis de nitrogênio e dois regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 26, n. 9, p.1453-1465, 1991.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23 p. 703-709, 1999.

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.

FARIA, M. T. de.; TURCO, J. E. P.; FERNANDES, E. J.; GUIRRA, A. P. M. Resposta produtiva do feijoeiro comum a diferentes manejos de irrigação. *Irriga, Botucatu*, v.17, n.2, p. 137-147, 2012.

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Produtividade, eficiência agrônômica, características nutricionais e tecnológicas do feijão adubado com nitrogênio em plantio direto e convencional. *Bragantia*, Campinas, v.69, n.1, p.165-172, 2010.

FERNANDES, L. M.; Retorno financeiro e risco de preço da cultura do feijão irrigado via pivô central na região noroeste de Minas Gerais. *Informações Econômicas*, São Paulo, v.42, n.1, 2012.

FREDDI, O. da. S, CENTURION, J. F, DUARTE, A. D, PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. 2- Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.805-818, 2009.

FREDDI, O. da. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. da. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia*, Campinas, v.66, n.3, p.477-486, 2007.

GARCIA, G. de. 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.

GOMES, A. A.; ARAÚJO, A. P.; ROSSIELLO, R. O. P.; PIMENTEL, C. Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, n.10, p.1927-1937, 2000.

GRAHAM, P. H. & RANALLI, P. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research*, v. 53, p.131-146, 1997.

GUERRA, A. F. Tensão de água no solo: efeito sobre a produtividade e qualidade dos grãos de cevada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.30, n.2, p.245-254, 1995.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.10, n.1, p.70-75, 2006.

IMHOFF, S.; SILVA, A. S.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35,n.7, p.1493-1500, 2000.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. Principais características das cultivares de feijão com sementes disponíveis no mercado. P.2. 2012.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná. P.17. 2003.

JUNIOR, A. S. de. A.; RODRIGUES, B. H. N.; FRIZZONE, J. A.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; MELO, F. de. B. Níveis de irrigação na cultura do feijão caupi. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.1, p.17-20, 2002.

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.

KAISER, D. R.; REINERT, K. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 4, p. 845-855, 2009.

KLEIN, V. A. Densidade relativa um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.5, n.1, p.26-32, 2006.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p. 221-227, 2007.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 415-423, 2004.

LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glicene max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. Ciência Rural, v.36, n. 4, p. 1172-1178, 2006.

LIMA, J. S. S.; FILHO, S. M.; LOPES, J. C.; GARCIA, G. O.; NETO, R. S. Desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em condição de solo compactado. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.23, n.3, p.556-562, 2003.

MARTÍNEZ, J. P.; SILVA, H.; LEDENT, J. F.; PINTO, M. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*, v.26, p. 30-38, 2007.

MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of soil aggregates of finite size. *Plant and soil*, v.94, p. 59-85, 1986.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. de P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. de O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, n. 34, p. 1811-1822, 2010.

NASCIMENTO, J. J. V. R.; AZEVEDO, C. A. V. de.; 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.

NASCIMENTO, J. T.; PEDROSA, M. B.; SOBRINHO, J. T. Efeito da variação de níveis de água disponível no solo sobre o crescimento e produção de feijão caupi, vagens e grãos verdes. *Horticultura Brasileira*, v.22, n.2, p.174-177, 2004.

NAVEA, C.; TERRAZAS, T.; DELGADO-SALINAS, A.; RAMÍREZ-VALLEJO, P. Foliar response of wild and domesticated *Phaseolus vulgaris* L. to water stress. *Genetic Resources and Crop Evolution*, n. 00, p.1, 2002.

NÓBREGA, J. Q.; RAO, T. V. R.; BELTRÃO, N. E. de. M.; FILHO, J. F. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.5, n.3, p.437-443, 2001.

OLIVEIRA, F. G.; FERREIRA, P. A.; SANTOS, D. B. dos.; GARCIA, G. de. O. Índice de estresse hídrico diário do feijoeiro irrigado com água salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2005.

OLIVEIRA, G. A.; ARAÚJO, W. F.; CRUZ, P. L. S.; SILVA, W. L. M. da.; FERREIRA, G. B. Resposta do feijão-caupi as lâminas de irrigação e as doses de fósforo no cerrado de Roraima. *Revista Ciências Agrárias*, Fortaleza, v.42, n. 4, p.872-882. 2011.

PEITER, M. X. & CARLESSO, R. Comportamento do sorgo granífero em função de diferentes frações da água disponível no solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 51-55, 1996.

PEREIRA, A. V.; OTTO, R. F.; REGHI M. Y. Resposta do feijão-vagem cultivado sob proteção com agrotêxtil em duas densidades de plantas. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 21, n.3, p.564-569, 2003.

PEREIRA, M. R. R.; KLAR, A. E.; SILVA, M. R. da.; SOUZA, R. A. de.; FONSECA, N. R. Comportamento fisiológico e morfológico de clones de *Eucalyptus urograndis* submetidos a diferentes níveis de água no solo. *Irriga*, Botucatu, v. 11, n.4, p. 518-531, 2006.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. dos. S. S.; MIRANDA, M. A. C. de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p. 1805-1816, 2008.

REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. de.; MANTOVANI, E. C.; FRIZZONE, J. A. Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.26, n.4, p.503-511, 2004.

RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, v.26, n. 3, p. 321- 344, 2005.

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

ROSOLEM, CIRO. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa agropecuária brasileira*. Brasília, v.34, n.5, p.821-828, 2009.

ROSS, P. J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K. L. Equations for extending water-retention curves to dryness. *Soil Science of American Journal*, Madison, v.55, p.923-927, 1991.

SANTANA, M. J. de.; SILVEIRA, A. L. da.; CAMARGOS, C. R de.; BRAGA J. C. Tensão de água no solo e doses de nitrogênio para a cultura do feijoeiro comum. *Irriga*, Botucatu, v.14, n.4, p.518-532, 2009.

SANTOS, P. A. dos.; CARVALO, M. de. P.; FREDDI, O. da. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAG, E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.. 287-295, 2005.

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.

SANTOS, S. R. dos. & PEREIRA, G. M. Comportamento da alface tipo americana sob diferentes tensões da água no solo, em ambiente protegido. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.3, p.569-577, 2004.

SENRA, A. F.; LOUZADA, R. O.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, C. M. A.; VICTOR, D. M. Resistência mecânica a penetração em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo. Revista Ciências Técnicas Agropecuárias, v. 16, n. 1, 2007.

SILVA, W. da, SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A. da.; 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, 2004.

SIMSEK M.; COMLEKCIOGLU, N.; OZTURK, I. The effects of the regulated deficit irrigation on yield and some yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L) under semi-arid conditions. African Journal of Biotechnology, v.10, n.20, p.4057-4064, 2011.

SOUSA, M. A. de.; LIMA, M. D. B.; SIMON, G. A.; ANDRADE, J. W. de. S. Estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento do feijoeiro. Pesquisa Agropecuária Tropical. Goiânia, v.39, n.2, p.175-182, 2009a.

SOUSA, M. A. de.; LIMA, M. D. B.; SIMON, G. A.; ANDRADE, J. W. de. S. Efeito do estresse hídrico na densidade do comprimento radicular em estádios de desenvolvimento do feijoeiro. Pesquisa Agropecuária Tropical. Goiânia, v.39, n.1, p.25-30, 2009b.

SOUSA, V. F. de.; COELHO, E. F.; JUNIOR, A. S. de. A.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A. Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.4, n.2, p.183-188, 2000.

SOUZA, Z. M. de.; CAMPOS, M. C. C.; CALVALCANTE, I. H. L.; JUNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. de. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, 2006.

STONE, L. F. & SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.1, p.83-91, 1999.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n.2, p.207-212, 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

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.

VICENTE, M. R.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, M. de A.; CUNHA F. F. da.; TEIXEIRA, E. N. Efeito de diferentes lâminas de irrigação na produtividade e no sistema radicular do feijoeiro. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.14, n.3, p.238-249, 2007.

VILELA, E. F.; BULL, L. T. Avaliação do crescimento de plantas de milho em função de doses de potássio e estresse hídrico. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, n. 23, p. 281-289, 1999.

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*, n. 106, p. 275-287, 2005.

WU, L.; GENG, G.; LETY, J.; FEGUSON, L.; MITHCELL, G.; MCCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, v. 114, p. 401-414, 2003.