

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA FASE DE AVANÇO NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Dirceu Vilela de Andrade¹, Tarlei Arriel Botrel², Vital Pedro da Silva Paz³
e José Antonio Frizzone²

RESUMO

Os modelos matemáticos para previsão da irrigação superficial constituem recursos valiosos capazes de levar em consideração inúmeras alternativas de dimensionamento, a um custo e tempo reduzidos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver, na linguagem Pascal, um modelo matemático computacional simplificado para a simulação da fase de avanço da água na irrigação por sulcos, baseado na equação de Manning para movimento uniforme de água em canais e na equação de infiltração de Kostiakov-Lewis. O sulco é hipoteticamente dividido em pequenas células de espaços fixos, nas quais são assumidos o movimento como uniforme e o coeficiente de rugosidade “n” de Manning, variável. É feito um balanço da água que flui pelo sulco considerando-se a água infiltrada e a fornecida pelo segmento anterior. Quando se utilizaram medições de campo de alta precisão, os valores do tempo de avanço no final da área, prognosticados pelo modelo, diferiram daqueles obtidos no campo com precisão de 0,71%; mesmo quando o modelo foi testado sob condições usuais de operação e manejo do sistema de irrigação, ele ainda forneceu resultados satisfatórios, apresentando uma média da diferença entre os tempos simulados e medidos, de 8,22%. O modelo apresentou-se como ferramenta útil no dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos.

Palavras-chave: irrigação por sulcos, fase de avanço, simulação

MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION OF FURROW IRRIGATION ADVANCE PHASE

ABSTRACT

The mathematical models to forecast the surface irrigation are valuable tools capable to take into consideration several design alternatives with reduced cost and time. The aim of this study was to develop, in the Pascal language, a simplified computer mathematical model to simulate the furrow irrigation advance phase based on the Manning equation for the uniform water flow in channels and on the Kostiakov-Lewis equation. The furrow is hypothetically divided in small fixed space cells, in which the flow is assumed to be uniform and the “n” Manning roughness coefficient variable. Water balance along the furrow was studied considering the water infiltrated and that supplied from preceding segment. When it was used field measurements of high precision, the simulated values of advance

¹ Eng. Agr., Doutor em Irrigação e Drenagem, CODEVASF. Rua Geraldo Athaide 483, 39400-000 – Montes Claros, MG

² Professor Associado, Depto. de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias 11 – CP 9, 13418-900 – Piracicaba, SP. E-mail: tabotrel@carpa.ciagri.usp.br

³ Eng. Agríc., Doutor em Irrigação e Drenagem, bolsista da FAPESP, Depto. de Engenharia Rural, ESALQ/USP. E-mail: vpspaz@carpa.ciagri.usp.br

time at the end of the field differed in 0.71% from those obtained in the field. Even when the model was tested under usual operation and management conditions, it still provided satisfactory results, showing an average of the differences between the simulated and measured times equal to 8.22%. The model showed to be a useful tool in the design of furrow irrigation systems.

Key words: furrow irrigation, advance phase simulation

INTRODUÇÃO

A irrigação por sulcos consiste na aplicação da água através de sulcos situados lateralmente às linhas de plantio, durante o tempo necessário para que a água se infiltre tanto vertical como lateralmente. O processo típico de uma irrigação por sulcos compõe-se de quatro fases: avanço, armazenamento, depleção e recessão, as quais permitem, em conjunto, a análise do desempenho do sistema. A simplicidade da irrigação por sulcos contrasta com o estudo de seu escoamento hidráulico, que é complexo e se assemelha ao movimento de água em um canal de terra aberto à pressão atmosférica, com o leito inicialmente seco e permeável. Em cada seção do sulco a vazão é variável com o tempo, ainda que no início seja fornecida uma vazão constante; essas características definem um regime não permanente, gradualmente variado sobre o meio poroso.

O principal problema, associado ao dimensionamento da irrigação por sulcos, de acordo com Scaloppi (1983) consiste na previsão das taxas de avanço e da recessão de água na superfície do solo. A fase de avanço fica difícil de ser prevista, devido à natureza do escoamento da água no sulco, classificado como não permanente e gradualmente variado, diminuindo a vazão com a distância, em virtude da infiltração (Tabuada, 1989). O estabelecimento de uma vazão no início do sulco vai originar uma onda que se propaga ao longo do mesmo, cuja velocidade de avanço depende não somente da vazão de entrada mas, também, das características físicas e hidrodinâmicas do solo e do teor de água inicial na profundidade da seção transversal do sulco.

Segundo Basset et al. (1983) em virtude do fato da taxa de infiltração ser geralmente uma função decrescente com o tempo de oportunidade, implica em maiores valores imediatamente após a frente de molhamento, diminuindo progressivamente a medida em que se afasta do ponto de derivação de água, pois a ocorrência da infiltração reduz o fluxo superficial, tornando-o variável com a distância e com o tempo.

De acordo com Reddy & Clyma (1981) os parâmetros que afetam o desempenho da irrigação por sulco, são: vazão de entrada, declividade, extensão da parcela, coeficiente de rugosidade hidráulica, forma do sulco e características de infiltração do solo. A infiltração, a rugosidade hidráulica e a forma do sulco são parâmetros que variam de local.

Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para através deles, se descrever e analisar a irrigação superficial, variando em complexidade desde simples modelos algébricos, baseados no princípio da conservação da massa, até modelos hidrodinâmicos, os quais consistem na solução das equações de Saint-Venant para fluxo em canais sob regime não permanente e variado. Também é utilizado o modelo baseado na hipótese de que a aceleração da água pode ser considerada nula, ao qual denominam de zero-inércia (Souza, 1981).

O fenômeno do avanço da água em sulcos de irrigação tem

sido focado sob duas aproximações: hidrodinâmica e balanço volumétrico (Strelkof, 1970; Scaloppi, 1983; Basset et al., 1983). A aproximação hidrodinâmica é baseada na solução das equações de conservação da massa e da energia ou da quantidade de movimento, que descrevem o movimento da água em regime não permanente e gradualmente variado. A solução, baseada no balanço volumétrico, considera que os volumes superficial e infiltrado podem ser aproximados pelo produto das respectivas áreas médias das seções transversais de escoamento superficial e de infiltração pela distância de avanço considerada (Scaloppi, 1983).

Sob as tradicionais práticas de cultivo, a rugosidade do sulco, segundo Trout (1992a) é criada primariamente pelos agregados do solo e pelas irregularidades na forma do sulco, e uma vez que o tamanho, a forma e o arranjo dos aglomerados do solo podem ser alterados pelo movimento da água, o solo pode ter sua rugosidade modificada.

De acordo com Brown et al. (1988) a forma e a rugosidade do sulco mudam devido à ação das partículas do solo, onde pequenos torrões quebram-se, se movem e são redepositados pelo movimento da água; os agregados do solo seco se desfazem a montante e são rapidamente molhados pelo avanço da água no sulco, devido à força de cisalhamento e pelo próprio fluxo da água; os pequenos aglomerados resultantes e as partículas de solo rolam ao longo do fundo do sulco, enchendo as rachaduras ou cavidades existentes no seu perímetro.

A rugosidade da superfície afeta tanto o avanço como a recessão em sulcos e é quantificada por um parâmetro empírico denominado coeficiente de rugosidade, utilizado nas fórmulas para escoamento em canais com movimento uniforme (Tabuada, 1989); o valor deste coeficiente varia ao longo do ciclo da irrigação, não sendo fácil a sua obtenção, uma vez que o próprio fluxo de água altera a rugosidade da superfície do solo.

Trout (1992b) estudando o efeito da velocidade do fluxo na rugosidade dos sulcos, verificou que a rugosidade absoluta e o coeficiente de rugosidade decrescem com o aumento da velocidade. Chow (1986) afirma que o valor do coeficiente de rugosidade, "n", decresce com o aumento da vazão nos canais e, quando a altura de água é pequena, as irregularidades do fundo do canal ficam mais expostas e esses efeitos ficam mais pronunciados. Também Grassi (1988) estudando o efeito da velocidade no coeficiente de rugosidade, verificou que este aumenta quando a velocidade diminui.

Fangmeir & Ramsey (1979) estudando os efeitos do coeficiente de rugosidade no avanço, na recessão e na eficiência e uniformidade da irrigação, encontraram curvas de avanço e recesso totalmente diferentes para cada valor de "n", mas o efeito na eficiência foi surpreendentemente pequeno. Os valores de "n" de Manning variam desde 0,02 para solos irrigados previamente, e ao redor de 0,04 para solos em áreas recém-preparadas, chegando a 0,15 para o crescimento denso de ervas daninhas ou culturas dentro dos sulcos ou faixas (Elliott &

Walker, 1982). Walker & Skogerboe (1987), Elliot & Walker (1982) e Walker (1989) utilizam, em seus exemplos de cálculo da equação de infiltração pelo método do balanço volumétrico, o valor médio de 0,04 para o coeficiente de rugosidade “n”. Scaloppi (1983), Souza (1984) e Levien & Souza (1987) utilizam o valor de “n” igual a 0,022 em seus modelos de simulação, a partir de dados de sulcos de precisão.

O dimensionamento da irrigação por sulcos pode ser feito por um processo de tentativas desenvolvido com a ajuda de ensaios realizados em campo ou através de simulação, com a utilização de modelos matemáticos, com o objetivo de se conseguir melhores índices de desempenho do sistema. Normalmente, os testes de campo geram resultados mais representativos, porém a experiência tem demonstrado que a determinação desses dados é uma tarefa trabalhosa, complexa e demorada, sendo que qualquer tentativa de se substituir ou diminuir o número de ensaios é válida. Neste aspecto, os modelos matemáticos constituem recursos preciosos capazes de levar em consideração várias alternativas de projeto, a um custo e tempo reduzidos.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático simplificado para a simulação da fase de avanço de água em sulcos de irrigação em declive, com escoamento superficial livre.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo para a simulação da fase de avanço da água em sulcos de irrigação foi baseado na associação da equação de Manning, para movimento uniforme em canais abertos, com a equação de infiltração de Kostiakov-Lewis. O sulco é hipoteticamente dividido em pequenos e constantes segmentos (Ds) assumindo o fluxo uniforme e rugosidade variável. Em cada célula de espaço é feito um balanço do volume de água que escoou pelo sulco, considerando-se a água infiltrada e a fornecida pelo segmento anterior. Para desenvolvimento do modelo, consideraram-se as seguintes hipóteses: o movimento da água é uniforme em cada célula, podendo então a velocidade ser estimada pela equação de Manning; a vazão infiltrada pode ser estimada pela equação de Kostiakov-Lewis; a rugosidade superficial de Manning, “n”, é variável ao longo do sulco, sendo maior quanto maior o perímetro molhado; a vazão de entrada é constante; o sulco apresenta declive e forma da seção transversal uniformes; a seção do sulco é parabólica e os parâmetros geométricos estimados por uma função tipo potência, e a umidade do solo e as características de infiltração são constantes ao longo do sulco.

Os dados de entrada requeridos pelo modelo, são: comprimento do sulco (L); vazão de entrada (q_0); declividade (S_0); coeficiente de rugosidade inicial de Manning (N_0); parâmetros de infiltração de água no solo (constantes da equação de Kostiakov-Lewis) e parâmetros geométricos do sulco. Os parâmetros de infiltração de água são representativos apenas para dada condição de umidade, devendo-se procurar realizar os testes de infiltração para a alimentação do modelo, com a umidade na condição de iniciar uma nova irrigação. Como dados de saída, o modelo fornece o tempo e a distância de avanço da água no sulco.

O modelo gera, no início de cada célula de espaço (Figura 1)

uma nova vazão resultando, assim, uma nova área da seção transversal de escoamento, um outro raio hidráulico e um valor diferente para o coeficiente de rugosidade. Deste modo, a cada trecho não se faz necessária a utilização de fatores de forma superficial e subsuperficial. O processo de solução desenvolvido pelo modelo consiste em criar uma nova célula de controle de tempo deformável em cada incremento de espaço durante a fase de avanço, determinando a vazão, a área, o raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade de Manning “n” aplicando-se, aos limites de jusante e montante, as equações do balanço volumétrico.

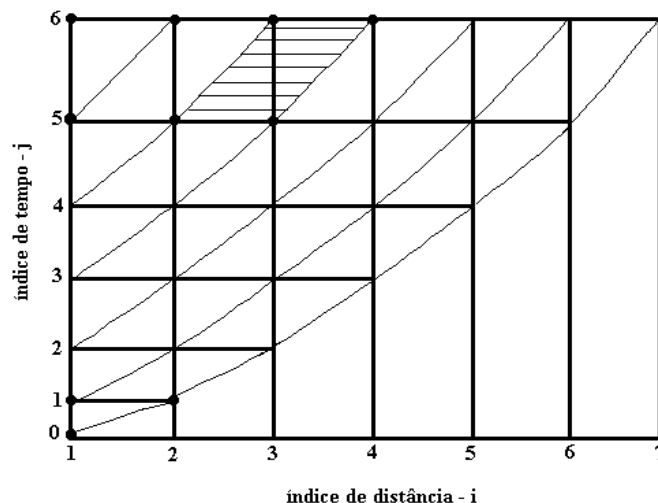


Figura 1. Células de espaço geradas pelo modelo durante a fase de avanço da água no sulco.

Como o movimento da água é assumido uniforme dentro de cada célula de espaço, a equação de Manning pode ser utilizada para estabelecer a relação entre a vazão e a área da seção transversal. Separando-se os termos geométricos e os hidráulicos e através da geometria da seção transversal do solo, assumindo a forma parabólica, tem-se a relação da seção transversal com a vazão utilizada pelo modelo:

$$A[i] = c_1 \cdot \left\{ \frac{q[i-1] \cdot n[i-1]}{\sqrt{S_0}} \right\}^{c_2} \quad (1)$$

e o raio hidráulico é determinado pela expressão:

$$Rh[i] = \left\{ \frac{q[i-1] \cdot n[i-1]}{A[i] \cdot \sqrt{S_0}} \right\}^{3/2} \quad (2)$$

em que:

- [i] - indexador do segmento de espaço
- $A[i]$ - área da seção transversal na célula atual, m^2
- $q[i-1]$ - vazão da célula anterior, $m^3 \cdot s^{-1}$
- $Rh[i]$ - raio hidráulico na célula atual, m
- $n[i-1]$ - coeficiente de rugosidade “n” na célula anterior
- S_0 - declividade do sulco, $m \cdot m^{-1}$
- c_1, c_2 - parâmetros geométricos do sulco.

Os coeficientes geométricos do sulco, c_1 e c_2 , foram obtidos por regressão linear logarítmica, com pares de valores da base e da altura do fluxo. Para a obtenção do coeficiente de rugosidade

“n” de Manning, relacionaram-se os coeficientes de rugosidade C de Chezy, da fórmula de Manning, e de Powel (Chow, 1986). Igualando-se as duas relações, pode-se calcular o valor da altura da rugosidade (e) a partir do raio hidráulico e do coeficiente de rugosidade “n_o” inicial, ou seja:

$$\varepsilon=10^{\log Rh - \frac{Rh^{1/6}}{23,19 n_o}} \quad (3)$$

Considerando-se a altura de rugosidade constante, é calculado o coeficiente de rugosidade variável de Manning “n[i]”, para cada célula de espaço, relacionado com o raio hidráulico, através da expressão:

$$n[i]=\frac{Rh[i]^{1/6}}{23,19 \log\left(\frac{Rh[i]}{\varepsilon}\right)} \quad (4)$$

O tempo instantâneo de avanço da água T[i] é determinado pela seguinte expressão:

$$T[i]=\frac{\Delta s}{v[i]} \quad (5)$$

sendo a velocidade v[i] dada por:

$$v[i]=\frac{q[i-1]}{A[i]} \quad (6)$$

O tempo de avanço acumulado na célula atual é obtido por:

$$Tavc[i]=Tavc[i-1]+T[i] \quad (7)$$

em que,

T[i] - tempo de avanço instantâneo na célula atual, s

Ds - célula de espaço, m

v[i] - velocidade média, m.s⁻¹

Tavc[i-1] - tempo de avanço acumulado na célula anterior, s.

A vazão infiltrada no solo por segmento é relacionada ao tempo de oportunidade de infiltração, através da equação de infiltração instantânea de Kostiakov-Lewis, obtida por derivação da equação de infiltração acumulada, ou seja:

$$\frac{dV}{dT}=K' T^{a'} + fo \quad (8)$$

Multiplicando-se esta equação pelo segmento de espaço Ds, tem-se a vazão infiltrada por segmento:

$$qi[i]=(K' To[i]^{a'} + fo) \Delta s \quad (9)$$

em que,

qi[i] – vazão infiltrada na célula atual, m³.s⁻¹.segmento

K', a', fo – parâmetros de ajuste da equação de infiltração

To[i] – tempo de oportunidade instantâneo para a infiltração, s.

O tempo de oportunidade de infiltração é o tempo que a água permanece em contato com o solo e, assumindo um tempo médio que a água permanece sobre o segmento de espaço atual (instantâneo), tem-se:

$$q[i]=qo - qiac[i] \quad (10)$$

sendo: Tavc[i-1] o tempo de avanço acumulado na célula anterior.

O modelo considera um tempo de oportunidade para cada célula de espaço e, conseqüentemente, uma vazão infiltrada para cada segmento.

A vazão no início do próximo trecho, q[i] é obtida pela seguinte relação:

$$q[i]=qo - qiac[i] \quad (11)$$

sendo:

$$qiac[i]=qiac[i-1]+qi[i] \quad (12)$$

em que:

qo – vazão de entrada (constante), m³.s⁻¹

qiac[i] – vazão infiltrada acumulada na célula de espaço, m³.s⁻¹.segmento

Os volumes acumulado, superficial, infiltrado e total, são calculados pelas seguintes expressões:

$$Vsa[i]=q[i] Tavc[i] \quad (13)$$

$$Via[i]=qiac[i] Tavc[i] \quad (14)$$

$$VTa[i]=qo Tavc[i] \quad (15)$$

em que:

Vsa[i] – volume superficial acumulado, m³

Via[i] – volume infiltrado acumulado, m³

Vta[i] – volume total acumulado, m³.

O modelo possui duas fases: estimativa do tempo de avanço na primeira célula de espaço e os posteriores tempos, a partir da segunda célula, e assim sucessivamente. Com os dados de entrada, os parâmetros geométricos do sulco c1 e c2 são calculados. A área da seção transversal no início do sulco (Ao) e o raio hidráulico (Rho) são estimados considerando-se um valor inicial para o coeficiente de rugosidade de Manning “no”. Com esses valores é calculada a altura da rugosidade (e) na primeira célula, que é assumida constante. Com a vazão de entrada e a área da seção transversal do sulco, a velocidade e o tempo de avanço da água na primeira célula são estimados. A partir do tempo de avanço, obtém-se o tempo de oportunidade de infiltração na primeira célula e com o tempo de oportunidade determina-se a vazão infiltrada na célula pela equação de Kostiakov-Lewis. A vazão de entrada no próximo trecho corresponde à diferença entre a vazão de entrada e a vazão infiltrada acumulada no trecho anterior. Os procedimentos de cálculo continuam sucessivamente, em todas as células, até que o comprimento do sulco seja alcançado ou toda a vazão infiltrada. O fluxograma básico do modelo está representado na Figura 2.

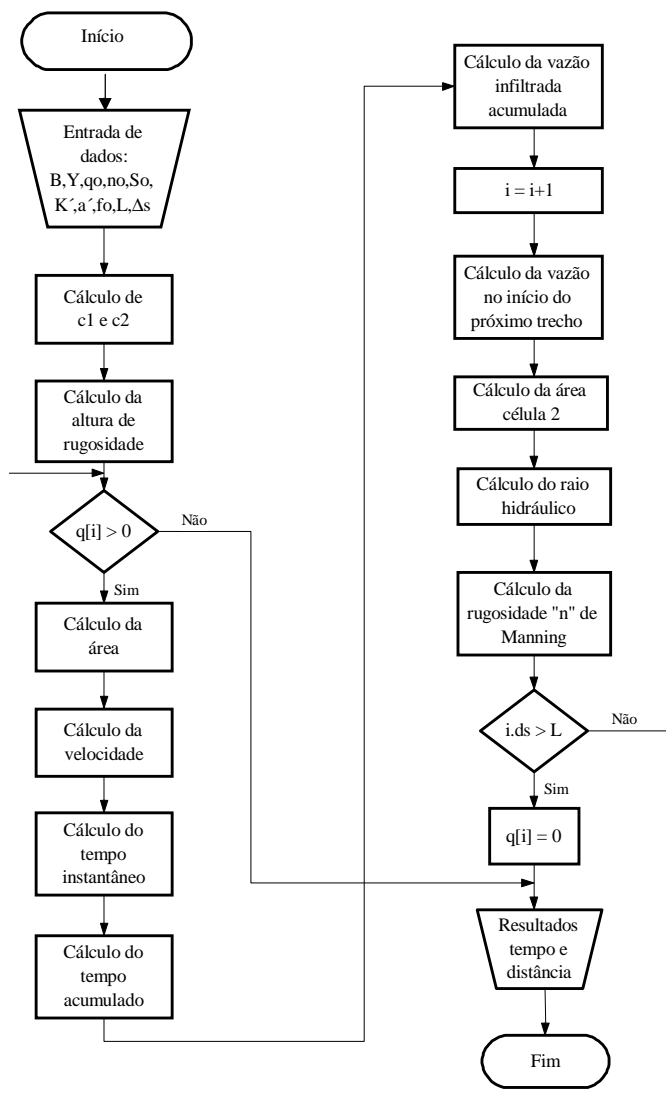


Figura 2. Fluxograma do modelo computacional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto para a simulação da fase de avanço em sulcos em declive e com escoamento superficial no final, foi analisado e testado com dados de sulcos de precisão e com resultados obtidos a nível de campo de ensaios, realizados na área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, em Piracicaba, SP.

A primeira análise e comparação são feitas com dados de sulcos de precisão obtidos por Ramsey, citado por Souza (1984) na Universidade do Arizona (EUA) para testar modelos matemáticos possuindo, portanto, um grau de controle muito superior ao verificado numa irrigação normal.

A Figura 3 apresenta as curvas de avanço estimadas pelo modelo SAVIS (Simulação do avanço na irrigação por sulcos) e observadas em sulcos de precisão, segundo Ramsey, citado por Souza (1984). Verifica-se que o modelo fornece uma excelente aproximação do avanço quando comparado com os dados obtidos em campo com sulcos de precisão, apesar das hipóteses assumidas, os valores estimados do tempo de avanço no final do sulco diferiram daqueles obtidos em campo em 0,71%.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros obtidos pelos autores

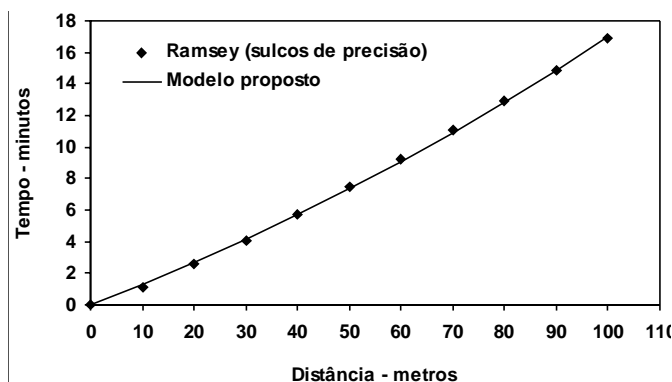


Figura 3. Curvas de avanço observadas por Ramsey e determinadas pelo modelo

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de irrigação por sulcos na área experimental

Parâmetros	Sulco 1			Sulco 2		Sulco 3	
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Vazão inicial – q_0 (l.s^{-1})	1,4500	1,0430	0,7100	1,3260	0,9800	1,4990	1,3830
Vazão de saída – q_s (l.s^{-1})	1,0000	0,6740	0,4560	0,8200	0,5600	0,9420	0,9130
Umidade inicial (%)	19,4200	18,8800	19,8500	18,8800	19,4200	19,8500	19,4200
Declividade – S_o (%)	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Coef. Manning inicial – n_o	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400
c_1	1,3245	1,2207	1,1478	1,2342	1,2909	1,1645	1,2313
c_2	0,7078	0,6950	0,6843	0,6960	0,7040	0,6844	0,6974
Comp. do sulco (m)	100	100	100	100	100	100	100
K' ($10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ m}$);	1,9190	1,4130	1,3250	0,9435	0,9906	2,0630	1,3380
a'	-0,6205	-0,4790	-0,5041	-0,3602	-0,4038	-0,5448	-0,4087
f_o ($10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}$)	4,5000	3,6800	2,5300	5,0700	4,2000	5,5700	4,6700
Célula de espaço – Δs (m)	0,1250	0,1250	0,1250	0,2500	0,2500	0,1250	0,1250
p	10,9335	9,9943	8,4136	11,9460	10,4726	9,5317	10,3397
r	0,8060	0,6991	0,6975	0,6442	0,6416	0,7923	0,7062

Obs: A equação de avanço é do tipo $s = p \cdot T^r$

em avaliações de campo da irrigação por sulco na área experimental da ESALQ/USP. As avaliações foram realizadas com a umidade do solo em torno de 19,32%, ideal para a irrigação, de acordo com as condições do solo, resultando num intervalo médio de irrigação entre 6 e 7 dias. Três sulcos de irrigação foram utilizados com diferentes vazões de entrada.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam as curvas de avanço observadas e simuladas pelo modelo, nos sulcos da área experimental, para diferentes vazões. As curvas simuladas apresentam boa aproximação, quando comparadas com os dados observados em condições de campo.

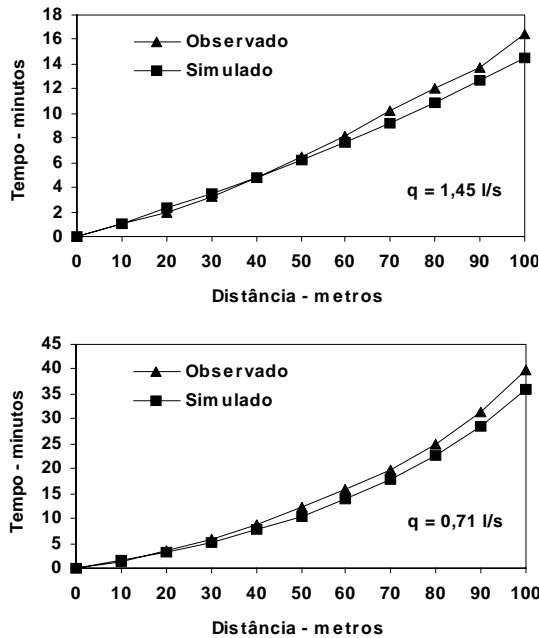


Figura 4. Curvas de avanço observadas e simuladas para o sulco 1 com diferentes vazões

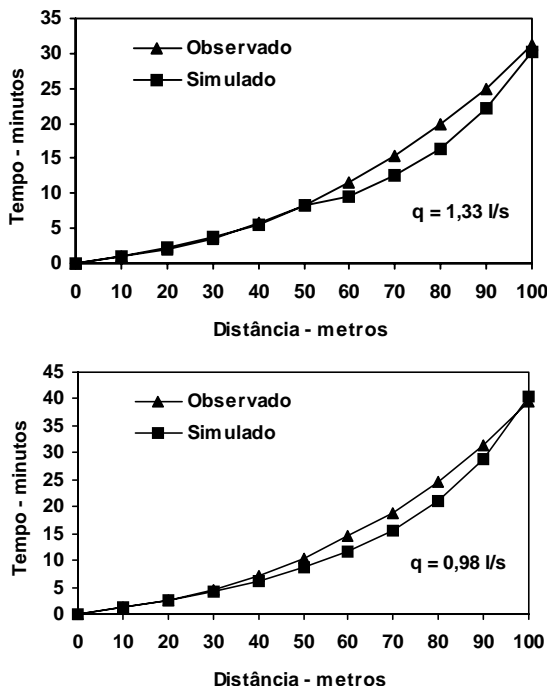


Figura 5. Curvas de avanço observadas e simuladas para o sulco 2 com diferentes vazões

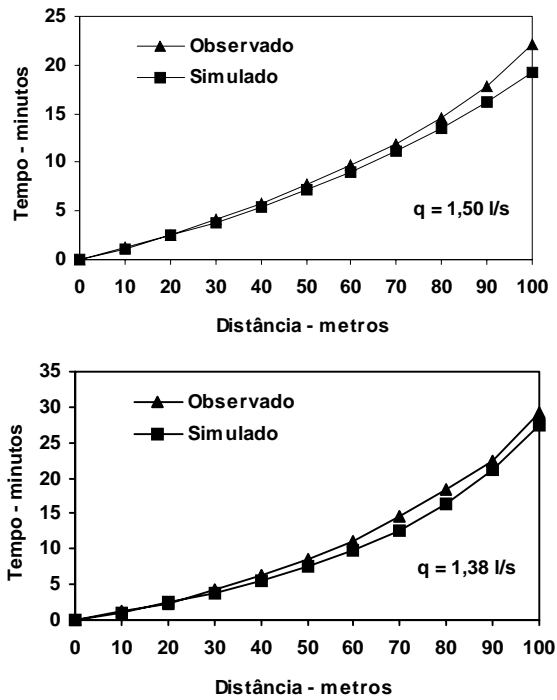


Figura 6. Curvas de avanço observadas e simuladas para o sulco 3 com diferentes vazões

Para o sulco 1 (Figura 4) os valores estimados diferem daqueles observados no campo, em 12,18%, com vazão de 1,45 l.s⁻¹, e 9,79% , com a vazão de 0,71 l.s⁻¹, no final do sulco. Melhor aproximação pode ser verificada com o sulco 2 (Figura 5) em que os valores simulados diferem dos observados em 2,66% para uma vazão de 1,33 l.s⁻¹ e 2,25%, para uma vazão de 0,98 l.s⁻¹.

Também para o sulco 3 verificou-se boa aproximação entre os valores observados no campo e os simulados pelo modelo. Os valores simulados diferem em 12,51% e 5,83% daqueles observados no campo, para as vazões de 1,50 l.s⁻¹ e 1,38 l.s⁻¹, respectivamente.

A média geral da diferença no final da parcela entre o tempo observado no campo experimental e o simulado pelo modelo para as vazões testadas, foi de 8,22%. Apesar das limitações de controle dos fatores de ensaio a nível de campo, tais como declividade uniforme e vazão de entrada constante, esta diferença é pequena, em termos práticos, qualificando o modelo como de boa precisão.

Observa-se a tendência de subestimar o tempo de avanço simulado em relação ao observado em condições de campo, o que pode ser explicado pelo fato de três sulcos serem testados um ao lado do outro. Também, conforme a metodologia desenvolvida, a vazão média no trecho atual (i) foi estimada a partir da vazão média no segmento anterior, não se considerando a vazão na célula atual; assim, superestima-se a velocidade (Vi) e reduz-se o tempo de avanço acumulado. A uniformidade da umidade do solo, da declividade da parcela e da forma dos sulcos, é fator que pode justificar as diferenças entre os valores observados e os estimados pelo modelo.

A hipótese básica de se considerar o movimento uniforme dentro de cada célula de espaço é aceitável, uma vez que o incremento de distância (Ds) é muito pequeno tornando, na realidade, o escoamento variável na extensão total do sulco.

O coeficiente de rugosidade superficial é muito afetado pelas condições de escoamento do sulco, justificando o uso deste parâmetro como variável no modelo. O valor inicial considerado mostrou-se adequado no exemplo de campo.

A diferença entre os dados observados e os simulados pelo modelo depende acentuadamente da precisão e da representatividade dos parâmetros de entrada requeridos, ou seja, do grau de controle conseguido quando da realização dos ensaios de campo, principalmente das constantes das equações de infiltração.

CONCLUSÕES

1. Quando considerou-se na análise medições de campo de alta precisão, os valores estimados pelo modelo apresentaram excelente aproximação com os valores observados em condições de campo, diferindo em apenas 0,71% ao final do tempo de avanço.

2. Quando o modelo foi testado sob condições usuais de operação e manejo do sistema de irrigação, a média geral da diferença entre os tempos simulados e os observados no final do sulco para as vazões testadas, foi de 8,22%, apesar das limitações com relação aos fatores de ensaio em campo.

3. De acordo com as hipóteses simplificadoras e com os resultados apresentados, o modelo apresenta-se bastante consistente e simplificado, com boa precisão para prever a fase de avanço na irrigação por sulcos abertos com gradiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSET, D.L.; FANGMEIR, D.D.; STRELKOF, T. Hydraulics of surface irrigation. In: JEMSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigations systems**. St. Joseph. The American Society of Agricultural Engineers, 1983. Cap.12, p.447-98.

BROWN, M.; KEMPER, W.D.; TROUT, T.J.; HUMPHERYS, A.S. Sediment, erosion and water intake in furrows. **Irrigation Science**, New York, **9**:45-55, 1988.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. 22. Ed. Singapore, McGraw-Hill, 1986. 680p.

ELLIOTT, R.L. & WALKER, W.R. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **25**(2):396-400, 1982.

FANGMEIR, D.D.; RAMSEY, M.K. Intake characteristics of irrigation furrows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **22**(1):93-9, 1979.

GRASSI, C.J. **Diseño y operación del riego por superficie**. Mérida, CIDIAT, 1988. 415p. (Série RD, 36).

LEVIEN, S.L.A.; SOUZA, F. de. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, New York, **113** (3):367-77, 1987.

REDDY, J.M. ; CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **24**(3):617-23, 1981.

SCALOPPI, E.J. Modelos matemáticos para simulação da irrigação superficial. Botucatu, 1983. 115p. (Livre Docência – Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP).

SOUZA, F. de. Non linear hydrodynamic model of furrow irrigation. Davis, 1981. 172p. (PhD – University of California).

SOUZA, F. de. Modelo matemático da irrigação por sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **19**(9):1135-43. 1984.

STRELKOF, T. Numerical solution of the Saint-Venant equations. **Journal of the Hydraulic Division**. ASCE, New York, **96**(HY1):223-52, 1970.

TABUADA, M.A. Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos. Lisboa, 1989. 237p. (Doutorado – Universidade de Lisboa).

TROUT, T.J. Furrow flow velocity effect on hydraulic roughness. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, New York, **118** (6):981-87, 1992a.

TROUT, T.J. Flow velocity and wetted perimeter effects on furrow infiltration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, New York, **35**(3):855-63, 1992b.

WALKER, W.R. **Guidelines for designing and evaluation surface irrigations systems**. Rome, FAO, 1989. 137p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 45).

WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G. V. **Surface irrigation: theory and practice**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1987. 386p.