



## AVALIAÇÃO DE MODELOS DE REGIME NÃO PERMANENTE E PERMANENTE PARA CÁLCULO DO ESPAÇAMENTO ENTRE DRENOS

L. C. M. Tavares<sup>1\*</sup>, G. M. Araújo<sup>1</sup>, F. F. L. dos Santos<sup>2</sup>, A. P. F. Colares<sup>1</sup>, A. F. Braga<sup>1</sup>, J. T. F. Rosas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFV - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>2</sup>UFF - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.

Article history: Received 28 May 2018; Received in revised form 09 August 2018; Accepted 21 August 2018; Available online 30 September 2018.

### RESUMO

A crescente demanda por alimentos e por técnicas que viabilizem a exploração agrônômica e econômica de áreas com problemas ocasionados pelo excesso de água no solo, são algumas razões que justificam o uso da drenagem. Na drenagem agrícola, os drenos são instalados geralmente sobre a camada impermeável ou acima desta, sendo a profundidade de instalação dos drenos, a porosidade drenável e a condutividade hidráulica importantes parâmetros no cálculo do espaçamento de drenos. Este cálculo pode ser realizado com emprego de diferentes métodos. Entretanto, algumas metodologias aplicam-se melhor para um determinado regime de chuva do que outras. Neste contexto, objetivou-se com este trabalho avaliar diferentes equações utilizadas para se estimar o espaçamento de drenos sob regime de escoamento variável e permanente. Por meio da análise do Desvio Quadrático Médio dos modelos, estabeleceu-se uma comparação referente a precisão de cada modelo. Qualquer um dos modelos para regime não permanente podem ser empregados. Enquanto que para o regime permanente, o pior modelo foi o de Kirkham e os outros modelos apresentaram desvios quadrático médio estatisticamente iguais.

**Palavras-chave:** drenagem, equações, modelos

### EVALUATION OF NON-PERMANENT AND PERMANENT REGIME MODELS FOR CALCULATION OF DRAIN SPACING

#### ABSTRACT

The growing demand for food and techniques that make feasible the agronomic and economic exploration of areas with problems caused by excess water in the soil are some of the reasons that justify the use of drainage. In agricultural drainage, the drains are usually installed on or above the impermeable layer, the depth of installation of drains, drainage porosity and hydraulic conductivity being important parameters in the calculation of drain spacing. This calculation can be carried out using different methods. However, some methodologies apply better to a given rain regime than others. In this context, this work aimed to evaluate different equations used to estimate the spacing of drains under a variable and permanent flow regime. By means of the analysis of the Average Quadratic Deviation of the models, a comparison was established referring to the precision of each model. Any of the models for non-permanent regime can be used. While for the permanent regime, the worst model was Kirkham, and the other models showed statistically equal mean square deviations.

**Keywords:** drainage, equations, models

\* [leticiamtavares@gmail.com](mailto:leticiamtavares@gmail.com)

## **INTRODUÇÃO**

A crescente demanda por alimentos, a procura por terras agriculturáveis e por técnicas que viabilizem a exploração agrônômica e econômica de áreas com problemas ocasionados pelo excesso de água no solo, são algumas razões que justificam o uso da drenagem (DUARTE et al., 2001). Os principais objetivos da drenagem agrícola são criar um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo (FERREIRA, 2001). Segundo COELHO (1984), o uso de drenos tubulares possui a vantagem de não ocupar área de plantio e não interferir no manejo de solo e plantas. Além disso, esta técnica possibilita aumentar o número anual de dias favoráveis às operações agrícolas mecanizadas, e proporciona ambiente adequado ao desenvolvimento das raízes das culturas (BORGES JÚNIOR et al., 2001).

O dimensionamento de um sistema de drenagem com drenos tubulares inclui a relação entre a carga hidráulica ( $h$ ) no semi-espacamento entre os drenos e a distância entre eles ( $L$ ) (DUARTE et al., 2001). Além disso, deve-se considerar as propriedades físico-químicas do solo, a topografia, o clima e a cultura analisada (BORGES JÚNIOR et al., 2001).

Neste sentido o cálculo do espaçamento entre drenos torna-se indispensável nos projetos de drenagem agrícola, pois é um dos principais fatores que influenciam seu custo de implementação. A profundidade de instalação pode ser aumentada ocasionando o aumento do espaçamento entre drenos, conseqüentemente reduzindo a quantidade de tubos (drenos) por hectare. Porém, a instalação em níveis mais profundos acarreta em maiores custos de escavação. De uma maneira geral, a profundidade ideal dos drenos situa-se entre 1,2 e 1,5 metros, pois fora desta faixa tem-se muitos drenos por hectare ou altos custos de escavação (LIMA, 2011).

O cálculo de espaçamento de drenos pode ser feito com emprego de diferentes métodos. Entretanto, algumas metodologias aplicam-se melhor para um determinado regime de chuva do que outras. Em geral, as fórmulas desenvolvidas para a determinação do espaçamento entre drenos baseiam-se no movimento da água no solo, caracterizado por duas situações, em que a primeira considera este movimento em condições em que não há variação do valor do potencial total em dado ponto, isto é, regime de escoamento permanente e a segunda leva em conta o movimento em condições em que ocorre variação do potencial total com o tempo, ou seja, regime de escoamento não permanente (CRUCIANI, 1986; BELTRÁN, 1986; FERREIRA, 1986). O regime não permanente, também conhecido como regime variável é caracterizado por chuvas de alta intensidade e curta duração. Neste regime os drenos não conseguem remover a água da chuva enquanto ela ocorre. A chuva intensa eleva o lençol freático e a drenagem ocorre após a chuva, tendo que rebaixar o lençol num determinado período de tempo. Este regime é bastante comum em regiões de clima úmido e sub-úmido como no Brasil. Já o regime constante é aquele em que a posição do lençol freático permanece inalterada durante a chuva, ou seja, a quantidade de chuva que entra menos a água consumida pelas plantas e evaporada é a mesma que sai pelos drenos, de modo que o lençol freático não se eleva e nem é rebaixado (LIMA, 2011). Este regime aplica-se em regiões onde as chuvas são de baixa intensidade e longa duração, sendo bastante comum na região central dos Estados Unidos e nos países baixos da Europa (Holanda e Bélgica).

Neste contexto, objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho de várias equações para estimativa do espaçamento entre drenos, instalados acima da camada impermeável de solo, em regime permanente e não permanente, verificando-se quais modelos fornecem

valores que mais se aproximam dos dados

observados em laboratório.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Sítio Experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Drenagem, Irrigação e Saneamento (LADISAN), da Universidade Federal Fluminense, localizado aproximadamente nas coordenadas geográficas 22°54'20" (S) e 47°07'61" (O).

### Procedimentos Experimentais

Utilizou-se uma caixa de vidro compartimentada preenchida com areia média (NBR7211/05) e equipada com postos de observação e dreno, conforme ilustrado na Figura 1, para simular uma unidade reduzida de estudo hidrológico. A altura da camada de areia no interior da caixa de vidro era de 25 cm. As dimensões da caixa são de 30 cm x 70 cm x 10 cm (altura x largura x profundidade). Além disso, a distância entre o dreno e a extremidade da caixa de vidro ( $L/2$ ) era equivalente a 67 cm.

Os testes foram realizados ao longo de 3 dias, sendo que para cada regime (permanente e não permanente) um teste por dia foi executado. Ao fim do experimento serão obtidas médias dos dados experimentais e dos modelos teóricos para fins de comparação.

Para isso, um tubo de PVC (diâmetro de 2 polegadas) perfurado foi utilizado para simular o evento chuvoso, tanto para regime não permanente quanto para regime permanente. As simulações do evento ocorreram até que se constatasse uma recarga constante e o lençol atingisse uma altura ( $h_0$ ) fixa que não se alterasse mais. A medição da altura do lençol foi

realizada por meio de uma sonda elétrica graduada.

Em seguida, para os testes de regime não permanente, o fornecimento de água (recarga) foi cessado e realizou-se o teste de rebaixamento do lençol freático, desde  $h_0$  cm até 0,4 cm acima da linha dos drenos e anotou-se os tempos correspondentes às leituras das posições intermediárias do lençol à medida que este ia se rebaixando.

Determinou-se a recarga ( $q$ ) da unidade hidrológica por meio do quociente entre o volume de água coletado na saída do dreno (proveta) e o tempo no qual o volume foi coletado (cronômetro). Este procedimento foi repetido três vezes por dia, ao longo de 3 dias, e o valor de recarga adotado foi a média entre as medições.

A condutividade hidráulica ( $K_0$ ) foi medida com o auxílio de um permeâmetro de carga constante com amostra de solo saturada, conforme recomendado por CLAESSEN (1997).

Por fim, para se calcular a porosidade drenável ( $\mu$ ) do estrato de solo presente no reservatório, utilizou-se o procedimento recomendado por DUARTE et al. (2001). Foram realizados 3 ensaios por dia, ao longo de 3 dias, em que se mediu o volume de água escoado pelos drenos e a respectiva variação da posição do lençol freático. A porosidade drenável foi obtida dividindo-se o volume de água drenado pelo volume total de solo.

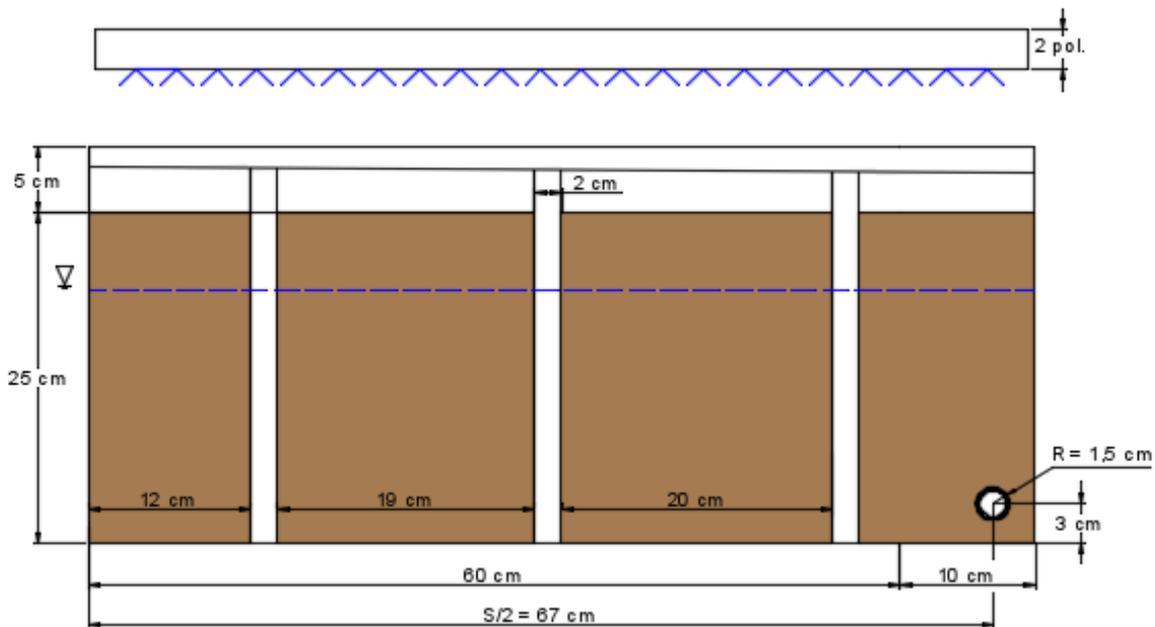


Figura 1. Unidade de estudo hidrológico reduzida. Fonte: Elaborado pelos autores.

### Fundamentação Matemática

As fórmulas utilizadas para estimar a altura das posições intermediárias do lençol, para regime não permanente, foram as de Boussinesq-Glover, Glover-Dumm,

$$h_t = \frac{2h_0\mu L^2}{9K_0 \cdot t \cdot h_0 + 2\mu L^2} \quad (1)$$

$$h_t = \frac{1,16h_0}{e^{\frac{\pi^2 K_0 \cdot D \cdot t}{\mu L^2}}} \quad (2)$$

$$h_t = \frac{2h_0 \cdot D}{\left( e^{\frac{9 \cdot K_0 \cdot D \cdot t}{\mu L^2}} \cdot (2D + h_0) - h_0 \right)} \quad (3)$$

$$h_t = D \cdot \ln \left( 1 - \frac{4 \left( 1 - e^{-\frac{h_0}{D}} \right)}{\pi \cdot e^{\frac{\pi^2 K_0 \cdot D \cdot t}{\mu L^2}}} \right) \quad (4)$$

$$h_t = \frac{h_0}{e^{\left( \frac{2\pi K_0 t}{\mu L \cdot \ln \left( \frac{L^2}{2\pi^2 r \cdot D} \right)} \right)}} \quad (5)$$

$$h_t = \frac{h_0}{e^{\left( \frac{K_0 \cdot t}{1,16L\mu} \right)}}$$

Já as fórmulas utilizadas para se estimar o espaçamento entre drenos, para

Schilfgaard, Terzidis, Hammad, Kirkham e Glover, apresentadas nas Eqs. 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente, onde a variável  $h_t$  (altura do lençol freático) foi colocada em evidência.

$$h_t = \frac{4h_0}{\pi e^{\left( \frac{\pi^2 K_0 \cdot D \cdot t}{\mu L^2} \right)}} \quad (6)$$

Em que:

$h_t$ : Altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espaçamento, após o rebaixamento (m);

$h_0$ : Altura inicial do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espaçamento (m);

$\mu$ : Porosidade drenável (adimensional);

$L$ : Espaçamento entre os drenos (m);

$K_0$ : Condutividade hidráulica do solo ( $m \cdot dia^{-1}$ );

$t$ : tempo (dias);

$D$ : Altura da camada impermeável até a linha dos drenos (m);

$r$ : raio do dreno (m).

regime permanente, foram as de Donnan, Hooghoudt, Kirkham e Ernst,

apresentadas nas Eqs. 8, 9, 10 e 11, respectivamente, onde a variável L

$$L = \sqrt{\frac{4K_0(H^2 - D^2)}{q}} \quad \therefore H = h + D \quad (8)$$

$$L = \sqrt{\frac{8K_0dh + 4K_0h^2}{q}} \quad \therefore d = \frac{D}{\left[2,5 \left(\frac{D}{L}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{P_M}\right) + 1\right]} \quad (9)$$

$$L = \frac{K_0h}{qF_K} \therefore F_K = \frac{1}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{L}{\pi r_0}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \cos\left(\frac{2n\pi r_0}{L}\right) - \cos(n\pi) \cdot \coth\left(\frac{2n\pi D}{L}\right) - 1 \right) \right] \quad (10)$$

$$L = \frac{\frac{q \cdot \ln\left(\frac{D}{P_M}\right)}{\pi K_0} \pm \sqrt{\left(\frac{q \cdot \ln\left(\frac{D}{P_M}\right)}{\pi K_0}\right)^2 - 4\left(\frac{q}{8K_0} \cdot -h\right)}}{\left(\frac{2q}{8K_0}\right)}$$

Podemos observar na equação 9 (Hooughoudt) que a variável L (espaçamento entre drenos) é função de D, e por sua vez, D também é função de L, ou seja, para se realizar esse cálculo é necessário que sejam feitas iterações matemáticas. Para tal cálculo foi utilizado um processo de iterações automáticas por meio do software Excel. Foi configurado para que o programa realizasse 1000 iterações. Além disso, admitiu-se como valores iniciais 1,37 m e 0,152 m para L e D respectivamente.

De maneira similar, percebeu-se que a equação 10 (Kirkham) também

$$DMQ = \sqrt{\frac{\sum (H_{t_{exp}} - H_{t_{pre}})^2}{N}} \quad (12)$$

Em que:

DMQ = Desvio Quadrático Médio;

$H_{t_{exp}}$  = Altura do lençol freático experimental;

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os dias de teste observou-se que o lençol freático se estabilizou a uma altura média de 19,1 cm em relação

(espaçamento entre drenos) foi colocada em evidência.

(11)

Em que:

L: Espaçamento entre os drenos (m);

$K_0$ : Condutividade hidráulica do solo ( $m \cdot dia^{-1}$ );

D: Altura da camada impermeável até a linha dos drenos (m);

q: Recarga da unidade hidrológica ( $m \cdot dia^{-1}$ );

h: Altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição intermediária entre eles (m);

$P_M$ : Perímetro molhado (m);

$r_0$ : raio do dreno (m).

necessita de iteração matemática para que possa ser resolvida. Para tal adotou-se o mesmo valor inicial para L (1,37 m) e a mesma quantidade de iterações a serem realizadas (1000).

### Avaliação dos modelos

A precisão dos modelos adotados foi estimada tomando-se como base o desvio quadrático médio (DQM), conforme recomendado por SOUZA et al. (2015), e que pode ser calculado por meio da equação 12:

$H_{t_{pre}}$  = Altura do lençol freático previsto pelo modelo;

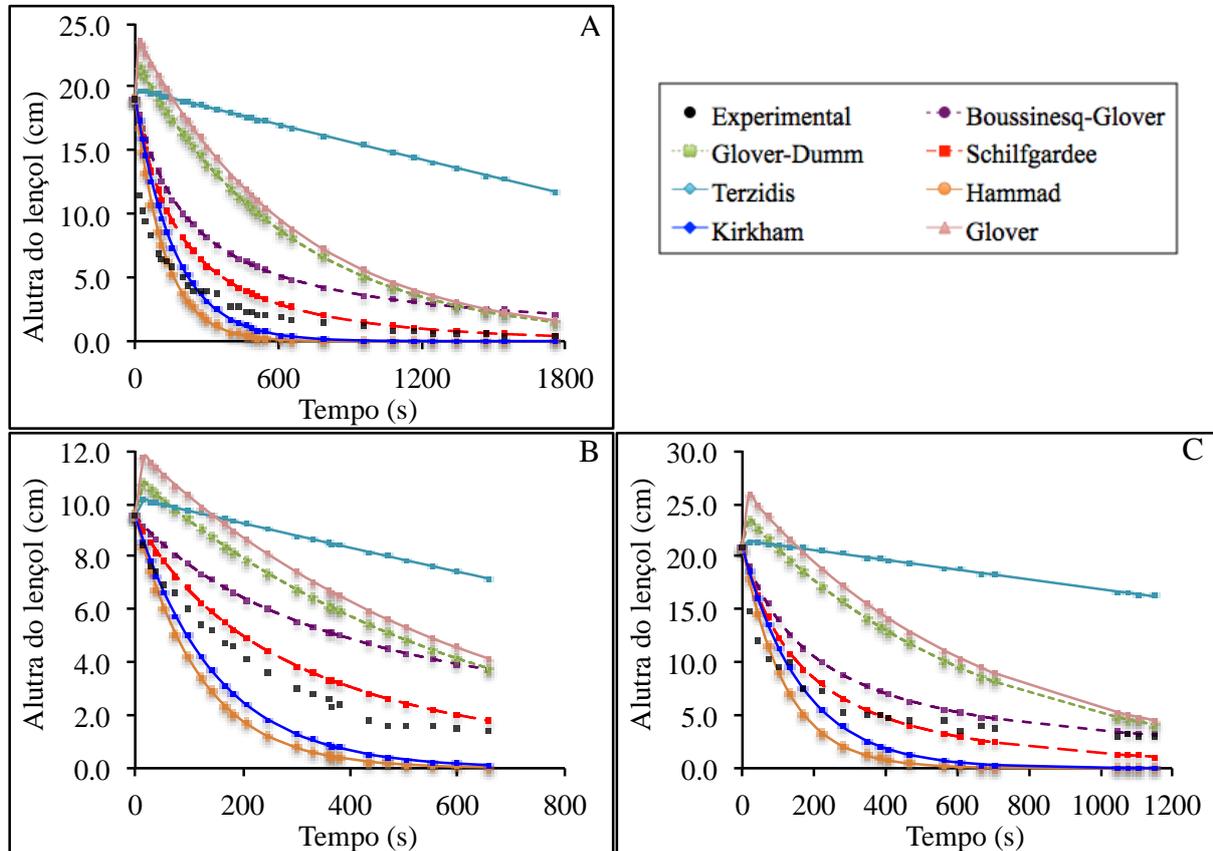
N = Número de dados experimentais.

Para a avaliação da precisão dos modelos de regime não permanente foi realizada a análise de variância (ANOVA\*) ao nível de 5% de significância. Além disso, foi realizado o teste de Tukey para comparação entre os desvios quadrático médio dos modelos ( $\alpha = 5\%$ ).

ao fundo da caixa de vidro. Além disso, determinou-se que a recarga média de água do aquífero foi de  $15,67 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  (500 ml / 32 s), o que equivale a  $19,3 \text{ m} \cdot \text{dia}^{-1}$

(levando-se em conta que a área da seção transversal do fundo da caixa é de  $700 \text{ cm}^2$ ). A condutividade hidráulica do estrato de solo foi estimada em  $190 \text{ m.dia}^{-1}$  e a porosidade drenável foi de 0,236.

Os valores experimentais e teóricos (para os 3 dias de experimento), preditos pelos modelos de regime não permanente, das posições intermediárias do lençol durante seu rebaixamento estão apresentados na Figura 2:

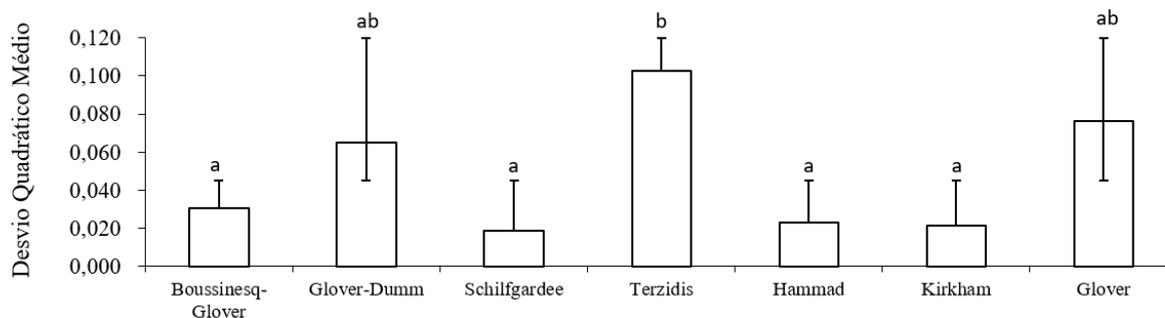


**Figura 2.** Variação da altura do lençol freático durante seu rebaixamento, para as três repetições do experimento. Fonte: Elaborado pelos autores.

Pode-se observar na Figura 2 que há grande aproximação dos dados medidos experimentalmente com os dados estimados pela equação de Schilfgardee, sendo este o modelo que melhor descreve a fase final do processo, conforme também encontrado por DUARTE et al. (2001). Além disso, os modelos de Hammad e Krikham, no geral, também obtiveram resultados próximos aos obtidos experimentalmente. As demais equações

tendem a subestimar o rebaixamento do lençol freático, não sendo recomendado seu uso nestas condições (drenos instalados acima da camada impermeável de solo).

Além disso, também é possível observar que o nível do lençol freático apresenta uma queda brusca em um curto período de tempo, e em seguida decai de maneira mais suave.



**Figura 3.** Desvio Quadrático Médio dos modelos de regime não permanente avaliados. Fonte: Elaborado pelos autores

Por meio da Figura 3, pode-se notar que qualquer um dos modelos pode ser empregado para o dimensionamento do espaçamento entre os drenos.

Entretanto, Boussinesq-Glover, Schilfgardee, Hammad e Kirkham apresentaram melhores desempenhos.

Para a avaliação dos modelos de regime permanente foi realizada análise de

variância (ANOVA\*) ao nível de 5% de significância. Como foi verificado que houve diferença significativa entre as médias dos modelos realizou-se Teste de Tukey para comparação de médias ( $\alpha = 5\%$ ). O resultado do teste de Tukey, juntamente com o valor experimental de espaçamento entre drenos estão apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1.** Teste de Tukey para comparação de médias para o espaçamento entre drenos predito pelos modelos avaliados.

Experimental (m)	Donnan (m)	Hooughoudt (m)	Kirkham (m)	Ernst (m)
1,34	1,31b	1,37b	1,56a	1,41b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

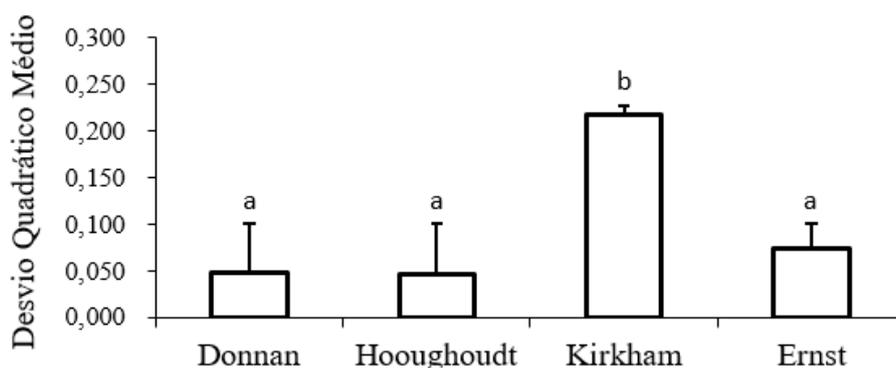
$$p = 1,3 \times 10^{-6}$$

Pode-se observar na Tabela 1 que, dentre os modelos de regime permanente avaliados, os modelos de Donnan, Ernst e Hooughoudt não apresentaram diferença significativa. Ainda, são os que apresentaram resultados mais próximos ao valor observado experimentalmente.

O modelo de Kirkham apresenta espaçamento relativamente superior ao valor experimental observado, o que ocasionaria em um subdimensionamento de projeto, ou seja, menor quantidade de

drenos do que o ideal. O subdimensionamento do projeto acarreta em uma drenagem insuficiente ou falha, provocando um mal desenvolvimento da cultura, e conseqüentemente menor produtividade, ou até mesmo sua morte. Em ambos os casos resultando em prejuízos financeiros do produtor.

Já a precisão dos modelos, de regime permanente, avaliados por meio do desvio quadrático médio dos dados coletados pode ser observada na Figura 4:



**Figura 4.** Desvio Quadrático Médio dos modelos de regime permanente avaliados. Fonte: Elaborado pelos autores. Barras com o mesmo erro vertical não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

Por meio da Figura 4 podemos concluir que os modelos baseados na Equações de Donnan, Ernst e Hooughoudt não apresentaram diferença significativa.

## CONCLUSÕES

Qualquer um dos modelos de regime não permanente pode ser utilizado. Os modelos tiveram suas respectivas precisões comprovadas por meio do método estatístico do desvio quadrático médio.

Para os modelos de regime permanente observou-se que, com exceção do modelo de Kirkham, estes apresentaram valores próximos aos encontrados

O modelo proposto por Kirkham apresentou um valor superior de DMQ, demonstrando o pior desempenho dentre os modelos avaliados.

experimentalmente. Logo, estes modelos demonstraram precisão aceitável para estimar o espaçamento entre drenos em projetos de drenagem agrícola.

Os modelos tiveram suas respectivas precisões comprovadas por meio do método estatístico do desvio quadrático médio e teste de Tukey a nível de significância de 5%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao professor Dario de Andrade Prata Filho, por ceder o laboratório para a execução do

experimento e à Fundação de Amparo a Pesquisa do estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2005: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005

BELTRÁN, J. M. Drenaje Agrícola. v.1. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación/Instituto Nacional de Reforma Agraria y Desarrollo Agrario,

1986. 208p. **Serie de Ingeniería Rural y Desarrollo Agrario - Manual Técnico 5** BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA JÚNIOR, A. G. Sistemas de drenagem agrícola. Parte I: Desenvolvimento do modelo e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, p. 369-375, 2001.

COELHO, E.F. **Desempenho de algumas equações de drenagem e dos drenos abertos e cobertos em condições de campo.** Viçosa: UFV, 1984, 80p.

Dissertação Mestrado

CLAESSEN, Marie EC. **Manual de métodos de análise de solo.** Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E), 1997.

CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura.** São Paulo: Nobel, 1986, 337p.

DUARTE, S. N.; CRUCIANI, D. E.; CARARO, D. C.; PASSOS, K. S.; LOPES, A. D. V. Avaliação de equações de drenagem para regime não permanente em condições de laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 5, p. 181-186, 2001.

DURNFORD, D. S.; PODMORE, T. H.; RICHARDSON, E. V. Optimal drain design for arid, irrigated areas. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v.27, p.1100-1105, 1984.

FERREIRA, P.A. **Dificuldades e perspectivas da pesquisa em drenagem.** In: Ferreira, M.E. (ed.) Aproveitamento de várzeas. Jaboticabal, UNESP, 1986. p.105-117.

FERREIRA, P.A. Drenagem. In: **Curso de engenharia de irrigação. Módulo XI.** Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. 2001. 167p.

LIMA, L. A. **Drenagem de terras agrícolas.** ENG158/UFLA. 2011.

SOUZA, F. C.; MARTINS, J. J. A.; ROCHA, A. P. T.; GOMES, J. P.; PESSOA, T.; MARTINS, J. N.; Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de *Ziziphus joazeiro* Mart. **Revista Brasileira de plantas medicinais,** v. 17, p. 195-200, 2015.