

MODELO APLICADO AO DIMENSIONAMENTO DE DRENOS SUBTERRÂNEOS PARA ÉPOCA DA IRRIGAÇÃO

MODEL APPLIED TO UNDERGROUND DRAIN SCALING FOR THE IRRIGATION SEASON

MARINALDO FERREIRA PINTO¹; DINARA GRASIELA ALVES² E CONAN AYADE SALVADOR¹

¹ Professor Adjunto, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. Seropédica – RJ, e-mail: marinaldo@ufrj.br; conan@ufrj.br

² Pós-Doutoranda, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. Seropédica – RJ, e-mail: dinara_alves@hotmail.com

1 RESUMO

A metodologia para o dimensionamento de drenos subterrâneos para a época das irrigações é laboriosa, requerendo muitas iterações. Sendo assim, o objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia alternativa para tal finalidade, baseada na equação de Glover-Dumm. Comparou-se o espaçamento entre os drenos calculado pelo método proposto e pelo método da simulação da altura do lençol freático após cada irrigação, obtendo-se o seu desempenho. Foram testados cenários com valores de condutividade hidráulica variando de 0,2 a 3,0 m d⁻¹; camada impermeável variando de 0 a 6 m abaixo da superfície do solo; e, altura do lençol freático de 0,4 e 0,8 m sobre os drenos que proporciona a profundidade exigida pela cultura. Verificou-se que a faixa na qual o modelo proposto pode ser empregado depende da combinação das variáveis consideradas nas simulações, devendo ser analisada para cada caso. A metodologia proposta apresentou resultados semelhantes àqueles quando se utilizou a metodologia de simulação da altura do lençol freático, sendo que número de iteração para obtenção do resultado é infinitamente menor. De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo desenvolvido apresentou confiabilidade quando se respeita as suas restrições.

Palavras-chave: Drenagem subterrânea, Glover-Dumm, lâmina de lixiviação.

2 ABSTRACT

The methodology for the scaling of underground drains for the irrigation season is laborious and requires many iterations. Thus, the objective of this paper was to develop an alternative methodology for this purpose, based on the Glover-Dumm equation. We compared the spacing between the drains calculated by the proposed method and by the simulation method for water table height after each irrigation, obtaining their performance. We tested scenarios with hydraulic conductivity values ranging from 0.2 m d⁻¹ to 3.0 m d⁻¹, impermeable layer ranging from 0 m to 6 m below the ground surface, and water table ranging from 0.4 m and 0.8 m on the drains, providing the depth required by the crop. We found that the range in which the proposed model can be employed depends on the combination of variables considered in the simulations and should be analyzed for each case. The proposed methodology presented results similar to those for the simulation methodology for water table height, and the iteration number to obtain the result is infinitely smaller. According to the results, it can be concluded that the model developed presented reliability when regarding restrictions.

Keywords: Underground drainage, Glover-Dumm, leaching blade.

3 INTRODUÇÃO

A necessidade de implantação de sistemas de drenagem deve-se a fatores climáticos e edáficos, porém, quando visa à produção agrícola, somam-se as características da cultura implantada. A drenagem agrícola, quando bem dimensionada, possibilita um ambiente adequado ao desenvolvimento vegetal aliado à preservação das características físicas e químicas do solo (CRUCIANI, 1989; EVANGELISTA et al., 2005). Quando aplicada em regiões de clima úmido e subúmido, permite a eliminação do excesso de água na superfície e no perfil do solo. No caso de regiões de clima árido e semiárido, elimina o excesso de água aplicado via irrigação para o controle da salinidade na rizosfera (lâmina de lixiviação), evitando prejuízos ao desenvolvimento da cultura (BARROS et al., 2005; FERREIRA et al., 2006). De acordo com Shao et al. (2012), muitas pesquisas tem como foco a aplicação de sistemas de drenagem subsuperficial visando reduzir a salinidade do solo, uma vez que este é um dos mais graves fatores ambientais que limitam a produtividade das culturas agrícola.

Dentre as variáveis básicas utilizadas nas diversas metodologias de dimensionamento pode-se citar, em especial, a condutividade hidráulica, porosidade drenável, profundidade do sistema radicular, número de dias em que sistema radicular pode ficar inundada sem afetar negativamente a cultura. A equação de Glover-Dumm tem se destacado devido a caracterização aproximada da dinâmica do lençol freático no perfil do solo, quando se considera o regime de recarga não-permanente, conforme tem sido observado por parte dos pesquisadores (PIRES, 1980; ALBUQUERQUE, 1982; PRATA FILHO, 1982; COELHO, 1984; BACK et al., 1990; FERREIRA et al., 2001; DUARTE et al., 2002). Segundo Souza et al. (2014), um bom modelo deve ser robusto, eficiente e apresentar facilidade de uso.

O dimensionamento dos drenos visando à produção agrícola está ligado aos critérios agrônômicos, os quais são separados em dois requisitos: a) época das chuvas, e b) época das irrigações (Pizarro, 1978).

3 INTRODUCTION

The need to implement drainage systems due to climatic and soil factors; however, when it is intended for agricultural production, the characteristics of the implanted crop are included. Agricultural drainage, when properly sized, provides a suitable environment for plant development, coupled with the preservation of physical and chemical characteristics of the soil (CRUCIANI, 1989; EVANGELISTA et al., 2005). When applied in humid and sub-humid climates, it allows the elimination of excess water on the surface and in the soil profile. In the case of arid and semi-arid regions, it eliminates excess water applied by irrigation to control salinity in the rhizosphere (leaching blade), preventing damage to the crop development (BARROS et al., 2005; FERREIRA et al., 2006). According to Shao et al. (2012), many studies have focused on the application of subsurface drainage systems to reduce the soil salinity, since this is one of the most serious environmental factors limiting the productivity of agricultural crops.

Among the basic variables used in the different design methodologies, we can cite, in particular, hydraulic conductivity, drainable porosity, root system depth, and number of days during which the root system can be flooded without negatively affecting the crop. The Glover-Dumm equation has stood out due to the approximate characterization of the water table dynamics in the soil profile when considering the non-permanent charging regime, as has been observed by researchers (PIRES, 1980; ALBUQUERQUE, 1982; PRATA FILHO, 1982; COELHO, 1984; BACK et al., 1990; FERREIRA et al., 2001; DUARTE et al., 2002). According to Souza et al. (2014), a good model should be robust, efficient and easy to use.

The scaling of drains aimed at agricultural production is linked to the agronomic criteria, which are divided into two requirements: a) rainy season and b) irrigation season (PIZARRO, 1978).

Segundo o mesmo autor, o último requisito estabelece que o sistema de drenagem deve proporcionar o controle da profundidade do lençol freático, de tal modo que, depois de uma recarga, o lençol freático deve retornar a uma profundidade adequada após um número de dias preestabelecido para cada cultura. Nesse caso, para o dimensionamento é conhecido qual deve ser a profundidade do lençol exigido pela cultura, mas se desconhece a profundidade do lençol freático anterior a recarga, pois o nível do lençol freático é variável entre as recargas.

Para se obter o nível do lençol freático imediatamente anterior, após e um certo número de dias depois da recarga, são necessárias simulações que envolve um número elevado de cálculos. Segundo recomendações de Pizarro (1978), as simulações são feitas pela aplicação das equações de dimensionamento de drenos para regime variável com simplificações no que se refere à altura de água sobre os drenos. Entretanto, mesmo com a simplificação recomendada, o número de cálculos para se obter o espaçamento final entre drenos ainda é expressivo.

Com a disponibilização de ferramentas computacionais e o advento dos modelos de simulação de desempenho de drenagem, dentre desses destacam-se: DRAINMOD, SIMDRENO, SISDRENA, e PRODREN (SKAGGS, 1981; DUARTE, 1998; MIRANDA, 1998; BORGES JÚNIOR, 2001), houve uma intensa produção científica com suas aplicações. Apesar da existência dessas ferramentas que facilitam as simulações por parte dos engenheiros, percebe-se que existe dificuldade de entendimento do procedimento matemático envolvido nas simulações pelos discentes, e pouco tem se feito para sanar essa problemática. Segundo Bastiaanssen et al. (2007), em um estudo onde apresenta uma visão geral sobre o estado da arte de vinte e cinco anos de modelagem de solos irrigados e drenados, é importante destacar que o conhecimento teórico e as metodologias existentes podem impactar favoravelmente a aplicação de modelos de fluxo da água do solo insaturado para a análise de problemas de drenagem e irrigação, substituindo uma mentalidade de medição por uma mentalidade de modelagem.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático para o dimensionamento de drenos

para época da irrigação, tomando como base a metodologia apresentada por Pizarro (1978).

According to the author, the latter requirement states that the draining system should provide table depth control, such that, after a recharge, the water table could return to a proper depth after a predetermined number of days for each crop. In this case, the scaling includes knowledge of the water table depth required by the crop, but the water table depth prior to recharge is not known, as the water table level varies between charges.

The obtaining of the level of the immediately preceding water table, after a number of days following recharge, requires simulations that involve a large number of calculations. As recommended by Pizarro (1978), simulations should be made by applying the drain scaling equations for a variable scheme with simplifications regarding the water height on the drains. Nevertheless, even with the recommended simplification, the number of calculations to obtain the final drain spacing is still significant.

With the availability of computational tools and the advent of models for drainage performance simulation, including DRAINMOD, SIMDRENO, SISDRENA and PRODREN (SKAGGS, 1981; DUARTE, 1998; MIRANDA, 1998; BORGES JÚNIOR, 2001), there was intense scientific production with their applications. Despite the existence of these tools, which facilitate the simulations by engineers, we realize that there is difficulty in understanding the mathematical procedure involved in the simulations by students, and little has been done to remedy this problem. According to Bastiaanssen et al. (2007), in a study which provides an overview on the state of the art twenty-five years of irrigated and drained soils, it is important to note that theoretical knowledge and existing methodologies can favorably impact the application of water flow models for unsaturated soil for analysis of drainage and irrigation problems, replacing a measurement mentality by a modeling mentality.

Given the above, this study aimed to develop a mathematical model for the scaling of drains for the irrigation season, based on the methodology presented by Pizarro (1978).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo de cálculo do espaçamento desenvolvido se baseia na equação de Glover-Dumm (Eq. 1).

$$h_t = 1,16h_0 \sum_{n=1,-3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha t} \quad (01)$$

em que:

h_t : altura máxima do lençol freático sobre os drenos “t” dias depois da recarga (m);

h_0 : altura máxima do lençol freático sobre os drenos logo após uma recarga (m);

n : sequência de números ímpares, com alternância entre sinais positivos e negativos;

α : fator de retardamento do solo; e,

t: tempo depois da recarga (d).

O fator de retardamento é calculado pela Eq. 2. As variáveis que influenciam no fator de retardamento são calculadas pelas Eqs. 3 a 5.

$$\alpha = \frac{\pi^2 K D'}{\mu L_0^2} \quad (02)$$

$$D' = D + \bar{h} \quad (03)$$

$$h_0 = h_t + \frac{R}{\mu} \quad (04)$$

em que:

μ : porosidade drenável (adimensional);

K: condutividade hidráulica saturada do solo ($m d^{-1}$);

D : distância entre os drenos e a camada impermeável (m);

D': distância entre a camada impermeável e a altura média do lençol freático (m);

\bar{h} : altura média do lençol freático sobre os drenos (m);

R: recarga do lençol freático (m); e,

L_0 : espaçamento teórico entre os drenos (m).

Segundo Pizarro (1978), a altura média do lençol freático é calculada pela Eq. 5. Entretanto Beltrán (1986) recomenda a Eq. 6.

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_t}{2} \quad (05)$$

$$\bar{h} = \frac{1,16h_0 - h_t}{\ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \quad (06)$$

4 MATERIAL AND METHODS

The spacing calculation model developed is based on the Glover-Dumm equation (Eq. 1).

$$h_t = 1,16h_0 \sum_{n=1,-3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n^2 \alpha t} \quad (01)$$

where:

h_t : maximum height of the water table on the drains “t” days after recharge (m);

h_0 : maximum height of the water table on the drains immediately after recharge (m);

n: sequence of odd numbers, alternating between positive and negative signals;

α : soil retardation factor; and

t: time after recharge (d).

The retardation factor is calculated by Eq. 2. Variables influencing the retardation factors are calculated by Eq. 3 to 5.

$$\alpha = \frac{\pi^2 K D'}{\mu L_0^2} \quad (02)$$

$$D' = D + \bar{h} \quad (03)$$

$$h_0 = h_t + \frac{R}{\mu} \quad (04)$$

where:

μ : drainable porosity (dimensionless);

K: saturated hydraulic conductivity of the soil ($m d^{-1}$);

D : distance between the drains and the impermeable layer (m);

D': distance between the impermeable layer and the mean height of the water table (m);

\bar{h} : mean height of the water table on the drains (m);

R: water table recharge (m); and

L_0 : theoretical spacing between the drains (m).

According to Pizarro (1978), the mean height of the water table is calculated by Eq.5, Beltrán (1986), in turn, recommends Eq. 6.

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_t}{2} \quad (05)$$

$$\bar{h} = \frac{1,16h_0 - h_t}{\ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \quad (06)$$

Para a condição em que $\alpha t \geq 0,2$, a Eq. 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode ser simplificada na Eq. 7, sendo que o espaçamento entre os drenos a ser adotado é obtido após a aplicação de uma correção, os quais são calculados pelas Eqs. 8 e 9.

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' t}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \quad (07)$$

$$C = D \ln\left(\frac{D}{P_m}\right) \quad (08)$$

$$L = L_0 - C \quad (09)$$

em que:

P_m : perímetro molhado do dreno (m);

C: correção aplicada espaçamento teórico entre os drenos (m); e,

L: espaçamento entre os drenos (m).

Aplicando a equação Eq. 7, para o tempo igual ao turno de rega e para o tempo rebaixamento lençol freático exigido pela cultura, tem-se as Eqs 10 e 11. Igualando-se o espaçamento teórico entre os drenos para ambas as condições e rearranjando-se, chega-se a Eq. 12. Nessa etapa, considera-se que a distância média entre o lençol freático e a camada impecável é igual para ambos os tempos considerados nas Eqs. 10 e 11.

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' TR}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_{TR}}\right)} \quad (10)$$

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' N}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_{Ncal}}\right)} \quad (11)$$

$$h_{Ncal} = \frac{1,16 h_0}{\left(1,16 \frac{h_0}{h_{TR}}\right)^{\frac{N}{TR}}} \quad (12)$$

em que:

h_{TR} : altura do lençol freático para um tempo igual ao turno de rega (m);

TR: turno de rega (d);

N: número de dias exigido pela cultura para que lençol freático seja rebaixado para profundidade adequada (d); e,

h_{Ncal} : altura calculada do lençol freático N dias após a recarga (m).

For the condition in which $\alpha t \geq 0.2$, Eq. 7 can be simplified to Eq. 7, and the spacing between the drains to be adopted is obtained after application of a correction, calculated using Eq. 8 and 9.

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' t}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_t}\right)} \quad (07)$$

$$C = D \ln\left(\frac{D}{P_m}\right) \quad (08)$$

$$L = L_0 - C \quad (09)$$

where:

P_m : wetted perimeter of the drain (m);

C: correction applied to the theoretical spacing between the drains (m); and

L: spacing between the drains (m).

Eq. 10 and 11 are obtained by applying Eq. 7 for a time equal to the watering interval and the time for water table lowering as required by the crop, Eq. 12 is obtained by equating the theoretical spacing between the drains for both conditions and rearranging them. In this step, we consider that the mean distance between the water table and the impermeable layer is equal for both times considered in Eq. 10 and 11.

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' TR}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_{TR}}\right)} \quad (10)$$

$$L_0^2 = \frac{\pi^2 KD' N}{\mu \ln\left(1,16 \frac{h_0}{h_{Ncal}}\right)} \quad (11)$$

$$h_{Ncal} = \frac{1,16 h_0}{\left(1,16 \frac{h_0}{h_{TR}}\right)^{\frac{N}{TR}}} \quad (12)$$

where:

h_{TR} : water table height for a time equal to the watering interval (m);

TR: watering interval (d);

N: number of days required by the crop to lower the water table to the appropriate depth (d); and

h_{Ncal} : calculated water table height N days after recharge (m).

Como as alturas do lençol freático imediatamente após a recarga e após o intervalo de tempo igual ao turno de rega são desconhecidas, a solução da Eq. 12 é obtida por iteração.

Considerando que a taxa de rebaixamento do lençol freático é constante, significando que a altura lençol varia de forma linear com o tempo entre as alturas inicial e a final, o primeiro valor de h_t a ser atribuído pode ser calculado pela Eq. 13.

$$h_{TR} = h_N - \frac{R(TR-N)}{\mu_{TR}} \quad (13)$$

em que:

h_N : altura do lençol freático N dias após a recarga exigida pela cultura (m).

A solução da Eq. 12, pode ser obtida com auxílio do seguinte algoritmo:

I. Calcular o valor de h_0 (Eq. 4), h_{Ncal} (Eq. 12) e o erro (Eq. 14). Caso o erro seja considerado aceitável, calcula-se o espaçamento entre os drenos (Eqs. 7 a 9). Caso contrário, segue-se para o passo II;

$$\text{erro} = h_{Ncal} - h_N \quad (14)$$

em que:

erro: diferença entre a altura do lençol freático calculada e a altura exigida pela cultura.

II. Calcular o próximo valor de h_{TR} (Eq.15) e retornar ao passo I.

$$h_{TR(k)} = h_{TR(k-1)} - \text{erro} \rightarrow h_{TR} = h_{TR(k)} \quad (15)$$

em que:

$h_{TR(k)}$: valor da altura do lençol freático na k-ésima iteração.

A avaliação do modelo desenvolvido foi feita por comparação com a metodologia proposta por Pizarro (1978), em que são feitas simulações da altura do lençol freático antes e logo após várias irrigações (simulação das irrigações sequenciais).

Nas avaliações foram considerados cenários, combinando-se diferentes valores de condutividade hidráulica saturada, porosidade drenável, profundidade do lençol freático exigida pelas culturas, turnos de rega e lâminas de recarga.

Because the water table heights immediately after recharge and after a time interval equal to the watering period are not known, the solution of Eq. 12 is obtained by iteration.

Considering that the water table lowering rate is constant, meaning that the water table height varies linearly with the time between initial and final heights, the first h_t value to be allocated can be calculated by Eq. 13.

$$h_{TR} = h_N - \frac{R(TR-N)}{\mu_{TR}} \quad (13)$$

where:

h_N : water table height N days after the recharge required by the crop (m).

The solution of Eq. 12 can be obtained with the aid of the following algorithm:

I. Calculate the h_0 (Eq. 4) and h_{Ncal} (Eq. 12) value and the error (Eq. 14). If the error is considered acceptable, calculate the spacing between the drains (Eq. 7 a 9). Otherwise, proceed to step II;

$$\text{erro} = h_{Ncal} - h_N \quad (14)$$

where

error: difference between the calculated table water height and the height required by the crop.

II. Calculate the next h_{TR} value (Eq. 15) and return to step I.

$$h_{TR(k)} = h_{TR(k-1)} - \text{erro} \rightarrow h_{TR} = h_{TR(k)} \quad (15)$$

where:

$h_{TR(k)}$: water table height value in iteration No. k.

The evaluation of the developed model was made by a comparison with the methodology proposed by Pizarro (1978), wherein water table height simulations are performed before and after various irrigation intervals (sequential irrigation simulation).

The evaluations considered scenarios by combining different values of saturated hydraulic conductivity, drainable porosity, water table depth required by the crops, watering intervals, and recharge blades.

A porosidade drenável foi calculada em função da condutividade hidráulica saturada (Eq. 16, conforme recomendação de Beltrán (1986).

$$\mu = \frac{\sqrt{K}}{10} \quad (16)$$

O procedimento para a realização das simulações segundo Pizarro (1978) segue as seguintes etapas:

- I. Atribui-se um valor inicial para o espaçamento entre os drenos;
- II. Calculam-se as alturas do lençol freático após a recarga e depois de passado o turno de rega;

Para a primeira irrigação se deve considerar que a altura do lençol freático é igual a zero, calculando-se a altura do lençol logo após a recarga pela Eq. 4. Para as irrigações subsequentes, a altura do lençol após tempo igual ao turno de rega é calculada pela Eq. 17, que corresponde a Eq. 7 rearranjada.

$$h_{TR} = 1,16h_0e^{-\alpha t} \quad (17)$$

O cálculo do fator de retardamento deve ser feito pela Eq. 2. Entretanto o fator de retardamento é função da distância média do lençol freático e camada impermeável, a qual é função das alturas inicial e final do lençol freático. Sendo assim, essa variável somente poderia ser determinada por iteração, sendo calculada de forma simplificada pela Eq. 18 (altura média inicial).

$$D' = D + \frac{h_0}{2} \quad (18)$$

III. Simula-se várias irrigações até que as alturas do lençol freático se tornem constantes;

IV. Verifica-se a altura do lençol freático N dias depois da recarga. Caso não esteja adequada para a cultura em questão, deve-se atribuir novo valor para o espaçamento entre os drenos e voltar ao passo I.

Para a simulação da altura do lençol freático, determinou-se a sua altura média pela Eq. 18 (altura média inicial), Eq. 5 (altura média simples) e Eq. 6 (altura média integrada), sendo calculado espaçamento entre os drenos para cada fator de retardamento, sendo possível compara os resultados. Para o caso das Eqs. 5 e 6, o cálculo do fator de retardamento foi feito por iteração.

The drainable porosity was calculated based on the saturated hydraulic conductivity (Eq. 16), as recommended by Beltrán (1986).

$$\mu = \frac{\sqrt{K}}{10} \quad (16)$$

The procedure for carrying out simulations according to Pizarro (1978) follows the steps below:

- I. Assign an initial value for the spacing between drains;
- II. Calculate the water table heights after recharge and after the draining interval;

The first watering interval should consider that the water table height is equal to zero by calculating the water table height immediately after recharge, as shown in Eq. 4. For following watering intervals, the water table height after a time equal to the watering interval is calculated by Eq. 17, which is a rearrangement of Eq. 7.

$$h_{TR} = 1,16h_0e^{-\alpha t} \quad (17)$$

The calculation of the retardation factor should be performed using Eq. 2. Nevertheless, the retardation factor is a function of the mean distance of the water table and the impermeable layer, which is a function of the initial and final heights of the water table. Thus, this variable could only be defined by iteration, being calculated in a simplified manner using Eq. 18 (initial mean height).

$$D' = D + \frac{h_0}{2} \quad (18)$$

III. Simulate several irrigations until the water table heights become constant.

IV. Check the water table height N days after recharge. If it not suitable for the crop in question, assign a new value for the spacing between the drains and return to step I.

To simulate the water table height, we determined the mean height measured by Eq. 18 (initial mean height), Eq. 5 (simple mean height) and Eq. 6 (integrated mean height), calculating the spacing between the drains for each retardation factor, allowing a comparison of results. In the case of Eq. 5 and 6, the retardation factor calculation was performed by iteration.

Adicionalmente, foram avaliados os cenários com diferentes combinações de distância da camada impermeável, condutividade hidráulica, turno de rega, diâmetro dos drenos e recarga no lençol freático, visando identificar a faixa de restrição no que se refere ao uso da Eq.7, ou seja, a faixa em que o produto do fator de retardamento do solo e do tempo depois da recarga é inferior a 0,2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altura média do lençol freático entre as irrigações para diferentes cenários estão apresentadas na Tabela 1, sendo estas calculadas pelas metodologias de simulações sequenciais com altura média inicial (HMI), altura média simples (HMS) e altura média integrada (HMT). Tomando como referência a altura média integrada, verificou-se que o uso da média inicial apresenta diferenças de 44 a 74%, por outro lado, a altura média simplificada apresentou diferenças de 2,7 a 5,5%. Estes resultados indicam que o uso da altura média inicial pode conduzir a erros elevados, enquanto que a altura média final simples apresentou resultados similares ao resultado obtido por simulação.

Tabela 1. Comparação da altura média do lençol freático utilizando as equações de altura média inicial (HMI), altura média simples (HMS) e altura média integrada (HMT)

Table 1. Comparison of the average water table height using the initial average height (HMI), simple average height (HMS) and integrated average height (HMT) equations

K (m d ⁻¹)	D (m)	Espaçamento entre os drenos (m) (Spacing between drains (m))			Erro absoluto (%) ¹ (Absolute error (%) ¹)	
		TMH	SMH	IMH	IMH ²	SMH ³
0.3	4	0.325	0.333	0.183	2.7	43.8
0.7		0.344	0.331	0.120	3.7	65.2
1.2		0.354	0.334	0.091	5.5	74.2
0.3	1	0.314	0.325	0.183	3.3	41.9
0.7		0.339	0.327	0.120	3.6	64.7
1.2		0.351	0.331	0.091	5.5	74.0

¹ altura média integrada tomada como referência; ² diferença absoluta percentual entre a altura média integrada e a altura média inicial; ³ diferença absoluta percentual entre a altura média integrada e a altura média simples.

¹ integrated mean height taken as a reference; ² absolute percentage difference between integrated mean height and initial mean height; ³ absolute percentage difference between integrated mean height and simple mean height.

Apesar da diferença entre a altura média calculada pela altura média inicial e altura média integrada, verifica-se pela Tabela 2 que a diferença máxima do espaçamento entre os drenos usando os dois valores foi de 10,1%, mas ainda é um valor considerável.

Additionally, we evaluated scenarios with different distance combinations for the impermeable layer, hydraulic conductivity, watering interval, drain diameter, and water table recharge, aiming to identify the restriction range relating to the use of Eq. 7, i.e., the range in which the product of the soil retardation factor and the time after recharge is less than 0.2.

5 RESULTS AND DISCUSSION

The mean height of the water table between irrigations for different scenarios is presented in Table 1 and calculated by the sequential simulation methodologies with initial mean height (IMH), simple average height (SMH), and integrated mean height (TMH). Based on the integrated mean height, we found that the use of the initial mean presents 44-74% in difference; on the other hand, the simplified mean presented 2.7-5.5% in difference. These results indicate that the use of the initial mean height can lead to increased errors, while the final simple mean height showed similar results to the results obtained by simulation.

Despite the difference between the mean height calculated by the initial mean height and the integrated mean height, Table 2 shows that the maximum spacing difference between the drains, using both values, was 10.1%, which is still a significant value.

ISSN ONLINE 1808-8546/ISSN CD 1808-3765

Tabela 2. Comparação do espaçamento entre os drenos pela simulação das irrigações sequenciais adotando-se o método da altura média inicial (HMI) e a altura média integrada (HMT)**Table 2.** Comparison of the spacing between drains by sequential irrigation simulation adopting the initial mean height (IMH) and integrated mean height (TMH)

K (m d ⁻¹)	D (m)	Espaçamento entre os drenos (m) (Spacing between drains (m))		Erro absoluto ¹ (%)
		HMI	HMT	Absolute error ¹ (%)
0.3	4	26.87642	27.335	1.679
0.7		47.59354	49.104	3.076
1.2		65.24625	67.639	3.538
0.3	1	19.57696	20.306	3.589
0.7		29.95247	32.673	8.325
1.2		38.77191	43.137	10.118

¹ altura média integrada tomada como referência.¹ integrated mean height taken as a reference.

As diferenças entre os espaçamentos calculados pela simulação das irrigações sequenciais com altura média integrada e o modelo proposto foram insignificantes, apresentando diferença apenas na primeira casa decimal (Tabela 3), o que não apresenta efeito em termos práticos. Esses resultados foram obtidos para o caso específico em que se considerou a altura máxima do lençol freático de 0,4 m e turno de rega de 10 dias. Entretanto, é importante salientar que a metodologia proposta só pode ser aplicada quando a restrição da Eq. 7 for atendida, ou seja, $\alpha t \geq 0,2$. Sendo assim, outros cenários abrangendo diferentes valores de lâminas de recarga, diâmetro dos drenos, turno de rega, estão apresentados nas Figuras 1 e 2.

Percebe-se que a faixa de utilização da Eq. 7 depende da combinação das variáveis condutividade hidráulica saturada, espaçamento entre os drenos, profundidade dos drenos, profundidade da camada impermeável e turno de rega. Analisando as Figuras 1A e 1B, nota-se que para uma dada altura do lençol freático, quanto maior o turno de rega e a distância da camada impermeável maior é a faixa de utilização do método de cálculo proposto, sendo que a última variável citada provoca grandes variações nessa faixa.

Por outro lado, comparando as Figuras 1A e 1B, percebe-se que quanto maior o diâmetro dos drenos menor é a faixa de utilização do modelo proposto. Contudo, as alterações de diâmetro dos drenos não provocam grandes influências na faixa de utilização do modelo (Figuras 1C e 1D).

The differences between the spaces calculated by sequential irrigation simulation with the integrated mean height and the proposed model were insignificant, with differences only in the first decimal place (Table 3), which has no effect in practice. These results were obtained for a specific case that considered the maximum water table height of 0.4 m and a watering interval of 10 days. Nevertheless, it is important to note that the proposed methodology can be applied only when the restriction of Eq. 7 is met, i.e. $\alpha t \geq 0,2$. Thus, other scenarios involving different recharge blade, drain diameter and watering interval values are shown in Figures 1 and 2.

It is observed that the range of use of Eq. 7 depends on the combination of the variables of saturated hydraulic conductivity, spacing between the drains, drain depth, depth of the impermeable layer, and watering interval. When analyzing Figures 1A and 1B, we note that, for a given water table height, the greater the watering interval, the greater the distance from the most impermeable layer and the range of use of the proposed calculation method, while the latter variable causes large variations in this range.

On the other hand, by comparing Figures 1A and 1B, it is clear that the larger the diameter of the drains, the smaller the range of use of the proposed model. However, diameter changes in the drains do not cause large influence on the range of use of the model (Figures 1C and 1D).

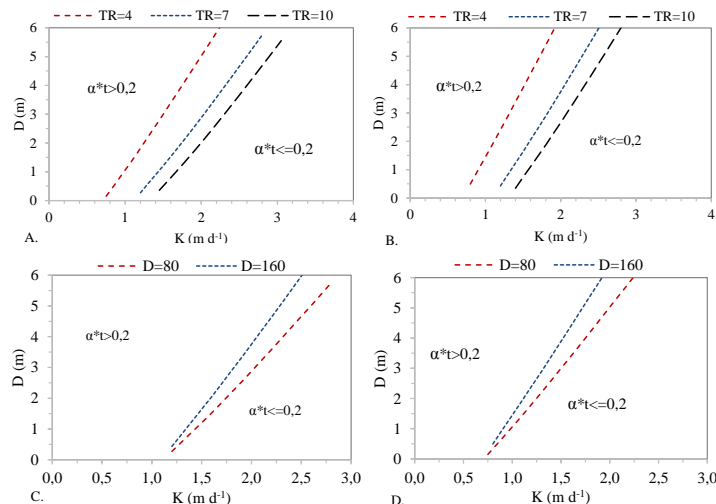
Tabela 3. Comparação do espaçamento entre os drenos pela simulação das irrigações sequenciais com altura média integrada (HMT) e o modelo proposto (MP)

Table 3. Comparison of the spacing between drains by sequential irrigation simulation with integrated mean height (TMH) and the proposed model (PM)

K (m d ⁻¹)	D (m)	Espaçamento entre os drenos (m) (Spacing between drains (m))		Erro absoluto (%) (Absolute error (%))
		HMT	MP	
0,3	4	27,335	27,581	0,901
0,7		49,104	49,255	0,308
1,2		67,639	67,737	0,144
0,3	1	20,306	20,875	2,806
0,7		32,673	33,035	1,110
1,2		43,137	43,424	0,667

Figura 1. Região de utilização do modelo para uma recarga de 20 mm. A. diâmetro dos drenos de 80 mm; B. diâmetro dos drenos de 160 mm; C. turno de rega igual a 7 dias; D. turno de rega igual a 4 dias. TR = 4: turno de rega de 4 dias; TR = 7: turno de rega 7 dias; e TR = 10: turno de rega de 10 dias; D = 80: diâmetro dos drenos de 80 mm ; D = 160: diâmetro dos drenos de 160 mm ; D: distância da camada impermeável; K: condutividade hidráulica saturada do solo.

Figure 1. Model use region for a 20 mm recharge. A. 80 mm drain diameter; B. 160 mm drain diameter; C. watering interval equal to 7 days; D. water interval equal to 4 days. TR = 4: watering interval of 4 days; TR = 7: watering interval of 7 days; and TR = 10: watering interval of 10 days; D = 80: 80 mm drain diameter; D = 160: 160 mm drain diameter; D: impermeable layer distance; K: saturated hydraulic conductivity of the soil.



Em relação à lâmina de recarga, constata-se que quanto maior o seu valor maior será a faixa de utilização do método proposto, mantendo as demais variáveis constantes (Figuras 2A e 2B). Da mesma forma que a recarga, a altura do lençol freático sobre os drenos tem comportamento semelhante (Figuras 2C e 2D). A mudança na faixa de restrição em função da combinação de todas as variáveis se deve ao fato de que essas variáveis alteram o valor de α (Eq. 2), que é afetada positivamente pela condutividade hidráulica, distância da camada impermeável, altura do lençol freático sobre os drenos e, pelo inverso da distância entre os drenos.

Ao mesmo tempo, o turno de rega afeta positivamente o valor da restrição, desse modo, quanto maior o período de retorno maior será a faixa de utilização, conforme discutido anteriormente.

Regarding the recharge blade, it appears that the greater its value, the greater the range of use of the proposed method, keeping other variables constant (Figures 2A and 2B). As is the case with the recharge, the water table height on the drains shows a similar behavior Figures 2C e 2D). The change in the restriction range as a function of combining all variables is due to the fact that these variables change the value of α (Eq.2), which is positively affected by hydraulic conductivity, distance from the impermeable layer, water table height on the drains, and the inverse of the distance between the drains.

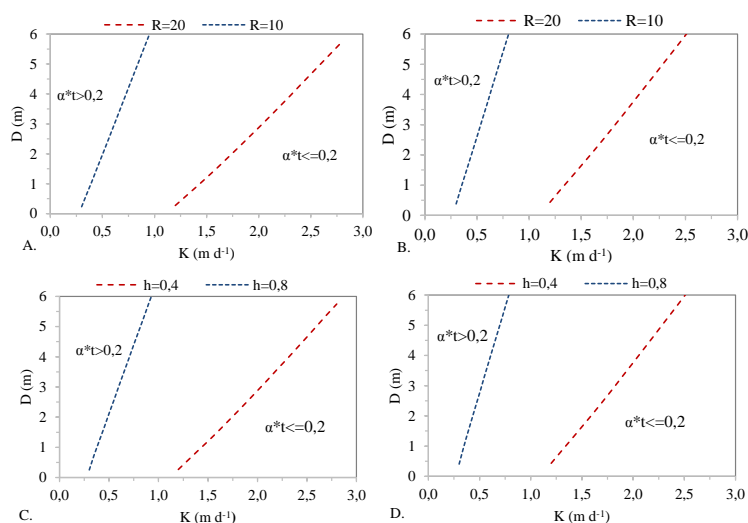
Simultaneously, the watering interval positively affects the restriction value. Thus, the greater the return period, the greater the range of use, as discussed above.

Entretanto, como as variáveis citadas anteriormente são dependentes uma das outras, como o caso da altura do lençol freático e o espaçamento entre os drenos, não necessariamente o aumento da altura do lençol freático refletirá em aumento do fator de retardamento do solo.

Nevertheless, because the previously mentioned variables are dependent on each other, as is the case of table water height and the spacing between the drains, the increased water table height should not necessarily reflect in an increased soil retardation factor.

Figura 2. Região de utilização do modelo para turno de rega de 7 dias. A. Diâmetro dos drenos de 80 mm; B. Diâmetro dos drenos de 160 mm; C. Diâmetro dos drenos de 80 mm; D. Diâmetro dos drenos de 160 mm. R = 20: recarga de 20 mm ; R = 10: recarga de 10 mm; h = 40: altura do lençol freático de 0,4 m; h = 0,8: altura do lençol freático de 0,8 m; D: distância da camada impermeável; K: condutividade hidráulica saturada do solo.

Figure 2. Model use region for a 7-day watering interval. A. 80 mm drain diameter; B. 160 mm drain diameter; C. 80 mm drain diameter; D. 160 mm drain diameter. R = 20: 20 mm recharge; R = 10: 10 mm recharge; h = 40: 0.4 m water table height; h = 0.8: 0.8 m water table height; D: impermeable layer distance; K: saturated hydraulic conductivity of the soil.



Observa-se que para a maioria das condições de dimensionamento de projeto de drenagem o modelo proposto atende às restrições apresentadas, tendo como vantagem a facilidade na obtenção do espaçamento entre os drenos quando comparado com o método proposto por Pizarro (1978), tendo em vista que o número de iterações necessárias para a obtenção do resulta é bem inferior. Para os dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 o número de iterações para a obtenção espaçamento entre os drenos foram dos resultados 3761, 20293 e 7, para a simulação das irrigações sequenciais com altura média inicial, altura média final simples e o modelo proposto, respectivamente. Vale salientar que ambos os modelos possuem as mesmas restrições de aplicação.

6 CONCLUSÕES

O modelo proposto para o cálculo do espaçamento de drenos subterrâneos para época das irrigações apresentou um desempenho equivalente a metodologia de simulação de altura

Note that for most scaling conditions of the drainage project, the proposed model meets given restrictions, with the advantage of ease in obtaining the spacing between the drains compared with the method proposed by Pizarro (1978), considering that the number of iterations needed to obtain the results is much lower.

For the data presented in Tables 1, 2 and 3, the number of iterations to obtain spacing between the drains were the results 3761, 20293 and 7, for sequential irrigation simulation with an initial mean height, simple mean height and the proposed model, respectively. It is worth noting that both models have the same restrictions for application.

6 CONCLUSIONS

The model proposed for the calculation of underground drain spacing for the irrigation season had a performance equivalent to the simulation methodology for the water table height

do lençol freático após cada irrigação. Entretanto, para que os resultados sejam confiáveis, devem-se respeitar as suas restrições de aplicação.

height after each irrigation. Nevertheless, for reliable results, the application restrictions should be followed.

7 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P.E.P. **Validade de algumas equações de drenagem para drenos cobertos em condições de laboratório**. Viçosa, 1982. 84p. Dissertação, UFV.
- BACK, A.J.; FERREIRA, P.A.; SEDIYAMA, G.C.; VIEIRA, M. Sistemas de drenagem em regime variável. **Revista Ceres**, Viçosa, v.37, n.209, p.39-49, 1990.
- BARROS, M.deF.C.; SANTOS, P.M.dos; SILVA, A.J.da. Recuperação de solos afetados por sais usando água de qualidade inferior. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.310-313, 2005.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; ALLEN, R.G.; DROOGERS, P.; D'URSO, G.; STEDUTO, P. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. **Agricultural Water Management**, v.92, n.3, p.111-125, 2007.
- BELTRÁN, J.M. **Drenaje agrícola**. Madrid: Editora Secretaria General Técnica, 1986. 239p.
- BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA JUNIOR, A.G. Sistemas de drenagem agrícola. Parte I: Desenvolvimento do modelo e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 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, 1984. 80p. Dissertação, UFV.
- CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. São Paulo, 1989. 337p.
- DUARTE, S.N.; FERREIRA, P.A.; PRUSKI, F.F.; MARTINEZ, M.A. Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos. Parte I: Desenvolvimento e Análise de Sensibilidade. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.19-31, 1998.
- DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.de; CRUCIANI, D.E. Desempenho de equações de espaçamento entre drenos. **Revista Engenharia Rural**, v.13, n.1, p.49-55, 2002.
- EVANGELISTA, A.W.; FERREIRA, P.A.; PRUSKI, F.F.; SEDIYAMA, G.C. Desenvolvimento e aplicação de metodologia para dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.441-449, 2005.
- FERREIRA, P.A.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; SILVA JÚNIOR, A.G. da; PRUSKI, F.F. Sistemas de drenagem agrícola. Parte II: Comparação entre o modelo desenvolvido e outras metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.376-381, 2001.
- FERREIRA, P.A.; MOURA, R.F.; SANTOS, D.B.; FONTES, P.C.R.; MELO, R.F.de. Efeitos da lixiviação e salinidade da água sobre um solo salinizado cultivado com beterraba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.570-578, 2006.
- MIRANDA, J. H.; DUARTE, S.N.; FOLEGATTI, M. V. Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea. **Revista de Engenharia Rural**, Piracicaba, v.9, n.2, p.1-19, 1998.
- PIRES, E.T. Redes de fluxo de água e dimensionamento de sistemas de drenagem, usando três tipos de solos. Viçosa, 1980. 73p.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid, 1978. 521p.
- PRATA FILHO, D.A validade de algumas equações de drenagem, para drenos abertos, em condições de laboratório. Viçosa, 1982. 100p.
- SHAO, X.H.; HOU, M.M.; CHEN, L.H.; CHANG, T.T.; WANG, W.N. Evaluation of subsurface drainage design based on projection pursuit. **Energy Procedia**, v. 16, p. 747-752, 2012.
- SKAGGS, R.W. DRAINMOD - Reference report: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Raleigh: **USDA-SCS**, Fort Worth, 1981. 329p.
- SOUZA, M.C.P.de; RODRIGUES, W.M.; LEVIEN, S.L.A. Equações obtidas a partir das leis de conservação para o dimensionamento de drenos subterrâneos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.12, p.1201-1208, 2014.