



VIRGÍLIO HENRIQUE BARROS NOGUEIRA

**VAZÃO DE GOTEJADORES INSTALADOS EM
SUBSUPERFÍCIE EM DIFERENTES SOLOS**

**LAVRAS – MG
2019**

VIRGÍLIO HENRIQUE BARROS NOGUEIRA

**VAZÃO DE GOTEJADORES INSTALADOS EM SUBSUPERFÍCIE EM
DIFERENTES SOLOS**

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

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto
Orientador

**LAVRAS-MG
2019**

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

Nogueira, Virgílio Henrique Barros.

Vazão de gotejadores instalados em subsuperfície em diferentes
solos / Virgílio Henrique Barros Nogueira. - 2019.
68 p.

Orientador(a): Adriano Valentim Diotto.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Irrigação subsuperficial por gotejamento. 2. Variação de
vazão. 3. Física dos solos. I. Diotto, Adriano Valentim. II. Título.

VIRGÍLIO HENRIQUE BARROS NOGUEIRA

**VARIAÇÃO DE VAZÃO EM EMISSORES INSTALADOS NA SUPERFÍCIE E
SUBSUPERFÍCIE EM DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**

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

APROVADA em: 26 de setembro de 2019.

Dr. Adriano Valentim Diotto UFLA

Dr. João Paulo Francisco UEM

Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto
Orientador

**LAVRAS-MG
2019**

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Fabíola e Cláudio, por todo apoio e dedicação.

À minha namorada Gabriele por toda compreensão e companheirismo.

A toda minha família, avós, tios e primos, por sempre estarem do meu lado.

A todos meus amigos e colegas, por toda ajuda e cumplicidade.

Ao meu orientador, Prof. Adriano Diotto, pela orientação e ensinamentos.

A todo corpo discente do departamento, em especial aos professores Michael Thebaldi e Luiz

Antonio Lima, pelas considerações e colaborações.

A todo o corpo técnico do DRS, em especial Elvis, Jean e Renato, por sempre ajudarem
quando necessário.

À Universidade Federal de Lavras e ao departamento de Recursos Hídricos e Saneamento.

A FAPEMIG pela concessão da bolsa de mestrado.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A irrigação permite aumentar significativamente a produtividade das culturas, porém é necessário utilizar a água de forma racional para que essa técnica seja sustentável. Nesse sentido, procuram-se, cada vez mais, sistemas de irrigação eficientes no uso da água, como por exemplo, o gotejamento. O gotejamento pode ser instalado superficialmente e subsuperficialmente, uma vez que o último, em função de suas características de aplicação de água, promete ser ainda mais eficiente em relação ao superficial. Entretanto, esse sistema apresenta alguns limitantes a mais em comparação ao sistema superficial como, por exemplo, a dificuldade de instalação manutenção. Adicionalmente, a vazão do sistema quando enterrado pode ser modificada em relação à vazão de projeto, devido às características físico-hídricas do solo, o que pode influenciar na uniformidade do sistema. Embora haja muitos estudos nessa área, poucos investigaram a alteração de vazão de gotejadores instalados em pequenas profundidades, que é uma tendência observada, principalmente na cafeicultura irrigada. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variação na vazão de dois diferentes gotejadores quando instalados enterrados em quatro diferentes classes de solo, bem como estudar as características de cada solo. O trabalho foi dividido em dois experimentos, o primeiro buscou caracterizar os solos quanto a suas características físico-hídricas. Já o segundo, visou à determinação da variação de vazão subsuperficial em cada solo com gotejadores instalados a 5 cm de profundidade. Para o primeiro experimento, foram conduzidos ensaios de infiltração horizontal para determinação do perfil de umidade em relação ao tempo de avanço e também a determinação da difusividade hidráulica dos solos. O tempo de avanço foi menor para o solo franco arenoso e maior para o franco argiloso, enquanto que, para a difusividade, os maiores valores foram para o solo arenoso e os menores para o franco siltoso e franco argiloso. No segundo experimento, a vazão subsuperficial foi determinada por um aparato experimental construído para atender o propósito do trabalho. Houve variações de vazão em ambos os emissores. Com isso, concluiu-se que, mesmo em pequenas profundidades, essas variações devem ser levadas em consideração.

Palavras chave: Irrigação subsuperficial por gotejamento; variação de vazão; propriedades físico-hídricas do solo.

ABSTRACT

The irrigation allows a significant increase of the crop productivity, however it is necessary utilize the water in a rational way for this technique be sustainable. Therefore, efficient irrigation systems in water use are being sought increasingly, such as drip irrigation. The drip irrigation can be installed either on the soil surface or in subsurface, and the last one due to its water application characteristics can be even more efficient than superficial system. However, this system has some additional limitations compared to the superficial system, such as the difficulty of maintenance and installation. In addition, the drippers flow can be modified when buried due to soil characteristics, which can lead to reduction in system uniformity. Although there are many studies in this area, few have investigated the flow reduction of drippers installed in small depths, which is a trend observed in irrigated coffee. Thus the aim of the present work was evaluate the flow variation of two different drippers installed in subsurface in four different soil types as well as to study the characteristics of each soil. The work was divided into two experiments, the first sought to characterize physico-hydrical properties of the soils. The second aimed to determine the variation of subsurface flow in each soil with drippers installed at 5 cm depth. For the first experiment, horizontal infiltration tests were conducted to determine the moisture profile in relation to the advance time and also to determine the soil hydraulic diffusivity. The advance time was shorter for sandy loam and longer for loam whereas for diffusivity the highest values were for sandy loam and the lowest for silt loam and clay loam. In the second experiment the subsurface flow was determined by an experimental apparatus built to meet the purpose of the work. There were variations of flow in both emitters. It was concluded that even at small depths these variations must be taken into account.

Keywords: Subsurface drip irrigation; flow variation; Soil physico-hydrical properties.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	10
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 HIPÓTESE E OBJETIVOS	11
2.1 Hipótese.....	11
2.2 Objetivo geral.....	11
2.3 Objetivos específicos	11
3 REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1 Hidráulica de emissores.....	12
3.2 Irrigação localizada	13
3.2.1 Gotejamento Subsuperficial.....	15
3.2.2 Aplicações do SDI	20
3.3 Movimento de água no solo.....	21
3.3.1 Curva de retenção de água no solo.....	21
3.3.2 Movimento de água no solo.....	22
3.3.3 Infiltração horizontal.....	23
REFERÊNCIAS.....	25
SEGUNDA PARTE	29
ARTIGOS.....	29
DIFUSIVIDADE HIDRÁULICA DE DIFERENTES SOLOS COMUMENTE ENCONTRADOS EM MINAS GERAIS.....	29
1 INTRODUÇÃO.....	32
2 MATERIAL E MÉTODOS	34
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	44
VARIAÇÃO DE VAZÃO EM EMISSORES DE GOTEJAMENTO EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO EM SUBSUPERFÍCIE PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO.....	46
1 INTRODUÇÃO.....	49
2 MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1 Solos.....	51
2.2 Emissores e medições de vazão	52
2.3 Delineamento experimental	54

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de irrigação são fundamentais para amparar o desenvolvimento agrícola que cresce constantemente. Embora as áreas irrigadas representem em torno de 20% de toda a área agrícola do planeta, estas são responsáveis por mais de 40% de toda a produção (FOOD AND AGRICULTURE OF ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2014). Em contrapartida, a água é um recurso que deve ser utilizado com base em um manejo racional. Conseqüentemente, buscam-se cada vez mais sistemas com maior eficiência na aplicação da água como, por exemplo, pivôs centrais e irrigação localizada.

A irrigação localizada por gotejamento realiza a aplicação de água nas proximidades do sistema radicular, reduzindo perdas de evaporação. Existe, ainda, o gotejamento subsuperficial, que nada mais é uma variação do gotejamento, uma vez que a água é aplicada em subsuperfície, reduzindo ainda mais as perdas. Em razão disso, o gotejamento subsuperficial possui alta eficiência e, conseqüentemente, ganha espaço entre os demais sistemas.

Nesse sistema de irrigação, os problemas de entupimento podem ser agravados pela presença de partículas sólidas e de raízes. Adicionalmente, alguns trabalhos têm mostrado que as propriedades do solo podem interferir na vazão de emissores enterrados. Trabalhos anteriores que investigaram esse fenômeno avaliaram, em sua maioria, profundidades de instalação em torno de 10 a 40 cm. Porém em áreas de irrigação de café, existe a tendência de apenas encobrir as linhas de gotejadores, ficando enterrados a pequenas profundidades, fato que também pode ocorrer na irrigação paisagística. Desse modo, são necessários mais estudos em baixas profundidades.

Adicionalmente, em razão da grande diversidade dos solos do Brasil são necessárias mais informações a respeito das suas principais características físico-hídrica, a fim de determinar a variação de vazão em função dessas características, para que se possibilitem projetos de sistemas por gotejamento subsuperficial mais adequados. Assim, o objetivo geral do presente trabalho foi determinar a variação da vazão em dois diferentes emissores, quando instalados a 5 cm de profundidade em 4 diferentes classes de solos.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 Hipótese

A vazão de emissores quando instalados subsuperficialmente é modificada, e esta pode ter diferentes intensidades de modificação em função das características físico-hídricas do solo, mesmo quando os gotejadores são instalados em pequenas profundidades.

2.2 Objetivo geral

Determinar a variação da vazão, em dois diferentes emissores, quando instalados a 5 cm de profundidade em 4 diferentes classes de solos.

2.3 Objetivos específicos

- I. Determinação da difusividade hidráulica dos solos, bem como avaliar o ajuste de uma equação da curva θ vs. λ para os solos em questão.;
- II. Determinação da sortividade dos solos;
- III. Determinação da curva de retenção de água dos solos;
- IV. Elaboração dos perfis de umidade dos solos;
- V. Construção da curva vazão vs. pressão de emissores utilizando um aparato composto por um frasco de mariotte pressurizado acoplado a uma célula de carga;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Hidráulica de emissores

Orifícios são perfurações com forma geométrica definida, e podem possuir diferentes formas, como retangulares e circulares, por exemplo, feitos em tubulações, canais, reservatórios ou tanques. Além da forma, os orifícios também podem ser classificados quanto ao tamanho, podem ser pequenos ou grandes. Quanto à natureza da parede do objeto em que o orifício está inserido, classifica-se em parede delgada e parede espessa. Em um orifício em parede delgada, o jato líquido apenas toca a perfuração, enquanto que em um orifício em parede espessa, o jato se adere à parede. O jato que sai do orifício também pode ser denominado de veia líquida (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2018).

Ainda de acordo com Azevedo Netto e Fernández (2018), para um orifício de pequenas dimensões em parede delgada pode-se calcular a vazão pela Equação 1:

$$q = CdA(2gh)^{0,5} \quad (1)$$

Em que:

Q = Vazão que atravessa o orifício ($m^3 s^{-1}$)

Cd = Coeficiente de descarga (adimensional)

A = Área do orifício (m^2)

g = Aceleração da gravidade ($m s^{-2}$)

h = Carga hidráulica (m)

O coeficiente de descarga é dado pelo produto do coeficiente de contração da veia, Cc, e o coeficiente de redução de velocidade, Cv, que são obtidos experimentalmente (PORTO, 2006). O coeficiente de descarga varia entre 0.6 e 1.0, para orifícios ou bocais (KELLER; BLIESNER, 1990).

Quando a veia líquida escoar em meio fluido, o emissor está afogado. Nesse caso, os coeficientes de descarga serão ligeiramente menores em comparação com a descarga em atmosfera, porém em muitas situações práticas, essa diferença é desprezível (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2018). Para a maioria dos emissores, a Equação 1 pode ser escrita da seguinte forma (EQUAÇÃO 2):

$$Q = CdA(2gh)^x \quad (2)$$

Sendo:

Q = Vazão do emissor ($m^3 s^{-1}$);

x = Expoente de descarga do emissor (adimensional).

Assim, pode-se definir um coeficiente de proporcionalidade (EQUAÇÃO 3), que possui as mesmas unidades da vazão e pressão e permite reescrever a equação do emissor de uma forma simplificada, representada na Equação 4 (KELLER; KARMELI, 1974).

$$k = CdA(2g)^x \quad (3)$$

$$q = k(h)^x \quad (4)$$

Os valores do coeficiente de proporcionalidade, Equação 4, e do expoente de descarga dependem de cada tipo de emissor, além disso, o valor do expoente de descarga permite classificar o emissor quanto ao seu regime de fluxo, ou seja, laminar quando este é igual ou próximo de 1, no qual a variação de pressão afeta linearmente a vazão. Quando o valor do expoente de descarga for menor do que 1, o regime pode ser classificado como turbulento, e quando é igual a zero, o emissor é perfeitamente autocompensante, e o efeito da variação de pressão sobre a variação de vazão é nula (CABELLO, 1987).

Adicionalmente, Keller e Bliesner (1990) apresentaram que o emissor possui fluxo completamente turbulento quando o expoente de descarga é igual a 0,5 e para os emissores autocompensantes os valores de x podem variar entre 0,0 a 0,4.

Devido à grande variabilidade dos projetos hidráulicos de emissores os fluxos resultantes também são variados, e podem ser laminar, turbulento e fluxos com pressão compensada. Essas classificações estão relacionadas com as características dimensionais do caminho de fluxo dentro dos emissores, mudando os valores do coeficiente de e do expoente de descarga (FRIZZONE et al., 2012).

3.2 Irrigação localizada

Esse método é caracterizado pela aplicação localizada de água, molhando apenas próximo ao sistema radicular, resultando na diminuição das perdas e conseqüentemente,

aumentando a eficiência de irrigação (TESTEZLAF, 2017). Frizzone et al. (2012) define, ainda, a irrigação localizada como microirrigação, que é caracterizada pela aplicação de água com baixa vazão, por tempo relativamente grande, com alta frequência, próximo ou dentro do sistema radicular, via sistemas de baixa pressão, acima ou abaixo do nível do solo, e pode ser utilizado para aplicação de fertilizantes. Dentro do método, existem os sistemas de microaspersão e gotejamento.

O sistema de microaspersão é caracterizado pela aspersão da água por meio de microaspersores ou sprays que são instalados, na maioria das vezes, a uma pequena altura do solo, proporcionando uma maior área molhada em relação ao gotejamento. Geralmente os microaspersores são melhor adequados a áreas de solos mais arenosos ou para irrigação em culturas perenes, além de serem menos propensos ao entupimento (HAGUENAUER, 2016). Grande parte dos microaspersores possui pressão de serviço em torno de 200 kPa, com vazão entre 20 a 150 l/h (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Na irrigação por gotejamento a água, é aplicada de forma pontual no solo, por meio de emissores, também conhecidos como gotejadores, que dissipam a energia aplicando a água na forma de gotas (HAGUENAUER, 2016). De acordo com Frizzone et al. (2012), a vazão de cada emissor geralmente é menor que 12 l/h e a pressão fica em torno de 30 e 450 kPa.

A irrigação por gotejamento geralmente é utilizada na forma de sistema fixo, constituído de diversas linhas laterais, em função do tamanho da área. Como sistemas fixos geralmente são mais caros, a irrigação por gotejamento é mais utilizada em culturas com alto retorno econômico, tais como: frutíferas, horticultura e café (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Um dos fatores para se avaliar a competitividade econômica frente a outros métodos de irrigação é a durabilidade do sistema (LAMM; ROGERS, 2017).

Apesar do alto custo de implantação, o sistema é bastante flexível e pode se adaptar a diferentes tipos de topografia, clima e cultura, além de ter o potencial de proporcionar maior eficiência do uso de energia e água por reduzir perda por evaporação, percolação e deriva e, também, maior eficiência no controle fitossanitário, devido à aplicação de água ocorrer somente nas proximidades da cultura e da facilidade de automação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006; FRIZZONE et al., 2012; PRADO; NUNES; TINOS, 2014).

Devido aos pequenos diâmetros dos orifícios de saída, os emissores podem ser facilmente obstruídos, aumentando a necessidade de manutenção do sistema (FRIZZONE et al., 2012). De acordo com o mesmo autor, o volume molhado de solo por sistemas de

microirrigação é pequeno, e pode afetar negativamente o desenvolvimento das raízes, pois a área de exploração fica limitada pelo volume molhado.

O sistema de gotejamento pode ainda ser dividido conforme a posição vertical das linhas laterais, em superficial ou subsuperficial. O gotejamento superficial é caracterizado pela aplicação da água na superfície do solo, é ainda o mais comumente utilizado. O sistema possui algumas vantagens em relação ao subsuperficial tais como, maior facilidade de instalação, possibilidade de mudança de posição das linhas, facilidade na limpeza e inspeção de emissores, maior facilidade para medição de vazão dos emissores individualmente, e também, permite verificar o padrão de molhamento gerado pelos emissores. (NOGUEIRA; COELHO; LEÃO, 2000).

Emissores do mesmo modelo também estão sujeitos a variações de vazão com pressão constante, isso ocorre devido às diferenças de cada peça, pois mesmo mantendo todo o cuidado e controle de qualidade durante os processos de fabricação, dificilmente existem emissores idênticos, com mesmo valor do expoente de descarga e coeficiente de proporcionalidade, uma vez que qualquer diferença na geometria da seção de passagem da água ocasionará mudanças na vazão do emissor. A variabilidade afeta a uniformidade do sistema e é inerente a cada processo de fabricação, dependendo do projeto do emissor, materiais utilizados e tolerâncias adotadas no processo, medido pelo coeficiente de variação de fabricação (CV(f)) (FRIZZONE et al., 2012).

Bralts (1986) apresenta os seguintes critérios para avaliação da uniformidade de emissão (EU) de um sistema de irrigação localizada: 90% ou mais, excelente; 80% a 90%, bom; 70% a 80%, regular; e menor que 70% ruim. Um sistema bem projetado deve possuir uniformidade acima de 90% (CUNHA et al., 2013). Variações na uniformidade podem ocorrer quando o emissor estiver enterrado ou devido à distância entre emissores e entupimento (BARROS et al., 2009).

3.2.1 Gotejamento Subsuperficial

No sistema de gotejamento subsuperficial (SDI, sigla da expressão em língua inglesa “Subsurface Drip Irrigation”), as linhas laterais são enterradas. Com isso, a água é aplicada abaixo da superfície do solo, praticamente no interior do sistema radicular. A profundidade de instalação varia com o tipo de cultura e com o tipo de solo (HAGUENAUER, 2016). Camp (1998) sugere que as linhas laterais sejam instaladas em profundidades onde não ocorra

afloramento de água e que se evitem danos mecânicos por operações de preparo e cultivo de solo.

O sistema de gotejamento instalado em subsuperfície evita a exposição da superfície molhada, o que reduz, ainda mais, as perdas por evapotranspiração, tornando o sistema extremamente eficiente no uso da água (AYARS et al., 1999; FAN; LI, 2018; NOGUEIRA; COELHO; LEÃO, 2000). Como as tubulações não ficam expostas na superfície do solo, o tráfego de máquinas e tratos culturais são facilitados, além disso, vandalismos, ações de roedores e também o efeito da radiação solar são evitados, ou pelo menos reduzidos, proporcionando um aumento da vida útil do material (MARTÍNEZ; RECA, 2014; NOGUEIRA; COELHO; LEÃO, 2000).

Um estudo realizado por Souza, Coelho e Paz (2007) relata que, no gotejamento subsuperficial, o bulbo molhado apresentou maior expansão no sentido vertical, podendo promover uma área maior para o aprofundamento das raízes, além disso, no sistema subsuperficial, a distribuição de água no perfil do solo ocorreu de forma mais uniforme em relação ao sistema superficial.

De acordo com Camp (1998) e Martínez e Reça (2014), a maior limitação do sistema subsuperficial está relacionada justamente com o fato de as linhas laterais estarem enterradas no solo, o que dificulta a medição da uniformidade do sistema e da vazão individual de cada emissor, além de dificultar operações de manutenção e reparo em geral, conseqüentemente, tornando essas operações mais caras e demoradas.

Durante a drenagem do sistema, o vácuo causado pode succionar partículas de solo causando entupimento dos emissores, por isso recomenda-se a instalação de válvulas antivácuo, de duplo ou triplo efeito ou a instalação de gotejadores especiais como, por exemplo, gotejadores antidrenantes (CAMP, 1998). Segundo o mesmo autor, na fase de germinação da semente e estabelecimento da cultura, o sistema não é o mais indicado, dependendo das características do local.

O sistema também possui maior sensibilidade à obstrução por partículas sólidas ou raízes, em relação ao gotejamento superficial, ou seja, um dos principais problemas do gotejamento subsuperficial (CUNHA et al., 2013; GIL et al., 2011). A obstrução dos emissores causa diversos prejuízos, em vista de que a detecção do entupimento, limpeza ou troca dos emissores é difícil e onerosa. Ademais, a uniformidade do sistema pode ser afetada significativamente devido à redução de vazão dos gotejadores (FRIZZONE et al., 2012). Em

relação à obstrução por raízes, alguns estudos sugerem a aplicação de trifluralina em pequenas doses para evitar tal situação (YU et al., 2010).

Outro fato que deve ser ressaltado, considerado por Gil et al. (2008) como a principal diferença entre o gotejamento superficial e subsuperficial e constatada por diversos autores (GIL et al., 2008, 2011; LAZAROVITCH et al., 2006; SHANI et al., 1996; WARRICK; SHANE, 1996), é que a vazão dos emissores pode ser influenciada pelas propriedades do solo, o que pode afetar o coeficiente de variação de vazão (CV(q)). Ao redor de um ponto de aplicação subsuperficial é formada, na maioria dos solos, uma região saturada com formato esférico, que exerce uma pressão positiva sobre a fonte de emissão, podendo reduzir a vazão do emissor (GIL et al., 2008; PHILIP, 1992).

Shani et al. (1996) avaliaram a contrapressão em condições de campo, encontrando valores de até 80 kPa. Os mesmos autores também relataram que, quando a intensidade de aplicação do emissor excede à capacidade de infiltração do solo, pode ser verificada uma região saturada ao redor do emissor que exerce uma contrapressão sobre este, e pode acarretar redução da vazão do emissor.

Ainda de acordo com Shani et al. (1996), o efeito da contrapressão é mais predominante em solos com menor infiltrabilidade, resultando em uma maior redução da vazão do emissor, em função da redução do gradiente hidráulico entre o interior do emissor e o solo, conforme Equação 5, sendo k o coeficiente de proporcionalidade; h_0 a carga de pressão de trabalho do emissor; h_s a contrapressão; x o expoente do emissor (GIL et al., 2008; WARRICK; SHANE, 1996). Além disso, quando a vazão do emissor é maior que a taxa de infiltração, podem ocorrer problemas de afloramento de água (YAO; MA; LI, 2011).

$$q = k(h_0 - h_s)^x \quad (5)$$

Lazarovitch et al. (2006) encontraram, por meio de modelos matemáticos, que a maior variação de vazão usando os emissores enterrados é inversamente proporcional a condutividade hidráulica do solo em função da maior contrapressão ao redor do emissor. No estudo em questão a variação de vazão para o solo argiloso foi de 36% para um gotejador de 4 l h⁻¹, enquanto que para o solo arenoso a variação foi de apenas 8.42 %. Considerando que sistemas de irrigação em geral admitem 10 % de variação de vazão, o valor encontrado pelo autor representa quase toda a variação permitida apenas devido aos fatores do solo.

Adicionalmente, foi relatado pelo autor que a variabilidade espacial das propriedades do solo deve ser considerada para o projeto de um sistema subsuperficial. Além disso, para solos com baixa infiltrabilidade devem-se adotar técnicas específicas de manejo para evitar o efeito da variação da vazão, tais como, redução do espaçamento e vazão dos gotejadores e utilização de emissores autocompensantes.

Gil et al. (2008) encontraram resultados semelhantes, relataram que, em solos argilosos, o efeito da contrapressão foi maior do que em solos arenosos. Para emissores com maiores vazões, o efeito da contrapressão também é aumentado, isso faz com que o próprio solo aja como um regulador da vazão, pois a sobrepressão diminuiu a vazão e faz com que a uniformidade de sistemas subsuperficiais sejam maiores do que em superficiais, no caso de solos homogêneos. Para emissores autocompensantes, o mesmo autor não encontrou diferenças entre a vazão superficial e subsuperficial, ou seja, mesmo com a atuação da sobrepressão, o emissor ainda se encontrava dentro da faixa de compensação de vazão.

Philip (1992) analisou o que ocorre ao redor de um ponto de emissão enterrado e Shani e Or (1995) usaram as conclusões de Philip para relacionar a contrapressão (h_s), as propriedades hidráulicas do solo e a vazão do ponto de descarga, em condições de regime permanente, conforme Equação 6.

Gil et al. (2010) analisaram o desenvolvimento da cavidade esférica em torno da saída de um ponto de emissão enterrado, calculada pela Equação 7, obtendo uma relação entre a vazão e o raio da cavidade. Para o solo arenoso, a cavidade formada foi muito pequena e não houve aumento com a vazão, já para o solo argiloso a cavidade foi facilmente medida. Constataram-se, também, rachaduras no início da irrigação para maiores vazões, que foram lentamente preenchida por partículas de solo e tomando forma esférica. A pressão em torno do ponto de emissão caiu ao longo do ensaio coincidindo com o aumento do raio da cavidade. Adicionalmente, o raio da cavidade aumentou com a vazão, tornando-se constante em maiores vazões.

$$h_s = \left(\frac{2 - \alpha_G r_0}{8\pi \cdot K_s r_0} \right) q - \frac{1}{\alpha_G} \quad (6)$$

$$r_0 = \frac{2q\alpha_G}{8\pi \cdot K_s (\alpha_G \cdot h_s + 1) + (\alpha_G^2 q)} \quad (7)$$

Em que:

r_0 = Raio da cavidade esférica, m;

q = Vazão do emissor, $l\ h^{-1}$;

K_s = Condutividade hidráulica saturada, $m\ s^{-1}$;

α_G = Parâmetro do modelo de Gardner estimado pela equação do potencial de Kirchhoff, m^{-1} ;

h_s = Contrapressão, m.

Thebaldi (2014) avaliou 4 modelos de gotejadores instalados a 10 e 20 cm de profundidade em condições de campo sob diferentes tempos de irrigação. Foi avaliada a variação de vazão em relação à vazão superficial bem como a contrapressão em cada caso. O autor encontrou diferentes variações de vazão para cada emissor, a maior foi de 11.42 %, e a contrapressão máxima estimada foi de 32,41 kPa. A profundidade e o tempo de irrigação não influenciaram na contrapressão e variação de vazão.

Thebaldi et al. (2016) analisaram o comportamento hidráulico de quatro tipos de gotejadores submersos em água em diferentes profundidades, simulando o efeito da contrapressão. O coeficiente do emissor sofreu um pequeno acréscimo quando os emissores estavam submersos, indicando uma redução de compensação de vazão do emissor. Em todos os testes realizados, a vazão foi menor em subsuperfície.

Yao, Ma e Li (2011) ensaiou diversos emissores em 4 diferentes solos, com profundidades de instalação de 25 e 40 cm, com objetivo simular a frente de molhamento por meio do modelo SWMS-2D e comparar com os valores estimados além de verificar a sensibilidade do modelo a contrapressão. O autor constatou que houve contrapressão, porém ela não afetou o ajuste do modelo.

Fan e Li (2018) estudaram o efeito da pressão de operação, umidade inicial e densidade do solo na variação da vazão de emissores enterrados a 20 cm de profundidade em 3 solos. A vazão subsuperficial foi menor do que a superficial para todos os solos e, com o aumento da pressão, houve aumento da vazão. Os efeitos da pressão na vazão se tornaram menos significantes com o aumento da densidade e umidade inicial. A umidade inicial também teve efeitos consideráveis na vazão, ou seja, com maiores valores de umidade inicial, maior foi a redução da vazão, pois mais poros foram preenchidos de água, aumentou a resistência ao fluxo, isso fez com que o fenômeno da contrapressão ocorresse mais rapidamente.

Os mesmos autores também relataram que o efeito da densidade na variação de vazão foi mais proeminente para o solo mais grosseiro em razão da redução da sua porosidade em função da maior densidade. Geralmente, solos arenosos são mais susceptíveis a mudanças de densidade devido ao maior número de macroporos. No caso de altos valores de densidade e umidade inicial de 18%, a redução de vazão do solo arenoso foi maior do que em solos com maiores teores de argila com 1.4 g cm^{-3} de densidade.

Estudos realizados por Barreto et al. (2009), Fan e Li (2018), Gil et al. (2008, 2010, 2011), Rodríguez-Sinobas et al. (2012), Shani et al. (1996) e Yao, Ma e Li (2011) mostram que boa parte dos trabalhos avaliaram o sistema em profundidades entre 10 e 40 cm. Porém tem-se observado no campo, que os tubos gotejadores podem ser apenas encobertos por uma pequena camada de solo ou até mesmo apenas cobertura vegetal, especialmente na cafeicultura e paisagismo. Portanto, mais trabalhos são necessários para avaliar o comportamento dos gotejadores em pequenas profundidades (menor que 10 cm).

3.2.2 Aplicações do SDI

O cafeeiro é uma cultura de extrema importância econômica para o Brasil, em especial para o estado de Minas Gerais, que segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2019), é o estado com maior produção nacional, com aproximadamente 33,36 milhões de sacas na safra de 2018, isso representa uma receita bruta de 13,95 bilhões de reais. A região sul e centro-oeste representam as regiões com maior produção do estado, somando 17,90 milhões sacas. O aumento da produtividade graças à irrigação promove um aumento na atratividade de investimento na cultura (ARÊDES; PEREIRA; SANTOS, 2010). Os mesmos autores encontraram, ainda, que quanto maior a vida útil, maiores são as chances de retorno econômico. Devido às vantagens da irrigação localizada, especialmente o seu potencial para economia de água, esse método tem sido adotado por muitos cafeicultores (ESTEVES et al., 2012). Além disso, altas durabilidades podem ser encontradas em sistemas subsuperficiais (LAMM; ROGERS, 2017). Assim, o SDI pode ser uma boa alternativa para uso na cafeicultura.

A irrigação paisagística tem ganhado, cada vez, mais espaço no Brasil, pois a irrigação de áreas verdes é fundamental para a manutenção das plantas, o que garante uma melhor qualidade estética dos jardins, gramados ou praças públicas. Porém, existe pouca informação técnica, resultando em projetos mal dimensionados (TESTEZLAF, 2017). A irrigação

paisagística também utiliza pequenas profundidades de instalação das linhas laterais ou, até mesmo, apenas cobertura vegetal (WALLER; YITAYEW, 2016).

Para a linha XF da Rain Bird[®], indicada para paisagismo, a profundidade de instalação recomendada pelo fabricante é de 10 a 15 cm, pode ser também instalado abaixo de cobertura vegetal ou em superfície.

3.3 Movimento de água no solo

3.3.1 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água pelo solo (CRAS) representa graficamente o estado de energia da água em interação com a matriz do solo (LIBARDI, 2005). A determinação da CRA é de fundamental importância para o manejo de sistemas de irrigação, uma vez que é possível determinar os valores de capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) por meio desta (FILGUEIRAS et al., 2016).

A curva de retenção é uma característica de cada solo e é expressa em um gráfico que correlaciona o potencial matricial da água no solo com a respectiva umidade volumétrica ou gravimétrica. Para altos teores de água os fenômenos capilares são de importância para determinação do potencial mátrico, tais como a densidade, estrutura e porosidade do solo. Para baixos teores de água, as forças adsorptivas são mais importantes, com isso o potencial pouco depende da porosidade e densidade, sendo a textura mais relevante para sua determinação (REICHARDT; TIMM, 2016).

No método convencional para determinação da CRAS, o Funil de Buchner ou mesas de tensão são usados para baixas tensões enquanto o Extrator de Richards é utilizado para altas tensões. A curva pode ser descrita por diversos modelos. O modelo de van Genuchten, Equação 8, (VAN GENUCHTEN, 1980) é o mais utilizado, devido à maior qualidade de ajuste para diferentes solos (HAN; SHAO; HORTON, 2010; RAMOS et al., 2011).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|\psi|)^n\right]^m} \quad (8)$$

Sendo:

θ : Umidade do solo, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

θ_s : Umidade de saturação, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

θ_r : Umidade residual, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

α : Parâmetro da equação, cm^{-1} ;

n : Parâmetro da equação;

$|\psi|$ Potencial matricial: cm;

m : $1-1/n$.

3.3.2 Movimento de água no solo

O movimento de água no solo se dá quando existe diferença de potencial, e o movimento é no sentido do maior para o menor potencial. Darcy (1956 apud REICHARDT; TIMM, 2016) estabeleceu que a densidade de fluxo em meios porosos saturados é proporcional ao gradiente de potencial total, (EQUAÇÃO 9) e tem sua equação adaptada por Buckingham (1907 apud REICHARDT; TIMM, 2016) para meios não saturados (EQUAÇÃO 10) (REICHARDT; TIMM, 2016).

$$q = -K \frac{dH}{dx} \quad (9)$$

$$q = -K(\theta) \frac{dH}{dx} \quad (10)$$

Sendo:

q : Densidade de fluxo, m s^{-1} ;

$\frac{dH}{dx}$: Gradiente de potencial, m m^{-1} ;

$K(\theta)$: Condutividade hidráulica não saturada, m s^{-1} ;

Por meio da equação, é possível observar que o fluxo é proporcional à força que atua sobre a água e também a uma constante de proporcionalidade, K , ou condutividade hidráulica saturada do solo. A condutividade hidráulica depende das características do fluido e também meio poroso. O sinal negativo indica que o campo gradiente cresce em sentido oposto ao fluxo (REICHARDT; TIMM, 2016).

Para meios não saturados, a condutividade hidráulica torna-se muito sensível à umidade do solo, $K(\theta)$, chamada de condutividade hidráulica não saturada. Quanto maior a umidade maior $K(\theta)$, em valor máximo na saturação, tornando-se constante nessa situação, e com a diminuição da umidade $K(\theta)$, diminui, normalmente, de forma exponencial (LIBARDI, 2005). A condição mais comum para o meio poroso do solo é de não saturação, essa condição é expressa pela Equação 10.

Considerando o fluxo horizontal de água, no qual não há ação da gravidade, a equação de Darcy-Buckingham (EQUAÇÃO 10) pode ser escrita em relação ao potencial mátrico expandido pela regra da cadeia, explicitando um outro parâmetro hídrico do solo, a difusividade, conforme equação 11 (REICHARDT; TIMM, 2016). A difusividade nada mais é que a medida da densidade de fluxo sob um gradiente de umidade. Adicionalmente, quando se define esse fator, fica assumida a homogeneidade do solo, assim a difusividade deve ser usada para resolução de problemas em meios homogêneos (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

$$q = -K(\theta) \left(\frac{dh}{d\theta} \right) \left(\frac{d\theta}{dx} \right) = -D(\theta) \left(\frac{d\theta}{dx} \right) \quad (11)$$

3.3.3 Infiltração horizontal

A infiltração é o processo definido como a água que entra no solo, perdurando enquanto houver disponibilidade em sua superfície. A água que entra no solo está condicionada a diferentes condições, e pode infiltrar uniformemente em toda a superfície, em um ponto localizado ou, até mesmo, a partir de uma fonte enterrada no solo. Esse fenômeno é fundamental para o balanço hídrico nas raízes, e pode, também, determinar o deflúvio superficial, portanto de grande importância para o manejo de água no solo (REICHARDT; TIMM, 2016).

Na infiltração horizontal, não há efeito da componente gravitacional. Assim, considerando uma coluna semi-infinita de solo homogêneo, com umidade inicial constante ao longo de toda a coluna (θ_0), e uma placa porosa em uma das extremidades que forneça água mantendo a umidade em suas proximidades (θ_1), sujeita a determinadas condições de contorno iniciais (EQUAÇÃO 12), o problema pode ser resolvido obtendo o conteúdo de

água em qualquer tempo subsequente em relação à distância da placa porosa. A equação diferencial que fornece informações necessárias para esse caso é a equação de Richards.

$$\begin{aligned} t = 0, x > 0, \theta = \theta_0 \\ t > 0, x = 0, \theta = \theta_1 \\ t > 0, x = \infty, \theta = \theta_0 \end{aligned} \quad (12)$$

Bruce e Klute (1956) estudaram um método para determinar a medida da difusividade. Os autores definiram uma equação (EQUAÇÃO 13) que continha o termo da difusividade por meio das equações de Darcy e da continuidade, considerando movimento em uma dimensão e desprezando os efeitos da gravidade, infiltração horizontal.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (13)$$

Para a resolução da Equação 13, são consideradas as condições de contorno descritas anteriormente (EQUAÇÃO 12), e então a variável de Boltzmann ($\lambda = x \sqrt{t}^{-1}$) é substituída na Equação 13, que se transforma em uma equação diferencial ordinária (EQUAÇÃO 14). A aplicabilidade da substituição por λ pode ser testada plotando λ vs. θ , devendo ser uma relação linear.

$$-\frac{\lambda}{2} \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(D(\theta) \frac{d\theta}{d\lambda} \right) \quad (14)$$

Realizando a integração da Equação 14 temos (EQUAÇÃO 15):

$$-\int_{\theta_i}^{\theta_x} \frac{\lambda}{2} d\theta = \int_{\lambda_i}^{\lambda_x} \frac{d}{d\lambda} \left(D(\theta) \frac{d\theta}{d\lambda} \right) d\lambda = D(\theta_x) \left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_{\theta_x} - D(\theta_i) \left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_{\theta_i} \quad (15)$$

A derivada do último termo da Equação 15 é zero para valores de x grandes o suficiente para estarem à frente da frente de molhamento, com isso pode ser anulado. Então, a equação da difusividade pode ser escrita conforme Equação 16:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \int_{\theta_i}^{\theta_x} \lambda d\theta \quad (16)$$

REFERÊNCIAS

- ARÊDES, A. F.; PEREIRA, M. W. G.; SANTOS, M. L. A irrigação do cafezal como alternativa econômica ao produtor. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 193–200, abr./jun. 2010.
- AZEVEDO NETTO, A.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2018. 632 p.
- AYARS, J. E. et al. Subsurface drip irrigation of row crops : a review of 15 years of research at the Water Management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 1–27, Sept. 1999.
- BARRETO, C. V. G. et al. Effect of instalation depth and distance of drip emitter on coffee leaf water potential in a tropical soil. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 2, p. 114–125, jul./dez. 2009.
- BARROS, A. C. et al. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 700–707, nov./dez. 2009.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 625 p.
- BRALTS, V. F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed.). **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 216-240.
- BRUCE, R. R.; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity¹. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 24, n. 4, p. 458–462, Oct. 1956.
- CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación**. 7. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1987. 461 p.
- CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 41, n. 5, p. 1353–1367, 1998.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**. Brasília, v. 5, n. 2, p. 1-61, maio 2019.
- CUNHA, F. N. et al. Caracterização hidráulica de gotejadores em condição superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 5, p. 317–329, 2013.
- ESTEVES, B. S. et al. **Irrigação por gotejamento**. Niterói: Programa Rio Rural, 2012. 18 p.
- FAN, W.; LI, G. Effect of soil properties on Hydraulic characteristics under subsurface drip irrigation. **IOP Conference Series Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 121, n. 5, p. 1-12, Feb. 2018.

FILGUEIRAS, R. et al. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 115–120, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Irrigated crops**. Rome: FAO, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm>. Acesso em: 11 set. 2018.

FRIZZONE, J. A. et al. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

GIL, M. et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 26, n. 6, p. 451–458, Sept. 2008.

_____. Evolution of the spherical cavity radius generated around a subsurface drip emitter. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 7, n. 6, p. 1983–1989, June 2010.

_____. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 137, n. 5, p. 287–294, June 2011.

HAGUENAUER, G. M. **Tecnologias de irrigação e o uso eficiente da água: o caso do gotejamento subsuperficial**. 2016. 113 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

HAN, X.-W.; SHAO, M.-A.; HORTON, R. Estimating van Genuchten Model Parameters of Undisturbed Soils using an integral method. **Pedosphere**, Beijing, v. 20, n. 1, p. 55–62, Feb. 2010.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.

LAMM, F. R.; ROGERS, D. H. Longevity and performance of a subsurface drip irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 60, n. 3, p. 931–939, 2017.

LAZAROVITCH, N. et al. W. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 132, n. 6, p. 531–536, Dec. 2006.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335 p.

MARTÍNEZ, J.; RECA, J. Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative subsurface drip irrigation method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 140, n. 10, p. 04014030, May 2014.

NOGUEIRA, C. C. P.; COELHO, E. F.; LEÃO, M. C. S. Características e dimensões do

volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 315–320, set./dez. 2000.

PHILIP, J. R. What happens near a quasi-linear point source? **Water Resources Research**, Hoboken, v. 28, n. 1, p. 47–52, 1992.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. Sao Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.

PRADO, G.; NUNES, L. H.; TINOS, A. C. Avaliação técnica de dois tipos de emissores empregados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 12–25, 2014.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2. ed. Curitiba: SAEAFS, 2015. 474 p.

RAMOS, T. et al. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 2, p. 252–264, July 2011.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 3. ed. Barueri, SP: Manoele, 2016. 524 p.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. et al. Evaluation of drip and subsurface drip irrigation in a uniform loamy soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 177, n. 2, p. 147–152, Feb. 2012.

SHANI, U. et al. W. Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: pressure measurements. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 122, n. 5, p. 291–295, Oct. 1996.

SHANI, U.; OR, D. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 31, n. 8, p. 1863–1870, Aug. 1995.

SOUZA, E. A.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1161-1166, jul./ago. 2007.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: FEAGRI, 2017. 215 p.

THEBALDI, M. S. **Efeitos da contrapressão na hidráulica de emissores em gotejamento subsuperficial**. 2014. 132 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

THEBALDI, M. S. et al. Backpressure effects on the flow-pressure relation of driplines. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 55–62, jan./fev. 2016.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept. 1980.

WALLER, P.; YITAYEW, M. Landscape Irrigation Systems. In: **Irrigation and drainage engineering**. New York: Springer, 2016. p. 259–269.

WARRICK, B. A. W.; SHANE, U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 122, n. 5, p. 296–300, Oct. 1996.

YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J.; PARKES, M. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 29, n. 4, p. 331–339, July 2011.

YU, Y. et al. Effects of Treflan injection on winter wheat growth and root clogging of subsurface drippers. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 723–730, May 2010.

SEGUNDA PARTE

ARTIGOS

Primeiro artigo:

**DIFUSIVIDADE HIDRÁULICA DE DIFERENTES SOLOS COMUMENTE
ENCONTRADOS EM MINAS GERAIS.**

Hydraulic diffusivity of different soils commonly found in Minas Gerais

(VERSÃO PRELIMINAR)

Artigo redigido nas normas da NBR 6022 (ABNT 2003).

RESUMO

As caracterizações das propriedades físicas e hídricas do solo são de grande relevância para a o manejo da irrigação, da drenagem e do conteúdo de água no solo, além de gerar informações fundamentais para alimentação de modelos matemáticos. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de física do solo do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Lavras. Foram estudadas quatro classes de solos predominantes na região, classificados em muito argiloso, franco argiloso, franco arenoso e franco siltoso. Foram realizados ensaios de infiltração horizontal para determinação do perfil de umidade em relação ao tempo de avanço e determinação da difusividade, além da determinação da curva de retenção de água no solo. Objetivou-se testar a adequação de um método empírico de ajuste dos dados de umidade volumétrica versus a variável de Boltzmann bem como caracterizar os solos. O modelo se adequou bem para os solos estudados seguindo a seguinte ordem: franco arenoso > franco siltoso > franco argiloso > muito argiloso. O tempo de avanço foi menor para o solo franco arenoso e maior para o franco argiloso, enquanto que para a difusividade hidráulica, os maiores valores foram para o solo arenoso e os menores para o franco siltoso e franco argiloso.

Palavras chave: Relações físico-hídricas; física do solo; infiltração horizontal.

ABSTRACT

The characterization of soil physical and water properties is relevance for the irrigation management, drainage and soil water content, besides generating fundamental information to feed mathematical models. This work was conducted at the soil physics laboratory of the Federal University of Lavras. Four soil types were studied, being classified as clay, clay loam, sandy loam, and silt loam. Horizontal infiltration tests were performed to determine the moisture profile in relation to the advance time and to determine the diffusivity, as well as to determine the soil water retention curve. The objective was to test the applicability of an empirical method of data adjustment soil water content versus Boltzmann variable, as well as to characterize the study soils. The model presents a good performance for the soils studied in the following order: sandy loam> silt loam> clay loam> clay. The advance time was shorter for sandy loam and longer for clay loam, while for hydraulic conductivity, the highest values were for sandy loam and the shortest for silt loam and clay loam.

Key words: Physical-hydric relations; Soil physics; Horizontal flow.

1 INTRODUÇÃO

Vários parâmetros para caracterização dos solos são baseados no fluxo saturado de água no solo, como é o caso da condutividade hidráulica saturada. Porém, em condições reais de campo, grande parte dos solos se encontra em condições não saturadas. São nessas condições que ocorrem a maioria dos processos, tais como transporte de água, nutrientes e solutos (HILLEL, 1998).

Recentemente, a difusividade hidráulica tem sido estimada como uma importante propriedade do solo (EVANGELIDES; ARAMPATZIS; TZIMOPOULOS, 2010). Quando aliada à condutividade hidráulica não saturada oferece informações para a previsão de absorção de água pelas plantas (CONCEIÇÃO et al., 2014). A difusividade se refere à facilidade com que a umidade se movimenta em relação ao espaço e ao tempo, uma vez que, para o movimento horizontal, em que a componente gravitacional pode ser desprezada, o potencial total é igual ao potencial mátrico (CONCEIÇÃO, 2013).

Essas propriedades possuem grande variabilidade em função da textura e estrutura do solo, fenômenos de dispersão de argila, entre outros fatores. Com isso, têm sido criadas bases de dados internacionais para melhor compreender essa variabilidade (RAMOS et al., 2011). O Brasil possui diversas classes de solos, quais sejam os Latossolos, Argisolos e Neossolos os mais predominantes (MANZATTO; FREITAS JUNIOR; PERES, 2002). Seria então de grande interesse mensurar as propriedades desses solos, como a difusividade e condutividade hidráulica não saturada, a fim de se gerar informações que possam vir a ser utilizadas pela sociedade.

O conhecimento das características hidráulicas dos solos é de extrema importância para a agricultura, pois interfere na irrigação, drenagem, transporte e armazenamento de água e nutrientes (CUNHA et al., 2015). Além disso, essas características também são fundamentais para alimentar modelos matemáticos e para o estudo do fluxo não saturado da água, entretanto, a medição destas é, muitas vezes, complexa e laboriosa (ESPEJO et al., 2014).

Gardner (1956) foi o primeiro a propor um método para determinação da difusividade, utilizando dados de saídas de uma placa de pressão. Posteriormente, Bruce e Klute (1956) propuseram um método para determinação da difusividade do solo por meio da avaliação do conteúdo de água pela infiltração horizontal em um cilindro, em função da distância em um

tempo definido. Em seu método, foi utilizada a transformação de Boltzmann (BOLTZMANN, 1894) para converter a equação de Richards em uma equação diferencial ordinária.

Vários outros autores propuseram e adaptaram formas para se determinar a difusividade. Whisler, Klute e Peters (1968) adaptaram o método anterior, utilizando pontos fixos ao longo da coluna para medição da umidade do solo, além de utilizar amostras indeformadas. McBride e Horton (1985) determinaram um método para calcular a difusividade por meio de uma equação empírica para ajuste do perfil de umidade do solo. Já Šimuněk et al. (2000) utilizaram estimativa de parâmetros para analisar dados de infiltração horizontal para obter a função da difusividade do solo.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi estimar a difusividade e hidráulica, seguindo o método proposto por Bruce e Klute (1956), para quatro classes de solos comumente encontrados na região do sul de Minas Gerais, além de utilizar a equação para ajuste da curva θ vs. λ utilizada por Oliveira (2018) a fim de validar se esta está adequada para os solos aqui utilizados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Análises Físicas de Solo do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Lavras, MG. Para esse experimento foram coletadas quatro amostras de diferentes classes de solo (TABELA 1). Após serem coletados, os solos foram secos ao ar, destorroados e passados em peneiras de 2,0 mm de abertura visando à homogeneização dos solos. Na Tabela 1, encontram-se as características de cada solo.

Tabela 1 — Propriedades e localidade dos solos.

Textura do solo	Argila	Silte	Areia	Densidade (g cm ⁻³)	Classe do solo	Localidade	
						Lat. (S)	Long.(O)
Franco arenoso	13	9	78	1,57	Neossolo quartzarênico	21° 21,7'	44° 52,4'
Franco argiloso	33	30	37	1,33	Cambissolo háplico	21° 13,8'	44° 59,2'
Franco siltoso	18	60	22	1,33	Latossolo Vermelho-amarelo	21° 8,6'	44° 55,3'
Muito argiloso	61	26	13	1,06	Latossolo vermelho	21° 13,9'	44° 57,9'

Fonte: Do autor (2019).

A difusividade da água no solo foi calculada utilizando o método proposto por Bruce e Klute (1956) em que é analisado o avanço da frente de molhamento em uma coluna horizontal. A coluna utilizada é dividida em quinze anéis cilíndricos de acrílico; os sete primeiros de 2 cm de comprimento, seguidos por outros cinco de 1 cm, outros dois de 0,5 cm e o último com 2 cm de comprimento que foi utilizado apenas para suporte e fechamento da coluna, totalizando o tamanho da coluna em 22 cm, então utilizados somente os 20 primeiros cm.

Foi utilizada uma fita adesiva transparente visando à fixação dos anéis. Os solos foram adicionados na coluna por camadas sucessivas homogêneas de solo e com compactações suaves, por meio de soquete de plástico, a fim de se ajustarem as densidades desejadas, conforme Tabela 1. Após o preenchimento de toda a coluna, ela foi ligada a um frasco de Mariotte através de uma mangueira conectada a uma placa porosa, que entrava em contato com o solo. No decorrer de todo o experimento, foi exercida uma pressão negativa de carga constante de -3,0 cm com o centro da coluna como referência.

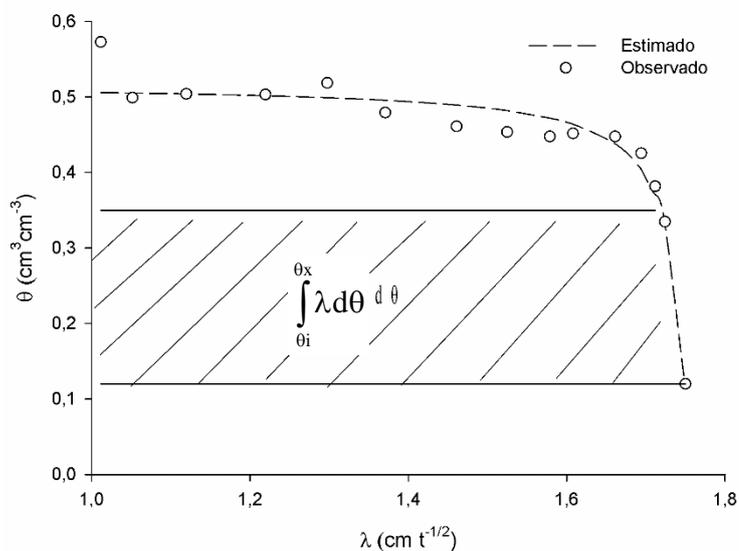
Depois de montada a coluna e conectada ao Mariotte, o fornecimento de água era liberado, iniciando também a cronometragem do tempo. Posteriormente, quando a frente de molhamento alcançava o fim de cada anel, o tempo era anotado. Isso foi realizado em todos os anéis do cilindro até que atingisse o penúltimo anel, de 20 cm, e então o tempo total foi obtido, encerrando-se o fornecimento de água. Vale lembrar que a referência adotada para anotar o tempo de avanço da frente de molhamento foi o meio da coluna, ou de cada anel, no sentido vertical.

Feito isso, a coluna era desconectada do Mariotte e os anéis separados da coluna, de forma que o solo presente em cada um dos anéis pudesse ser pesado e seco em estufa a 105° C por 48 horas. Após a secagem, o solo foi novamente pesado e descartado.

A difusividade pode ser obtida pela derivação e integração da função θ vs. λ , representada graficamente na Figura 1, onde θ é a umidade do solo e λ ($x t^{-1/2}$) é a variável de Boltzmann que depende tanto do tempo “t” quanto da distancia “x”

Para ajuste da equação θ versus λ (FIGURA 1) foi utilizada a mesma equação adotada por Oliveira (2018) (EQUAÇÃO 1). Para a determinação dos parâmetros da equação o software Table Curve 2 D v. 5 0.1 foi utilizado, possibilitando que a derivada e a integral da função θ (λ) pudessem ser determinadas analiticamente.

Figura 1— Curva de distribuição de umidade em função da variável de Boltzmann.



Fonte: Do autor (2019).

$$\theta = \frac{(a + c\lambda)}{(1 + b\lambda)} \quad (1)$$

Em que:

θ : conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

a, b e c: coeficientes da equação;

λ : variável de Boltzmann.

Para a determinação da difusividade, foi feita a plotagem dos dados experimentais, possibilitando a obtenção do gráfico $\theta(\lambda)$, permitindo a obtenção das integrais e derivadas para as diferentes umidades obtidas. Dessa maneira, a difusividade foi definida para pequenos incrementos de umidade por meio da Equação 2.

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \int_{\theta_i}^{\theta_x} \lambda d\theta \quad (2)$$

Em que:

D: difusividade, $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$;

λ : transformação de Boltzmann, $\text{cm min}^{-1/2}$;

θ : umidade com base em volume, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

θ_i : umidade inicial, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

θ_x : umidade final, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

A partir do modelo proposto (EQUAÇÃO 1), foram realizadas as operações de derivação e integração necessárias para se calcular a difusividade, de acordo com as Equações 3, 4 e 5.

$$\lambda = \frac{(a - \theta)}{(b\theta - c)} \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{c - ab}{(c - b\theta)^2} \quad (4)$$

$$\int_{\theta_i}^{\theta_x} \lambda d\theta = \left[-\frac{\theta}{b} - \frac{\ln(c - \theta b)(c - ab)}{b^2} \right]_{\theta_i}^{\theta_x} \quad (5)$$

Os indicadores estatísticos ME (média dos quadrados dos erros), RQME (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros), “IW” (índice de concordância de Willmott) e E_f (eficiência do modelo) foram aplicados para determinar o nível de ajuste alcançado pelo modelo e estão descritos nas Equações 6, 7, 8, e 9, respectivamente.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \quad (6)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (7)$$

$$IW = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (8)$$

$$E_f = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

Em que:

E_i : valor estimado;

O_i : valor observado;

\bar{O} : média do valor observado;

n : número de dados;

E_f : eficiência do modelo.

Para a determinação da curva de retenção, as amostras deformadas, foram saturadas em anéis metálicos de 3 cm de diâmetro por 5 cm de altura. As densidades dos solos nos anéis foram de 1,06, 1,57, 1,33 e 1,33 g cm⁻³ para os solos: muito argiloso, franco arenoso, franco argiloso e franco siltoso, respectivamente. Após a saturação, as amostras foram submetidas a tensões de 1, 2, 4, 5, 6 kPa, utilizando a mesa de tensão, e de 50 e 200 kPa no extrator de Richards. Por fim, os pontos de alta pressão, em torno de 1500 kPa, foram obtidos por meio do equipamento WP4. A curva foi ajustada utilizando o modelo proposto por Van Genuchten (1980), presente na Equação 10, a derivada foi apresentada na Equação 11.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^m} \quad (10)$$

$$\frac{d\psi_m}{d\theta} = \frac{-(\theta_s - \theta_r)^{\left(\frac{1}{m}\right)} \left[(\theta_s - \theta_r)^{\left(\frac{1}{m}\right)} - (\theta - \theta_r)^{\left(\frac{1}{m}\right)} \right]^{\left[\frac{(1-n)}{n}\right]}}{\alpha mn \left[(\theta - \theta_r)^{\left(\frac{1}{m}\right)} \right]^{\left[\frac{(1-n)}{n}\right]} (\theta - \theta_r)^{\left[\frac{(m+1)}{m}\right]}} \quad (11)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r = umidade volumétrica residual do solo no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

ψ_m = Potencial da água no solo (cm);

a,m,n = parâmetros de ajuste do modelo.

Segundo Philip (1969), é possível definir a sortividade, usando a curva λ por θ . A sortividade é a capacidade de um solo homogêneo em absorver líquido por capilaridade, (EQUAÇÃO 12).

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta_x} \lambda(\theta) d\theta \quad (12)$$

Em que:

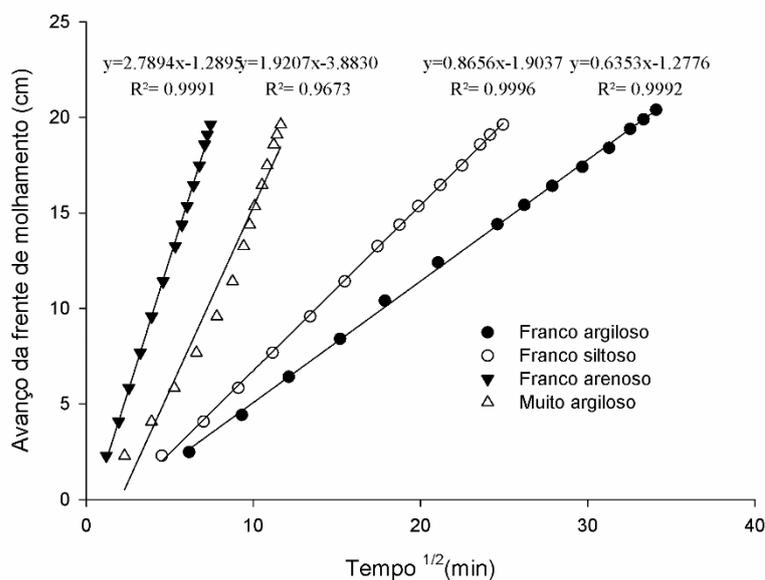
S: sortividade, em $\text{cm min}^{-1/2}$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível observar na Figura 2 o avanço da frente de molhamento com a raiz quadrada do tempo. Pode-se notar que, quanto menor o coeficiente angular da reta, maior o tempo para frente alcançar o fim da coluna, 20 cm. Para o solo franco arenoso o movimento da água se deu mais rapidamente, alcançando o fim da coluna em 55 min. Para o solo muito argiloso e franco siltoso os tempos foram, respectivamente, de 135 e 622 min. Finalmente, a frente de molhamento avançou mais lentamente no solo franco argiloso, levando 1162 min para alcançar o fim da coluna.

Observa-se, também, que para o solo franco argiloso o coeficiente linear foi o maior entre os solos, indicando que houve uma resistência à infiltração no início do ensaio. Vale ressaltar que para esse solo, foi utilizada uma placa porosa diferente, o que pode ter sido a causa da situação relatada.

Figura 2 — Avanço da frente de umedecimento em função da raiz quadrada do tempo ao longo do ensaio de infiltração horizontal para os solos estudados.

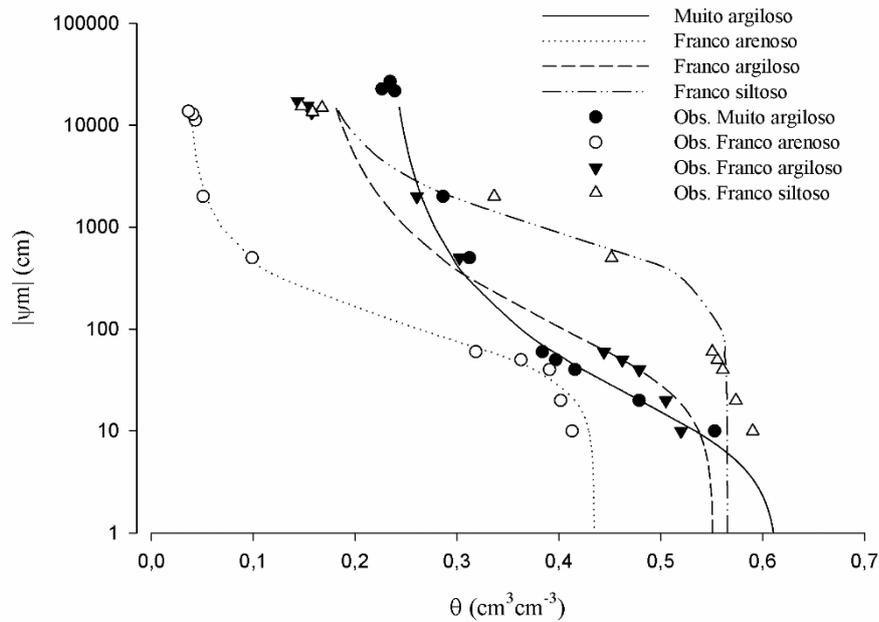


Fonte: Do autor (2019).

A textura do solo é um dos principais fatores que determinam a retenção de água no solo, em função do tamanho dos poros, estrutura e porosidade, além desta não mudar em pequenas escalas de tempo (KLEIN; KLEIN, 2015). Na Figura 3, estão apresentadas as curvas de retenção de água no solo para cada solo em função de sua classe textural e na Tabela 2, os parâmetros dos ajustes.

Conforme salientam diversos trabalhos, solos com maiores teores de argila têm maior capacidade de retenção de água, enquanto aqueles com textura arenosa têm menor capacidade. Esse fato também ficou evidenciado no presente trabalho, porém, o solo franco siltoso apresentou maior energia de retenção em relação ao solo com maior teor de argila, reduzindo essa energia em altas tensões nas quais a adsorção da argila se torna mais importante.

Figura 3 — Curva de retenção dos solos ensaiados. Potencial matricial apresentado em escala logarítmica.



Fonte: Do autor (2019).

Tabela 2 — Parâmetros de ajuste das curvas de retenção pelo modelo de van Genuchten Mualem.

Solo	θ_s	θ_r	α	n	m	R^2
Franco arenoso	0,4346	0,0360	0,0154	1,9070	0,4756	0,9958
Franco argiloso	0,5516	0,1514	0,0237	1,4421	0,3066	0,9799
Franco siltoso	0,5653	0,1577	0,0016	1,8822	0,4687	0,9832
Muito argiloso	0,6157	0,2277	0,1129	1,4316	0,3015	0,9904

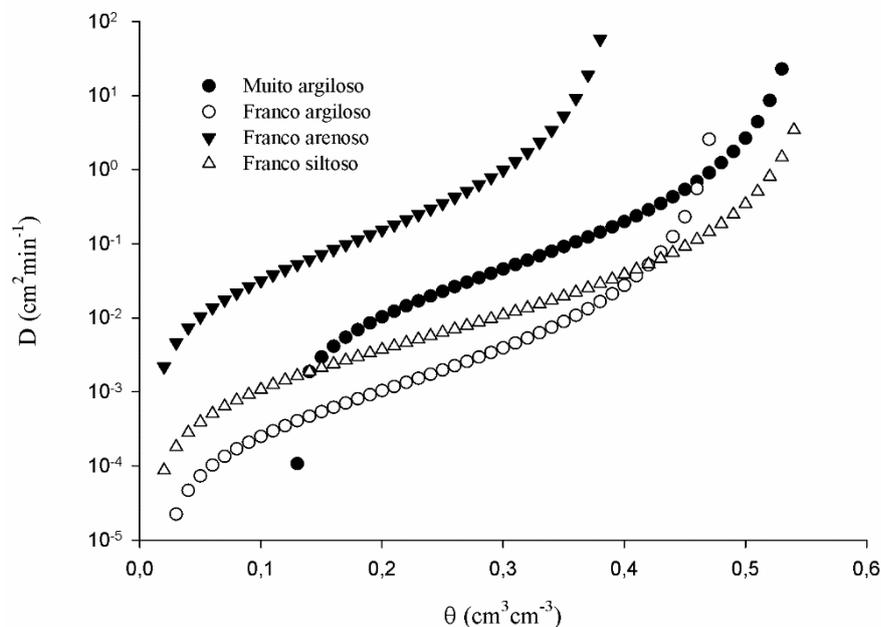
Fonte: Do autor (2019).

O comportamento da difusividade média pode ser visto na Figura 4. Como esperado, a difusividade aumentou com a umidade. Os solos arenoso e muito argiloso apresentaram maiores valores de difusividade, enquanto os solos franco siltoso e franco argiloso

apresentaram os menores valores, o último teve um grande acréscimo a partir de $0,4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de umidade.

Outro fato a ser considerado é a classificação do solo muito argiloso, um Latossolo vermelho. Essa classe de solo geralmente apresenta estrutura granular devido à agregação das partículas de argilas. Adicionalmente, também possui grande quantidade de macroporos e altos valores de porosidade total, resultando em boas condições de infiltração. Essas características são a explicação pelos altos valores de difusividade desse solo, mesmo que possua alto teor de argila.

Figura 4 — Difusividade média para os solos ensaiados. Difusividade apresentada em escala logarítmica.



Fonte: Do autor (2019).

Os ajustes do modelo proposto, bem como seus dados estatísticos estão apresentados na Tabela 3. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram elevados, ficando entre 0,8569 e 0,9463, indicando que o modelo se adequou bem para todos os solos. Em relação aos valores do ME e RQME, ambos foram baixos, indicando um bom ajuste do modelo, pois quanto menores os valores, melhor o ajuste. Já o IW e o EF ficaram próximos de 1, comprovando o bom desempenho do ajuste. O solo muito argiloso foi o que apresentou pior ajuste em função dos índices calculados.

Oliveira (2018) encontrou em seu estudo sobre a dinâmica de água em um vertissolo, valores de IW de 0,999 para todas as repetições e E_f na faixa de 0,74 a 0,95, para o mesmo modelo aqui utilizado.

Tabela 3 — Ajuste do modelo aos dados de θ e λ e valores estatísticos.

Solo	Modelo	R ²	ME	RQME	IW	EF
Franco arenoso	$\frac{0,3857 - 0,1403\lambda}{1 - 0,3564\lambda}$	0,9463	0,000391	0,019768	0,988105	0,949505
Franco argiloso	$\frac{0,4763 - 0,7912\lambda}{1 - 1,6524\lambda}$	0,9153	0,001086	0,032956	0,983192	0,935736
Franco siltoso	$\frac{0,5517 - 0,6909\lambda}{1 - 1,2349\lambda}$	0,8903	0,001522	0,039016	0,982214	0,927421
Muito argiloso	$\frac{0,5363 - 0,3055\lambda}{1 - 0,5593\lambda}$	0,8569	0,00148	0,03847	0,971487	0,863795

Fonte: Do autor (2019).

Outra forma de se obter informações sobre a capacidade do solo em reter água por capilaridade é por meio da sortividade. Esse parâmetro reflete a facilidade do solo em reter água por capilaridade (PHILIP, 1969), e é governado por propriedades do solo como textura, densidade, porosidade e grau de agregação (SHAVER et al., 2013). Na Tabela 4, encontram-se os valores de sortividade para os solos avaliados. Os valores seguiram a seguinte ordem: franco argiloso > franco siltoso > muito argiloso > franco arenoso.

Tabela 4 — Sortividade em função dos solos estudados.

Sortividade (cm min ^{-1/2})	
Franco arenoso	0,9625
Franco argiloso	0,2664
Franco siltoso	0,4115
Muito argiloso	0,6763

Fonte: Do autor (2019).

4 CONCLUSÃO

É possível calcular a difusividade de água no solo para solos de diferentes classes texturais, utilizando o modelo proposto para determinação da curva θ vs. λ .

A difusividade decresceu expressivamente com a umidade enquanto que o solo arenoso apresentou o maior valor de sortividade e solo franco argiloso o menor.

REFERÊNCIAS

- BOLTZMANN, L. Zur Integration der Diffusionsgleichung bei variabeln Diffusionscoefficienten. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 289, n. 13, p. 959–964, Jan. 1894.
- BRUCE, R. R.; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity¹. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 24, n. 4, p. 458–462, Oct. 1956.
- CONCEIÇÃO, B. S. **Dinâmica de água e potássio em substratos comerciais**. 2013. 92 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- CONCEIÇÃO, B. S. et al. Difusividade e condutividade hidráulica não saturada de substratos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p. 607–614, jun. 2014.
- CUNHA, F. N. et al. Influência da difusividade e condutividade hidráulica na infiltração de água em um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 3, p. 102–112, 2015.
- ESPEJO, A. et al. A method for estimating soil water diffusivity from moisture profiles and its application across an experimental catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 516, p. 161–168, Aug. 2014.
- EVANGELIDES, C.; ARAMPATZIS, G.; TZIMOPOULOS, C. Estimation of soil moisture profile and diffusivity using simple laboratory procedures. **Soil Science**, Baltimore, v. 175, n. 3, p. 118–127, Mar. 2010.
- GARDNER, W. R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data¹. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 20, n. 3, p. 317-320, July 1956.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Elsevier, 1998. 771 p.
- KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 21–29, jan./abr. 2015.
- MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.
- McBRIDE, J. F.; HORTON, R. An empirical function to describe measured water distributions from horizontal infiltration experiments. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 21, n. 10, p. 1539–1544, Oct. 1985.
- OLIVEIRA, M. C. **Dinâmica d'água em um Vertissolo da bacia do rio São Francisco sob influência de sódio**. 2018. 72 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- PHILIP, J.-R. Theory of infiltration. **Advances in Hydroscience**, New York, v. 5, p. 215-296,

1969.

RAMOS, T. et al. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 2, p. 252–264, July 2011.

SHAVER, T. M. et al. Soil sorptivity enhancement with crop residue accumulation in semiarid dryland no-till agroecosystems. **Geoderma**, Bethesda, v. 192, p. 254–258, Jan. 2013.

ŠIMUNEK, J. et al. Horizontal infiltration revisited using parameter estimation. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, n. 9, p. 708–717, Sept. 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils¹. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892–898, Sept. 1980.

WHISLER, F. D.; KLUTE, A.; PETERS, D. B. Soil water diffusivity from horizontal infiltration¹. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, n. 1, p. 6–11, Jan. 1968.

Segundo artigo:

**VARIAÇÃO DE VAZÃO EM EMISSORES DE GOTEJAMENTO EM FUNÇÃO DA
INSTALAÇÃO EM SUBSUPERFÍCIE PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

**VARIATION IN THE FLOW RATE OF DRIP EMITTERS IN A SUBSURFACE
IRRIGATION SYSTEM FOR DIFFERENT SOIL TYPES**

(VERSÃO PRELIMINAR)

Artigo redigido nas normas da **Agricultural Water Management Journal**.

RESUMO

Vários estudos têm mostrado que a irrigação é fundamental para o desenvolvimento agrícola mundial, entretanto a água é um recurso que deve ser utilizado da maneira mais eficiente possível, seguindo um manejo adequado. Nesse sentido, procura-se, cada vez mais, técnicas de irrigação eficientes no uso da água como, por exemplo, o gotejamento subsuperficial. Esse sistema apresenta elevada eficiência e é uma ótima alternativa para o manejo racional da água, entretanto este também apresenta algumas limitações como a variação da vazão em função das características do solo. Esse sistema tem sido utilizado apenas encoberto por uma pequena camada de solo, principalmente nas áreas de cafeicultura irrigada do Brasil, uma vez que a grande parte dos pesquisadores investigam os fenômenos envolvidos com a variação de vazão em maiores profundidades. O objetivo do presente trabalho foi avaliar dois emissores enterrados a 5 cm de profundidade visando à determinação da variação de vazão em quatro diferentes solos. Os solos avaliados foram classificados em franco arenoso, franco siltoso, franco argiloso e muito argiloso, enquanto os emissores avaliados foram um emissor autocompensante, Rain Bird XFS[®], e outro não autocompensante, Rivulis Hydrogol[®]. Para o primeiro emissor, houve redução de vazão apenas para o solo clay. Já para o segundo emissor, não houve redução de vazão apenas no solo silt loam, para todos os solos. Mesmo em pequenas profundidades a vazão pode ser afetada, uma vez que a classe de solo é fator condicionante para a variação, especialmente em emissores não autocompensantes. Dessa forma, essas variações devem ser levadas em consideração para os projetos de sistemas instalados em pequenas profundidades.

Palavras chave: Irrigação subsuperficial por gotejamento; pequenas profundidades; solos; movimento de água no solo.

ABSTRACT

Several studies have shown that irrigation is essential for global agricultural development; however, water is a limited resource and should be used as efficiently as possible, requiring appropriate management. In this sense, the search is continuous for irrigation techniques that are more efficient in water use, such as subsurface drip irrigation. This system presents high efficiency and is a great alternative for the improvement in water use; however, it also has some limitations, such as the flow rate variation that can occur according to the soil characteristics. This system has been used just covered only by a small soil layer in some irrigated crops such as coffee in Brazil. Because most of the studies investigated the phenomena involved in the flow rate variation at greater depths, the present study aims to evaluate two emitters buried at 5 cm depth to determine the flow rate variation in four different soils. The evaluated soils were classified as sandy loam, silty loam, clay loam and clay, whereas the emitters evaluated were a pressure-compensating drip emitter, the XFS model, and a no-pressure-compensating one, the Hydrogol model. For the XFS emitter, a flow rate reduction was observed only for the clay soil. For the second emitter, a reduction in the flow rate was observed for all soils, except for the silty loam soil. Even at small depths, the flow rate can vary, and the soil type is a parameter that affects such variation, especially for the non-pressure-compensating emitter.

Keywords: Subsurface Drip Irrigation (SDI); small depths; soils; soil water movement.

1 INTRODUÇÃO

O uso do sistema de gotejamento subsuperficial tem se intensificado e apresenta algumas peculiaridades como a aplicação de água diretamente nas proximidades do sistema radicular das plantas sem molhar a superfície do solo, proporcionando pequenas perdas por evaporação e, com isso, a alta eficiência de aplicação (Ayars et al., 1999; Fan and Li, 2018). Uma vez que as tubulações não ficam expostas na superfície, danos mecânicos e por radiação solar são minimizados, o que facilita tratamentos culturais e aumenta a longevidade do sistema (Martínez and Reza, 2014).

Por ser uma variação do gotejamento superficial, o sistema em subsuperfície também pode ter como desvantagem o alto risco de entupimento que pode ser agravado por intrusão de raízes (Gil et al., 2011). Uma das principais diferenças entre os sistemas superficial e subsuperficial é que, no último, a característica do solo pode afetar a vazão do emissor (Gil et al., 2008), afetando a uniformidade do sistema.

Diversos autores vêm realizando estudos sobre essa questão, Warrick and Shani (1996) e Warrick and Shane (1996) investigaram o efeito da condutividade hidráulica dos solos na variação da vazão de emissores enterrados; Lazarovitch et al., (2006, 2005) investigaram o efeito das propriedades do solo utilizando modelos matemáticos, enquanto Fan and Li (2018) e Ren et al. (2018) estudaram os efeitos causados pela densidade aparente e umidade inicial na vazão dos emissores. Ren et al. (2018) desenvolveu, ainda, um modelo que leva em conta tais parâmetros, além de analisar o efeito da variabilidade dos solos na descarga de linhas laterais.

Shani et al. (1996) mediu a pressão em emissores enterrados em campo e constatou que, quando a intensidade de aplicação do emissor é maior que a infiltrabilidade do solo, a carga de pressão ao redor do emissor se torna positiva, causando uma contrapressão que reduz o gradiente hidráulico entre o interior do emissor e o solo, conseqüentemente, reduzindo a vazão deste (Gil et al., 2008; Shani et al., 1996). Constatou-se também, em geral que, em solos de textura fina, o efeito da contrapressão é mais pronunciado, resultando em uma maior redução da vazão (Gil et al., 2008; Shani et al., 1996).

Ao redor de um ponto de emissão enterrado desenvolve-se uma cavidade onde a água flui livremente, e o raio dessa cavidade afeta o valor da contrapressão. Gil et al. (2010) observaram a formação dessa cavidade e a relacionaram com a vazão do emissor. Gil et al, (2011) avaliaram a variação de vazão de diferentes emissores em dois tipos de solo, propondo

por meio de simulações, procedimentos para determinar a máxima variação de vazão considerando os efeitos das propriedades hidráulicas do solo.

Essas variações na vazão devido às propriedades do solo podem afetar o desempenho do sistema subsuperficial, podendo-se aplicar quantidades inadequadas de água (Ren et al., 2017), além de afetar na homogeneidade da aplicação, e conseqüentemente, afetar, também, as taxas de aplicação de nutrientes (Lazarovitch et al., 2006).

A maior parte dos trabalhos citados, que investigam a variação da vazão de emissores em função as características do solo e da contrapressão, foram realizados em profundidades entre 10 e 40 cm. Porém, para algumas culturas, como é o caso de grandes áreas irrigadas por gotejamento enterrado em cultivos de café no Brasil, tem-se observado a tendência de apenas encobrir os emissores com uma pequena camada de solo, a fim de proteger as tubulações de danos mecânicos. Em irrigação paisagística, esse comportamento se repete, podendo as linhas laterais ser encobertas com uma pequena camada de solo ou até mesmo cobertura vegetal (Waller and Yitayew, 2016). Além disso, existe pouca informação nos catálogos de fabricante quanto à variação de vazão dos emissores quando enterrados.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a variação de vazão causada pelo uso de dois emissores em subsuperfície, enterrados a 5 cm de profundidades em 4 diferentes classes de solos, além de elaborar os perfis de avanço de umidade volumétrica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Solos

Os quatro solos utilizados foram coletados em diferentes localidades na região sul do estado de Minas Gerais. Buscou-se contemplar as diferentes classes de solo dessa região que é muito expressiva na produção de café no Brasil. As amostras de solo apresentaram as seguintes texturas, conforme sistema de classificação textural USDA: franco arenoso (FAR), franco argiloso (FAG), franco siltoso (FST) e muito argiloso (MAG), conforme Tabela 1.

Tabela 1

Classificação textural, densidade e condutividade hidráulica saturada dos solos: franco arenoso, franco argiloso, franco siltoso e muito argiloso.

Textura do solo	Argila	Silte	Areia	Densidade	K₀
		(%)		(g cm ⁻³)	(cm min ⁻¹)
Franco arenoso (FAR)	13	9	78	1,57	0,0788
Franco argiloso (FAG)	33	30	37	1,33	0,0080
Franco siltoso (FST)	18	60	22	1,33	0,0013
Muito argiloso (MAG)	61	26	13	1,07	2,0542

K₀: Condutividade hidráulica saturada.

Foi coletado solo ao longo do perfil de 5 a 30 cm de profundidade, após removida a camada superficial. Todos foram secos ao ar e passados por peneira de malha de 2 mm. A umidade gravimétrica antes de cada ensaio foi de aproximadamente 1 %. A análise textural foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

A curva de retenção de água do solo (Fig 1) foi ajustada pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), as amostras foram submetidas a tensões de 1, 2, 4, 5, 6, 50, 200 e 1500 kPa, em três repetições para cada solo. Por fim, a condutividade hidráulica saturada foi determinada em um permeâmetro de carga constante para todos os solos, exceto para o franco siltoso, que foi determinada pelo método do permeâmetro de carga variável. Para ambos os casos foram utilizadas 3 amostras deformadas de cada solo, e a densidade ajustada conforme Tabela 1, com 3 repetições cada amostra.

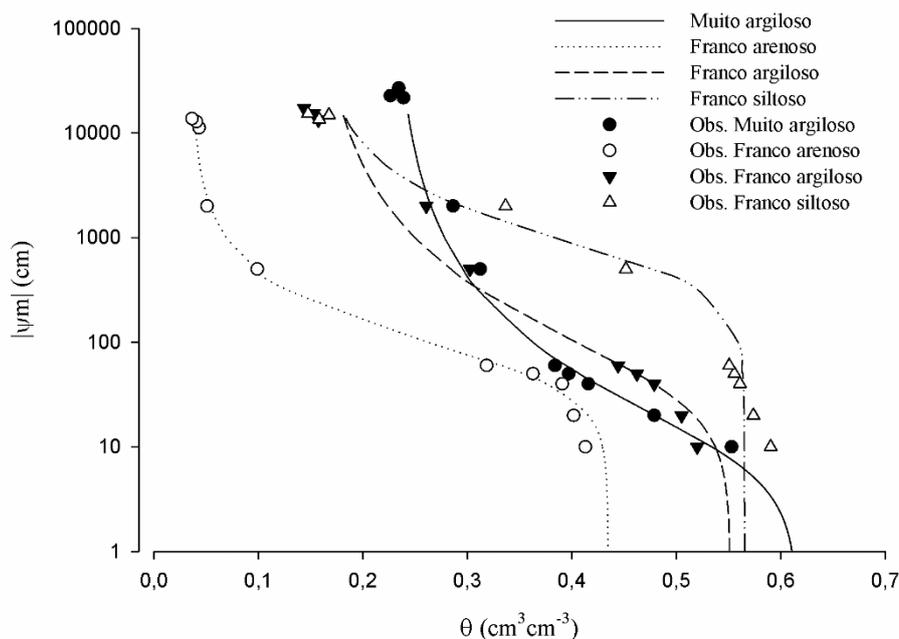


Fig. 1. Curva de retenção de água dos solos: franco arenoso, franco argiloso, franco siltoso e muito argiloso.

2.2 Emissores e medições de vazão

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Foram avaliados dois tipos de tubo gotejadores: o primeiro foi o Rain Bird XFS[®] (RB) de 2,3 l h⁻¹, autocompensante com faixa de compensação de 59 kPa a 414 kPa, espessura de parede de 1,24 mm e diâmetro externo de 16,1 mm; o outro emissor foi o Rivulis Hydrogol[®] (HG) de 4,0 l h⁻¹, não autocompensante, com faixa de trabalho recomendada de 80 kPa a 140 kPa, espessura de parede de 0,90 mm e diâmetro externo de 16 mm. Ambas as medições das vazões, superficial e subsuperficial, foram realizadas sob pressão de funcionamento de 100 kPa, o tubo gotejador foi enterrado a 5 cm da superfície no solo, com 4 repetições para cada tubo gotejador nas 4 classes de solo em ambas as posições.

Os testes foram conduzidos usando um aparato experimental (Fig. 2) constituído por um compressor de ar, ligado a uma válvula reguladora de pressão (± 2 kPa) que, por sua vez foi conectado a um frasco de Mariotte construído em tubo PVC com 1,2 metros de altura e diâmetro de 125 mm, conectado a uma célula de carga calibrada, com capacidade de carga de 100 kg ($\pm 0,02$ kg), com compensação de temperatura, suspenso com auxílio de um tripé. Esta foi calibrada antes do início dos testes. Os tubos gotejadores foram inseridos em um recipiente

de plástico com 440 mm de diâmetro por 605 mm de altura, com pressão monitorada por um transdutor de pressão (± 3 kPa). Utilizou-se o mesmo aparato para a coleta de dados da curva vazão vs. pressão, em condição superficial, dos emissores avaliados, de acordo com ABNT (2006).

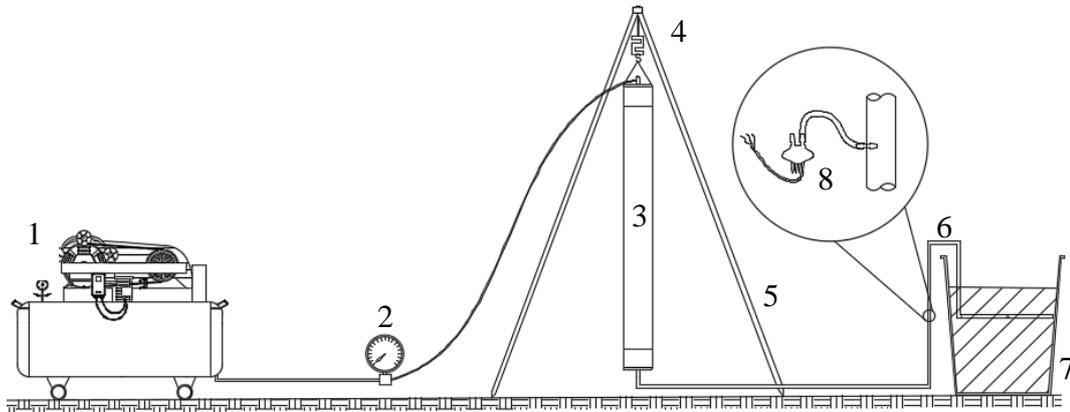


Fig. 2. Aparato utilizado para a avaliação da vazão dos emissores. Compressor de ar; 2: Válvula reguladora de pressão; 3: Frasco Mariotte; 4: Célula de carga; 5: Tripé metálico; 6: Tubo gotejador; 7: Recipiente de plástico; 8: Transdutor de pressão.

A umidade do solo foi monitorada por 6 sensores 10 HS da Decagon devices[®] ($\pm 0,03$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), instalados conforme Fig. 3. Os dados foram adquiridos em intervalos de tempo de 6 min por um datalogger da marca Campbell Scientific[®], modelo CR10, e transferidos para um computador. Com os valores de umidade coletados, foram elaborados mapas do avanço da frente de umidade por meio de kigagem.

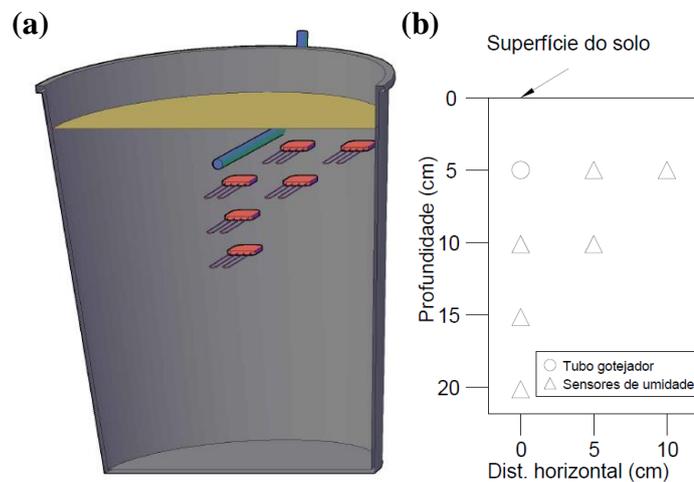


Fig. 3. Esquema de instalação dos sensores de umidade, tridimensional para visualização dos sensores (a) e posição dos sensores (b).

Para a medição da vazão subsuperficial, o solo foi adicionado no recipiente em sucessivas camadas de 5 cm, até a altura de 30 cm. Após a adição de cada camada, o recipiente foi erguido a uma altura de 20 cm e solto, a fim de proporcionar uma conformação do solo de forma similar para todos os tratamentos. As densidades médias resultantes, coletadas por anéis cilíndricos no interior do recipiente, foram de 1,57, 1,33, 1,33 e 1,06 g cm⁻³ para os solos FAR, FAG, FST e MAG, respectivamente (Tabela 1). A linha do tubo gotejador, de 30 cm de comprimento, contendo um emissor, foi submetida a um tempo de funcionamento de 1 hora, a vazão foi determinada pela diferença da massa do frasco mariotte em função do tempo de coleta de dados, conforme Equação 1. A vazão com o gotejador na superfície do solo foi realizada da mesma forma.

$$q = \frac{(m_i - m_{i+t})60}{t\rho 1000} \quad (1)$$

Sendo:

m_i = Massa do frasco mariotte no tempo inicial, g;

m_{i+t} = Massa do frasco mariotte após o intervalo de tempo de coleta, g;

t = Tempo de coleta, min;

ρ = Massa específica da água, g cm⁻³.

2.3 Delineamento experimental

Para a análise da vazão e pressão subsuperficial de cada um dos os emissores, foram utilizadas parcelas subdivididas com delineamento inteiramente casualizado. O tempo foi a variável principal e a classe dos solos variável secundária. Os tratamentos da variável tempo foram intervalos de tempo de 6 min durante o tempo de funcionamento de 1 hora, enquanto que as quatro classes de solos citadas anteriormente foram os tratamentos da variável secundária. Para a análise da média, o teste tukey a 5% de significância foi utilizado.

Em relação à comparação das vazões superficial e subsuperficial, também foram utilizadas parcelas subdivididas com delineamento inteiramente casualizado. A variável principal foi o posicionamento dos emissores, os tratamentos são a posição superficial e subsuperficial, e a secundária a classe do solo, com os mesmos tratamentos da análise anterior.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 4, encontram-se as curvas vazão vs. pressão para ambos os emissores avaliados em superfície. Os resultados se encontram dentro da faixa de vazão apresentada pelos fabricantes e o comportamento específico de cada um dos gotejadores quanto à autocompensação fica evidente, e pode ser comprovado pelos valores dos expoentes de descarga dos emissores encontrados.

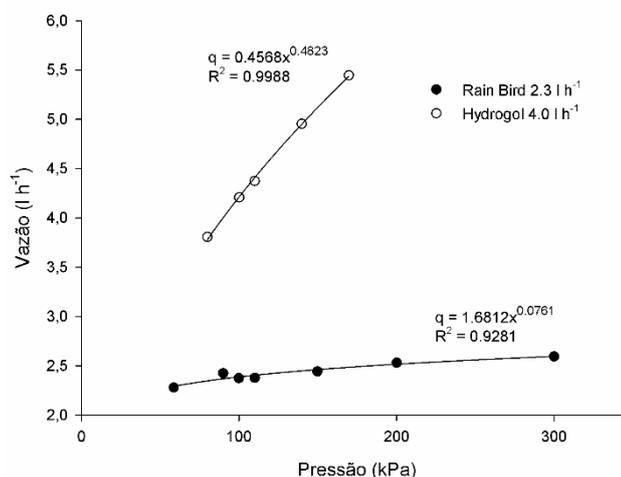


Fig. 4. Curvas de correlação vazão vs. pressão para os emissores avaliados.

Nas tabelas 2 e 3, estão apresentados os dados da análise de variância para a variação da vazão dos gotejadores e da pressão de funcionamento, em função do intervalo de tempo, solo e posição.

Tabela 2

Análise de variância das avaliações da vazão e pressão em função dos tratamentos para o emissor Rivulis Hydrogol.

Causas de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio e significância de F	
		Vazão	Pressão
Intervalos de tempo	9	0,0189 ^{NS}	1,3622 ^{NS}
Resíduo (a)	30	0,0133	10,6411
Solo	3	0,0579*	22,5198*
Tempo x Solo	27	0,0103 ^{NS}	1,3961 ^{NS}
Resíduo (b)	90	0,0095	3,3230
Posição	1	0,0669*	1,9907 ^{NS}
Resíduo (c)	6	0,0028	8,2544

NS: não significativo. *: significativo pelo teste F a 5% de probabilidade

Tabela 3

Análise de variância das avaliações da vazão e pressão em função dos tratamentos para o emissor Rain Bird XFS.

Causas de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio e significância de F	
		Vazão	Pressão
Intervalo de tempo	9	0,0237 ^{NS}	0,2696 ^{NS}
Resíduo (a)	30	0,0191	1,0532
Solo	3	0,0206 ^{NS}	81,9794*
Tempo x Solo	27	0,0138 ^{NS}	0,2747 ^{NS}
Resíduo (b)	90	0,0143	0,7695
Posição	1	0,0545*	0,1278 ^{NS}
Resíduo (c)	6	0,0018	1,0844

NS: não significativo. *: significativo pelo teste F a 5% de probabilidade

Não houve diferenças significativas para a vazão subsuperficial dentre os intervalos de tempo analisados, isso mostra que esta não sofreu alteração durante o tempo de funcionamento do gotejador. Porém, encontrou-se diferença significativa para os valores médios de vazão em ambos os gotejadores, e diferença de vazão em alguns solos quando instalados em subsuperfície (Tabela 2 e 3). A vazão média foi menor, estatisticamente, em subsuperfície para ambos os gotejadores (Tabela 4), indicando que o fator que ocasionou a variação de vazão ocorreu logo nos primeiros minutos após o início do funcionamento, antes da primeira avaliação de vazão que foi 6 minutos após o início da irrigação.

Tabela 4

Comparação da vazão e pressão médias entre os testes superficiais e subsuperficiais em relação as classes de solos.

Textura do solo	Rain Bird		Hydrogol	
	Superficial	Subsuperficial	Superficial	Subsuperficial
	Vazão (2.3 l h ⁻¹)		Vazão (4.0 l h ⁻¹)	
FAR	2,34 a	2,27 a	4,29 a	4,14 b
FAG	2,32 a	2,22 a	4,32 a	4,21 b
FST	2,32 a	2,27 a	4,26 a	4,27 a
MAG	2,37 a	2,24 b	4,29 a	4,17 b
	Pressão (kPa)		Pressão (kPa)	
FAR	99,10 a	98,78 a	101,80 a	101,55 a
FAG	98,93 a	98,68 a	101,98 a	101,70 a
FST	102,00 a	101,74 a	102,75 a	101,99 a
MAG	99,92 a	100,25 a	100,77 a	100,07 a

Valores seguidos pela mesma letra nas linhas não diferencem entre si segundo teste Tukey a 5% de significância. Legenda: FAR: Franco arenoso; FAG: Franco argiloso; FST: Franco siltoso; MAG: Clay.

Gil et al. (2010) observaram que a contrapressão cresceu repentinamente no início da irrigação, tendo seu valor máximo antes de 3 min de teste, e em seguida decresceu rapidamente até se tornar constante, entre 3 e 6 min. O valor da contrapressão estabilizou-se para todas as repetições avaliadas pelo autor entre 0,5 e 0,6 mca. Esse comportamento também foi relatado por Rodríguez-sinobas et al. (2009), que ao avaliar linhas laterais em um solo franco observou que a vazão decresceu rapidamente e se tornou constante, tanto para emissores autocompensantes quanto não autocompensantes. Assumindo-se que a contrapressão reduz a vazão de emissores enterrados, pode-se inferir que a redução de vazão ocorrida no presente trabalho pode ter ocorrido por esse efeito, pois após 6 min de teste a vazão já havia reduzido.

Como pode ser observado na Fig. 5, apesar do gotejador autocompensante RB (2,3 l h⁻¹) apresentar a maior variação de vazão, apenas no solo muito argiloso esta foi significativa (5,3 %), ou seja, diferiu da vazão quando instalado superficialmente. Esse resultado vai contra ao encontrado por Gil et al. (2008) que não observaram diferenças entre a vazão superficial e subsuperficial de emissores autocompensantes, de 2 e 4 l h⁻¹, enterrados em solos argiloso e

arenoso, pois o valor da contrapressão foi menor que o limite inferior da faixa de compensação do emissor.

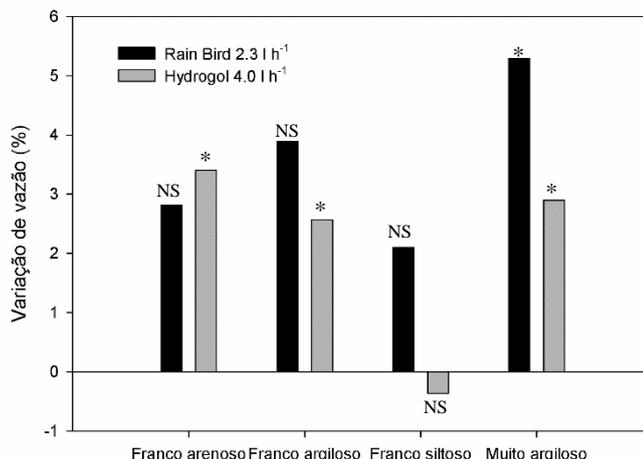


Fig. 5. Variação em porcentagem entre a vazão subsuperficial e superficial dos emissores avaliados. NS: não significativo. *: significativo pelo teste F a 5% de probabilidade

Gil et al. (2011), relataram diferenças de vazão, de emissores regulados de 2 l h⁻¹, enterrados em solo arenoso, menores que 1%, considerada intrínseca aos erros experimentais. Adicionalmente, os mesmos autores também encontraram valores de contrapressão muito menores que o limite inferior da faixa de compensação de pressão.

Entretanto, Rodríguez-sinobas et al. (2009) encontraram diferenças significativas para linhas laterais enterradas em solo franco, contendo emissores autocompensantes de 3,5 l h⁻¹, relatando que o elastômero do emissor regulado não atingiu total compensação dentro do tempo total de irrigação (30 min), o que fez a vazão do emissor decrescer rapidamente no início da irrigação, tornando-se constante com o tempo. Thebaldi et al. (2016) também encontrou que houve redução significativa da vazão tanto em gotejadores autocompensantes quanto não autocompensantes sob ação de contrapressão, em funcionamento submerso em água.

Para o gotejador HG, dentro das vazões em que se observou diferença estatística significativa, a maior variação de vazão foi para o solo franco arenoso (3,4 %) e a menor para o solo franco argiloso (2,6 %).

Pode-se observar que, para o gotejador com menor vazão (RB), o efeito da instalação em subsuperfície na vazão foi significativa somente no solo mais pesado. O gotejador HG que tem vazão maior e também não é autocompensante apresentou um efeito da instalação em subsuperfície na vazão em praticamente todos os solos, devido a maior susceptibilidade à

variação de vazão em função de não ser autocompensante. O solo franco siltoso não apresentou diferenças significativas.

Não foi possível identificar um efeito claro da condutividade hidráulica saturada dos solos (Tabela 1) nas variações de vazão, uma vez que era esperado que os solos com menores valores de condutividade resultassem em maiores variações de vazão.

A maior variabilidade para o solo argiloso, mesmo com a maior condutividade, pode ser explicada pelas peculiaridades do solo estudado, que é um Latossolo, o qual, apesar de possuir alto teor de argila, não possui características de um solo argiloso, ao invés disso, possui grande quantidade tanto de macro quanto de microporos (Silva et al., 2014), valores de condutividade saturada em torno de 10^{-4} a 10^{-7} m/s devido a sua estrutura granular (Fiori et al., 2010). Essas características próprias desse tipo de solo podem ter contribuído de alguma forma para a variação de vazão, além da variabilidade das propriedades do solo dentre as repetições.

Foi observado durante a execução do experimento que, em todas as repetições e para ambos os gotejadores testados no solo franco siltoso, houve um rápido aparecimento de um filete de água na superfície, devido ao baixo valor da condutividade hidráulica saturada. De acordo com Ben-Gal and Lazarovitch (2003) e Rodríguez-sinobas et al. (2009), quando ocorre uma pressão positiva ao redor de um emissor enterrado, pode-se criar caminhos preferenciais de água até a superfície do solo. Com isso e com a baixa profundidade de instalação, provavelmente a contrapressão foi praticamente nula, devido à ruptura da estrutura do solo em função da contrapressão, isso explica o fato de, para ambos gotejadores, a vazão subsuperficial não diferir da superficial, nesse solo.

Considerando as variações de vazão somente em subsuperfície, para as diferentes classes de solo com o uso do gotejador RB, não foram encontradas diferenças significativas. Já para o gotejador HG, observou-se efeito significativo em relação à classe de solo, ou seja, no solo (FST), ocorreu o maior valor de vazão ($4,24 \text{ l h}^{-1}$), e o solo (FAR) o menor ($4,15 \text{ l h}^{-1}$) (Tabela 5). É possível notar também que, mesmo com diferença significativa nos valores da pressão para o gotejador RB, esta não afetou a variação de vazão, devido à autocompensação do emissor.

Tabela 5

Valores de vazão e pressões médias dos emissores em 1 hora de funcionamento em subsuperfície para cada tipo de solo.

Textura do solo	Rain Bird 2,3 l h ⁻¹		Hydrogol 4,0 l h ⁻¹	
	Vazão (l h ⁻¹)	Pressão (kPa)	Vazão (l h ⁻¹)	Pressão (kPa)
FAR	2,27 a	98,74 c	4,15 b	101,62 a
FAG	2,28 a	98,63 c	4,18 ab	101,36 a
FST	2,29 a	101,72 a	4,24 a	101,56 a
MAG	2,24 a	99,81 b	4,20 ab	100,03 b

Valores seguidos pela mesma letra nas colunas não diferem entre si segundo teste Tukey a 5% de significância. Legenda: FAR: Franco arenoso; FAG: Franco argiloso; FST: Franco siltoso; MAG: Muito argiloso.

O resultado foi contrário ao esperado, uma vez que, em trabalhos anteriores tais como Gil et al. (2011, 2008), solos com textura arenosa apresentam pouca interferência na vazão em função de altos valores de condutividade hidráulica. Entretanto, esse fato pode ter ocorrido em consequência da maior densidade média durante os ensaios do solo franco arenoso (1,57 g cm⁻³).

Fan e Li (2018) demonstraram que, para um dado valor de pressão e umidade do solo, o aumento da densidade pode reduzir a vazão de um tubo gotejador enterrado. Com o aumento da densidade, os solos se tornam menos permeáveis, assim, em um ponto de emissão subsuperficial a água fica estagnada ao redor do emissor. O mesmo autor encontrou em seu estudo que um emissor subsuperficial em um solo arenoso, com 1,4 g cm⁻³ de densidade aparente e 18 % de umidade inicial, apresentou menor vazão que outros solos com maior teor de argila.

Na Fig. 6, encontram-se os dados de avanço da frente de umidade no solo com o emissor HG. Para esse emissor, conforme esperado, no solo FAR os valores de umidade se elevaram mais rapidamente devido à distribuição da água no interior do solo. Adicionalmente, a frente de umidade alcançou maiores distâncias no sentido vertical, em relação aos demais solos. No solo MAG, houve uma concentração de umidade mais elevada ao redor do emissor, com a formação de um bulbo úmido de maior dimensão no sentido horizontal, ultrapassando 10 cm após 36 minutos de ensaio. Já na direção vertical, o bulbo alcançou 10 cm de profundidade, em relação ao gotejador, no final do ensaio. No solo FAG, o bulbo também se desenvolveu em maior proporção no sentido horizontal, já no sentido vertical, a profundidade foi semelhante ao MAG.

Como houve aparecimento de água na superfície do solo FST, com a formação de caminho preferencial, a frente de molhamento não apresentou o formato característico de um bulbo úmido, e a faixa de umidade se concentrou nas camadas superficiais do solo acima do emissor. Também foi possível observar que, para o gotejador HG, a frente de molhamento se desenvolveu da esquerda para a direita, pois devido ao acúmulo de água na superfície, esta foi direcionada para as laterais do recipiente, acarretando em infiltração pelas laterais do recipiente.

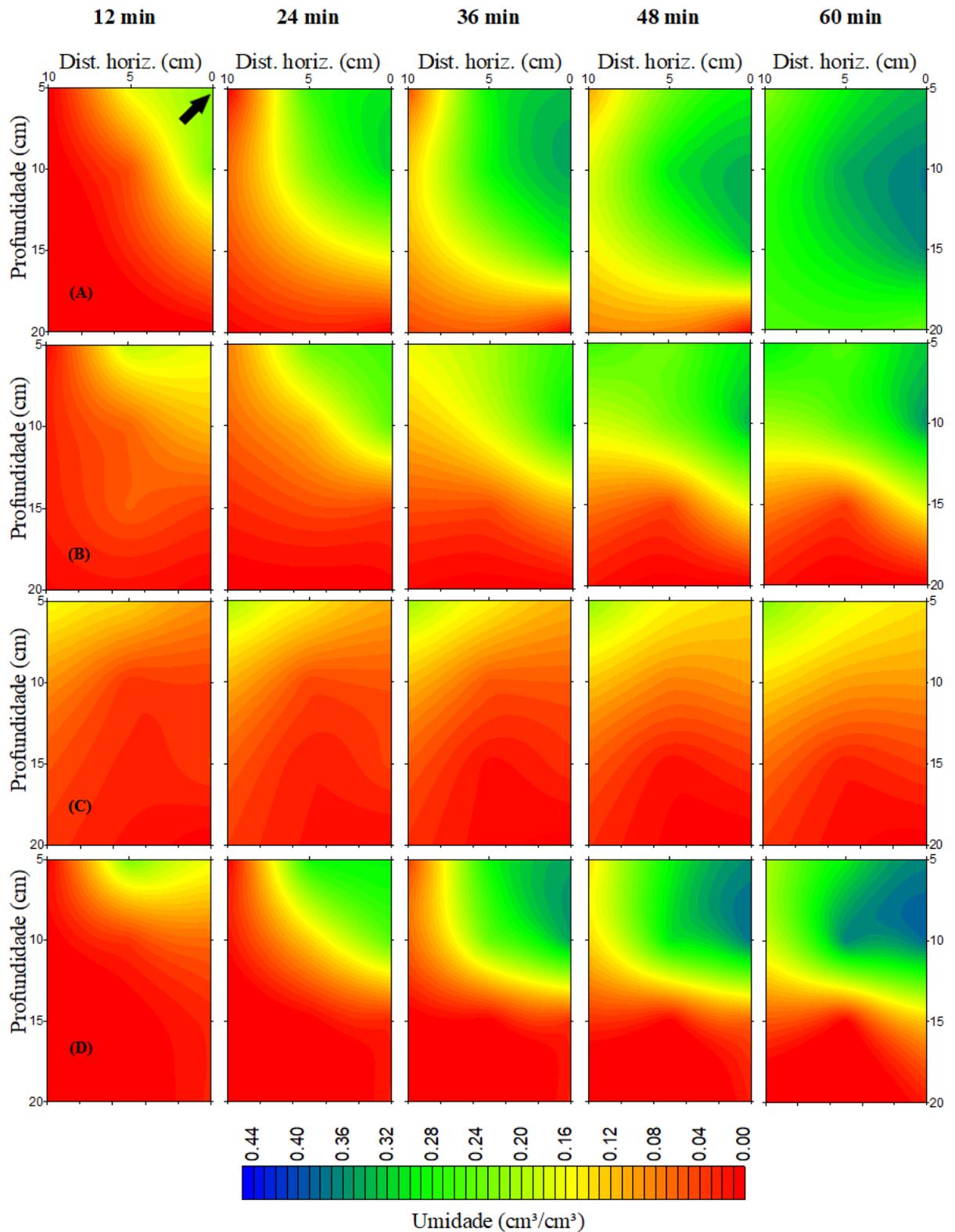


Fig. 6. Variação da umidade abaixo do emissor, instalado a 5 cm de profundidade, ao longo do tempo de funcionamento para o emissor HG 4,0 l h⁻¹. (emissor posicionado no vértice direito de cada figura, conforme seta). Legenda: (A): Franco arenoso; (B): Franco argiloso; (C): Franco siltoso; (D): Muito argiloso.

O avanço da umidade do solo nos quatro solos para o emissor RB pode ser visto na Fig. 7. O comportamento foi semelhante ao emissor anterior, exceto, em relação à dimensão da frente de molhamento, que foi menor devido à menor vazão do emissor. Os valores de umidade observados no FST foram menores que os demais solos, indicando um acúmulo de água na superfície do solo, que realmente foi observado durante o experimento.

Em razão da pequena profundidade de instalação, também foi observado que a frente de molhamento vertical alcançou a superfície do solo até o final de uma hora de funcionamento para todas as repetições avaliadas. Com a exposição do bulbo úmido na superfície do solo aumentam-se as perdas por evaporação, o que pode acarretar redução da eficiência do sistema.

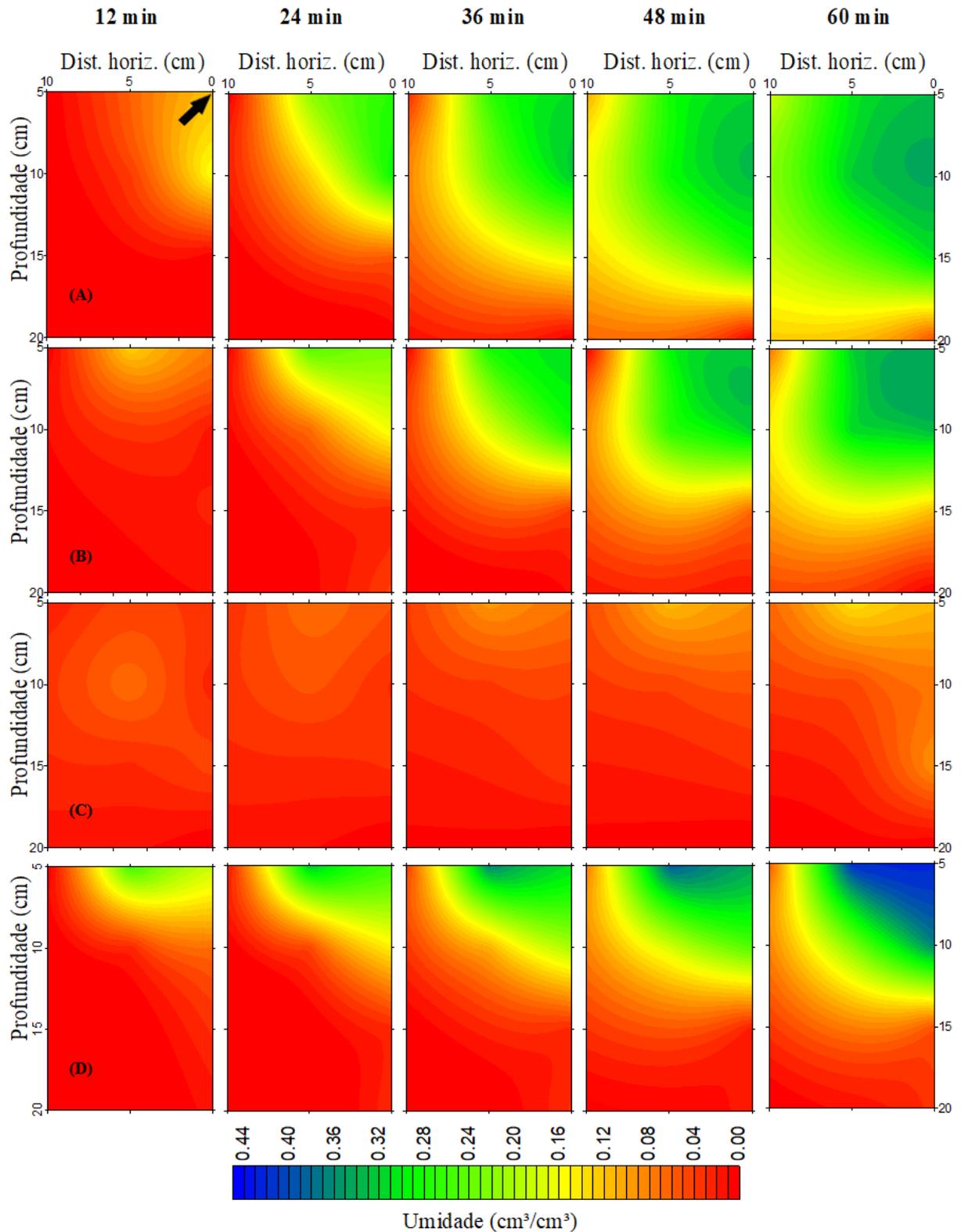


Fig. 7. Variação da umidade abaixo do emissor, instalado a 5 cm de profundidade, ao longo do tempo de funcionamento para o emissor RB 2,3 l h⁻¹. (emissor posicionado no vértice direito de cada figura, conforme seta). Legenda: (A): Franco arenoso; (B): Franco argiloso; (C): Franco siltoso; (D): Muito argiloso.

4 CONCLUSÃO

Houve redução da vazão média dos emissores enterrados à pequena profundidade (5 cm), uma vez que a variação se deu desde os minutos iniciais de funcionamento. O emissor autocompensante Rain Bird XFS apresentou maiores variações de vazão, porém estas foram significantes apenas para o solo muito argiloso. Já para o emissor não autocompensante Hydrogol, houve redução significativa de vazão em todos os solos, exceto o franco siltoso, foi maior para o franco arenoso. Desse modo, mesmo em pequenas profundidades, é necessário um maior cuidado nos projetos de gotejamento subsuperficial, levando-se em consideração a classe de solo, especialmente para os emissores não autocompensantes.

O solo franco siltoso apresentou formação de caminhos preferenciais, isso levou ao aparecimento de um filete de água na superfície do solo, para todos os emissores, o que pode gerar situações de escoamento superficial ocasionando perdas de eficiência do sistema de gotejamento subsuperficial. Adicionalmente, sistemas instalados em pequenas profundidades podem ter aumento da evaporação devido ao surgimento do bulbo úmido na superfície e, conseqüentemente, acarretar redução de eficiência.

Não foi identificada uma relação entre a condutividade saturada dos solos e a redução de vazão.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 2006. Equipamentos de irrigação agrícola: Emissores e tubos emissores- Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 17.
- Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S., Mead, R.M., 1999. Subsurface drip irrigation of row crops : a review of 15 years of research at the Water Management. *Agric. Water Manag.* 42, 1–27.
- Ben-Gal, A., Lazarovitch, N., 2003. Beyond burying the lateral: Current issues in and future opportunities for subsurface drip irrigation. Netafim.(Available on-line [http://mop.textstore.co.il/data/Subsurface% 20drip% 20irrigation% 202003. pdf](http://mop.textstore.co.il/data/Subsurface%20drip%20irrigation%202003.pdf))(Verified 5 January 2007).
- Fiori, J.P. de. O., Campos, J.E.G., Almeida, L., 2010. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de goiás. *Geociencias* 29, 229–235.
- Fan, W., Li, G., 2018. Effect of soil properties on Hydraulic characteristics under subsurface drip irrigation. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 121. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/5/052042>
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Sánchez, R., Losada, A., 2008. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: Effect on water-application uniformity. *Irrig. Sci.* 26, 451–458. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0116-1>
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R., Juana, L., 2011. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137, 287–294.
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R., Juana, L., 2010. Evolution of the spherical cavity radius generated around a subsurface drip emitter. *Biogeosciences* 7, 1983–1989. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1983-2010>
- Lazarovitch, N., Shani, U., Thompson, T.L., Warrick, A.W., 2006. Soil Hydraulic Properties Affecting Discharge Uniformity of Gravity-Fed Subsurface Drip Irrigation Systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132, 531–536. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2006\)132:6\(531\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2006)132:6(531))
- Lazarovitch, N., Šimůnek, J., Shani, U., 2005. System-Dependent Boundary Condition for Water Flow from Subsurface Source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 46–50. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0046>

- Martínez, J., Reça, J., 2014. Water Use Efficiency of Surface Drip Irrigation versus an Alternative Subsurface Drip Irrigation Method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 140, 04014030. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000745](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000745)
- Ren, C., Zhao, Y., Wang, J., Bai, D., Zhao, X., Tian, J., 2017. Lateral hydraulic performance of subsurface drip irrigation based on spatial variability of soil: Simulation. *Agric. Water Manag.* 193, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.014>
- Ren, C.J., Zhao, Y., Dan, B., Wang, J., Gong, J.G., He, G.H., 2018. Lateral hydraulic performance of subsurface drip irrigation based on spatial variability of soil: experiment. *Agric. Water Manag.* 204, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.034>
- Rodríguez-sinobas, L., Gil, M., Juana, L., Asce, M., Sánchez, R., 2009. Water Distribution in Laterals and Units of Subsurface Drip Irrigation . II : Field Evaluation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 729–738.
- Shani, U., Xue, S., Gordin-Katz, R., Warrick, A.W., 1996. Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: pressure measurements. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122, 291–295.
- Silva, B.M., Silva, É.A. da, Oliveira, G.C. de, Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000200011>
- Thebaldi, M.S., Lima, L.A., Almeida, W.F. de, Andrade, R.R., 2016. Backpressure effects on the flow-pressure relation of driplines. *Eng. Agrícola* 36, 55–62. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n1p55-62/2016>
- van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Waller, P., Yitayew, M., 2016. Landscape Irrigation Systems, in: *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer, pp. 259–269.
- Warrick, B.A.W., Shane, U., 1996. Soil-limiting flow from subsurface emitters. 0, 296–300.
- Warrick, W.A., Shani, U., 1996. Soil-Limiting Flow from Subsurface Emitters. II: Effect on Uniformity. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122, 296–300. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:5\(296\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:5(296))

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento da variação de vazão não seguiu uma tendência única, demonstra que pode haver outros parâmetros que influenciaram na variação. Em relação à contrapressão, esta não foi mensurada, o que pode ser tema de outros trabalhos, e nem mesmo estimada, pois erros no processo poderiam surgir, em razão de ser um valor de pequena grandeza e por necessitar de outros parâmetros estimados, como o caso do raio da cavidade. Assim, trabalhos futuros que avaliem não só o efeito da condutividade hidráulica saturada na variação da vazão, mas também de outras propriedades do solo, seriam interessantes.

Além disso, o solo de textura muito argilosa (Latosolo vermelho) apresentou comportamento peculiar no caso do gotejamento subsuperficial, o que também pode ser objeto de estudo para futuros trabalhos, com o objetivo de confirmar o comportamento aqui apresentado e identificar as possíveis causas.