

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO EM IRRIGAÇÃO POR SULCOS

MÁRCIO. A. VILAS BOAS¹
VERA MARIA RODRIGUES²
SILVIO CÉSAR SAMPAIO³

UNIOESTE- Universidade Estadual do Oeste do Paraná
CCET – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Campus de Cascavel –PR

RESUMO: O programa Irriga Sulco auxilia técnicos na simulação do avanço e do dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos e constitui um recurso didático para disciplinas de irrigação. Foi desenvolvido em Visual Basic para plataforma windows. O programa determina valores de distância de avanço da água no sulco, baseado numa solução explícita do modelo balanço volumétrico. Os formulários que simulam o avanço geram tabelas de tempo e distância, a equação do avanço, gráficos tempo x distância, gráficos lâmina infiltrada x distância, gráficos do tempo de oportunidade de infiltração, além de índices de desempenho para a situação em estudo. O programa determina resultados de dimensionamento para sulcos em nível e em desnível. Valores de comprimento do sulco, tempo de avanço, tempo de infiltração e tempo de aplicação da água podem ser dimensionados. Para sulcos em desnível são gerados, ainda, índices de desempenho para sistemas sem e com vazão reduzida.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulcos, programa computacional, modelo balanço volumétrico explícito.

SOFTWARE TO SIMULATE IN FURROW IRRIGATION

ABSTRACT: The Irriga Sulco software helps technicians to simulate the advance and the design of furrow irrigation systems and may be an useful tool for teaching in irrigation courses. It was developed in Visual Basic for platform windows. This computer program provides furrow water advance distance results based on an explicit solution of the volume balance model. The program forms, that simulate the advance, can provide time and distance tables, the advance equation, time x distance graphics, infiltrated water depth x distance graphics, infiltration opportunity time graphics and, also the performance indexes of the situation that is being analyzed. The program can provide designing results for level and slope furrows. One can obtain furrow length, advance time, infiltration time and water application time results. For slope furrows, one can also obtain performance indexes when there is water reduction and when there is not.

KEYWORDS: Furrow irrigation, software, explicit volume balance model.

(Received January 22, 2006 / Accepted May 31, 2006)

1. INTRODUÇÃO

A irrigação por superfície constitui a forma mais usada e mais tradicional de irrigar, sendo o método de irrigação por sulcos um dos mais usados, principalmente para cultivos em linhas, como olerícolas, milho, trigo, algodão, cana-de-açúcar e outras. (BERNARDO, 1995).

Apesar dos grandes avanços tecnológicos, com o desenvolvimento de vários modelos matemáticos que simulam o movimento da água no solo, a irrigação por sulcos apresenta, ainda, valores insatisfatórios de eficiência (50 a 60%). A pressão mundial, crescente, dos órgãos governamentais, no sentido de racionalizar o uso dos recursos hídricos, impulsionam pesquisas que visam melhorar a eficiência deste método. (CARVALHO et al., 2002).

Modelos matemáticos, como o balanço volumétrico, simulam satisfatoriamente a irrigação por sulcos. (VALIANTZAS et al., 2001). Processos matemáticos, como o de ALAZBA (1999), que baseado neste modelo, alcançou uma solução explícita para a distância de avanço, contribuem para acelerar a resolução de problemas rotineiros de engenharia. Contudo, existe uma grande quantidade de variáveis, equações e cálculos matemáticos envolvidos no modelo. Neste ponto os programas computacionais aparecem como uma ferramenta de grande utilidade, capazes de simular inúmeras alternativas de dimensionamento, a um custo e tempo reduzidos. O presente trabalho teve como objetivo a elaboração do programa Irriga Sulco, utilizando a linguagem Visual Basic, em ambiente Windows, para a simulação do avanço e do dimensionamento em irrigação por sulcos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O programa computacional Irriga Sulco é composto de dois módulos desenvolvidos para fornecer resultados de avanço e de dimensionamento em sistemas de irrigação por sulcos. Foi desenvolvido em linguagem Visual Basic 6.0 para plataforma windows.

Para determinação da distância de avanço conhecido o tempo de avanço da água no sulco e,

determinação do tempo de avanço conhecida a distância de avanço foi usado, no programa, o processo matemático desenvolvido por ALAZBA (1999). O autor introduz uma modificação no modelo balanço volumétrico e alcança uma solução explícita para a determinação da distância de avanço considerando as seguintes variáveis adimensionais:

$$Q^* = \frac{Q_0}{Q_R} \text{ onde } Q_0 = Q_R \quad (1)$$

$$A^* = \frac{A}{A_R} \text{ onde } A_R = r_y A_0 \quad (2)$$

$$t^* = \frac{t}{T_R} \text{ onde } T_R = \left(\frac{A_R}{k} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (3)$$

$$x^* = \frac{x}{X_R} \text{ onde } X_R = \frac{Q_R \cdot T_R}{A_R} \quad (4)$$

O método desenvolvido por ALAZBA (1999) considera também, a equação de Manning para o cálculo da área da lâmina de escoamento,

$$\text{dada por: } A_0 = A_n = \zeta \left(\frac{Q_0 \cdot n}{\sqrt{S_0}} \right)^\eta \quad (5)$$

em que: Q^*, A^*, t^*, x^* - respectivamente, vazão, área, tempo e distância adimensionais;

Q_R, A_R, T_R, X_R - variáveis de referência não nulas;

Q_0, S_0 - vazão e declividade;

A_0, A_n - área de entrada e área média da lâmina de escoamento;

n - rugosidade de Manning

r_y - coeficiente de forma superficial

k, a, ζ, η - coeficientes empíricos

Segue-se então, a forma adimensional da equação da continuidade:

$$t^* = x^* + r_z \zeta .x^*$$

onde $\zeta = t^a$ quando se usa a equação simplificada de Kostiakov $z = k.t^a$ e $\zeta = t^{*a} + f^* t^*$ quando se usa a equação completa de Kostiakov $z = k.t^a + f_0.t$ onde $f^* = f(T_R/A_R)$.

Usando o método dos mínimos quadrados, transformações algébricas e simplificações, ALAZBA (1999) obteve, para o cálculo de r_z , a seguinte fórmula:

$$r_z = \frac{\alpha + \beta (x^*/t^*)}{1 + \gamma (x^*/t^*)}$$

onde

$$\alpha = \frac{a\pi(1-a)}{\text{sen } a\pi} \quad \beta = 0,35a\pi - \frac{3}{5\pi}(1+4a^2)$$

Substituindo a equação r_z na equação adimensional da continuidade, chega-se a equação do 2º grau a seguir:

$$(\beta t^{*a} + \gamma) x^{*2} + (t^* + \alpha t^{*a+1} - \gamma t^*) x^* - t^{*2} =$$

cujas resoluções fornece o valor de x^* , logo a distância de avanço é dada por: $x = x^* . X_R$

Voltando à equação adimensional de continuidade e isolando t^* , obtém-se:

$$t^* = \left(\frac{1 - (x^*/t^*) - \varepsilon}{r_y \cdot (x^*/t^*)} \right)^{\frac{1}{a}}$$

da água num sulco é dada por: $t = t^* . T_R$

O programa faz também, a avaliação de desempenho para o sistema de irrigação em estudo, usando a metodologia descrita por FRIZZONE (1993). Foram consideradas no estudo apenas, irrigações sem *déficit* hídrico na zona radicular.

Para determinar o dimensionamento de sulcos em desnível, com comprimento indefinido, foi utilizado o processo matemático descrito por FRIZZONE (1993), incluindo a análise de

desempenho para irrigações contínuas e com redução de vazão.

Para determinar o dimensionamento de sulcos em nível e fechados no final, usou-se o processo matemático descrito por SCALOPPI (1986) e FRIZZONE (1993).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O menu principal do programa Irriga Sulco contém as opções Arquivo, Simulação do Avanço, Dimensionamento de Sulcos e Ajuda. A opção Arquivo apresenta um submenu com os itens Abrir, Salvar como, Imprimir e Sair. O submenu da Simulação do Avanço contém os itens Distância de Avanço e Tempo de Avanço. O tempo de Avanço contém os sub-itens Cálculo e Avaliação do Desempenho (Figura 1). A opção Dimensionamento de Sulcos apresenta um submenu com os itens Sulcos em Desnível e Sulcos em Nível (Figura 2).



FIGURA 1. Opção Simulação do Avanço do Menu Principal

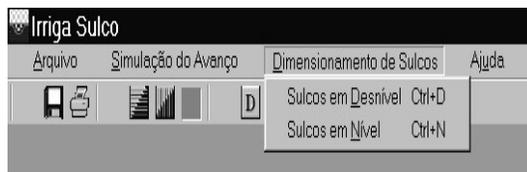


FIGURA 2. Opção Dimensionamento de Sulcos do Menu Principal

Na opção Distância de Avanço acessa-se um formulário que fornece uma tabela com resultados de distância e tempo de avanço da água no sulco e gráficos correspondentes à tabela.

O programa apresenta um exemplo de aplicação em cada formulário que o compõe. O exemplo referente ao formulário citado é baseado na metodologia de ALAZBA (1999). Nele (Figura 3) foram considerados os seguintes dados

de entrada: comprimento do sulco $L= 200\text{m}$; vazão $Q_0= 2,33\text{l/s}$; coeficiente k da equação de infiltração $k = 0,00320099\text{m/min}^a$; expoente a da equação de infiltração $a = 0,49$; coeficiente ζ da equação da Manning $\zeta =1$ e expoente η da equação da Manning $\eta =0,6$; fator da forma da superfície $r_y=0,8$; variação do tempo $\Delta t =10\text{min}$. O botão Cálculo da Distância fornece valores de distância de avanço em função do tempo. O botão Gráfico 1, apresenta o gráfico tempo x distância correspondentes a primeira entrada de dados. Modificando um ou mais parâmetros, o botão Gráficos 1 e 2, fornece dois gráficos tempo x distância no mesmo plano cartesiano, correspondentes à primeira entrada de dados e à segunda entrada (modificada). O botão Gráficos 1, 2 e 3, permite a obtenção de três gráficos tempo x distância no mesmo plano cartesiano, após ter sido feita mais uma modificação nos parâmetros de entrada. A Figura 4 mostra o resultado gráfico relativo a mudanças no parâmetro rugosidade (n), sem alteração nos demais parâmetros.

Tempo (min)	Distância (m)
0	0,0000
10	45,1266
20	82,7395
30	116,6025
40	147,8900
50	177,2187
60	204,9745

FIGURA 3. Exemplo do formulário Distância de Avanço

N opção Tempo de Avanço ► Cálculo aciona-se um formulário que fornece resultados de distância e tempo de avanço da água no sulco e a equação de avanço, correspondentes aos dados de entrada. Obtidos estes resultados, o programa habilita o formulário de Avaliação do Desempenho, que é um formulário vinculado ao anterior e que faz a avaliação do desempenho do sistema de irrigação em estudo.

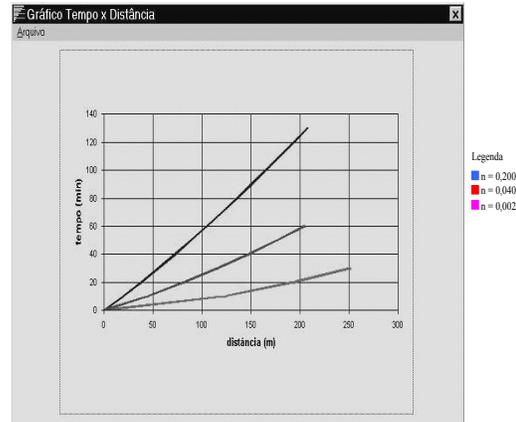


FIGURA 4. Gráficos Tempo x Distância variando a rugosidade

Os exemplos que aparecem nos formulários de Cálculo do Tempo de Avanço e Avaliação do Desempenho são baseados na metodologia de ALAZBA (1999) e FRIZZONE (1993). No formulário Avaliação do Desempenho (Figura.5) foram considerados os seguintes dados de entrada: comprimento do sulco $L= 200\text{m}$; vazão $Q_0= 2,33\text{l/s}$; coeficiente k da equação de infiltração $k = 0,00320099\text{m/min}^a$; expoente a da equação de infiltração $a = 0,49$; coeficiente g da equação de avanço $g = 0,0800\text{m/min}^h$; expoente h da equação de avanço $h = 1,2458$; espaçamento entre sulcos $W= 1\text{m}$; lâmina requerida $Y_r= 40\text{mm}$ e tempo de reposição $T_{rep}=175\text{min}$.

A tabela de visualização do cálculo da lâmina média é obtida quando é acionado o botão Visualização da tabela p/cálculo da lâmina média. O botão Resultados, quando acionado, mostra na tela os seguintes valores: lâmina média infiltrada $Y_m= 43,7\text{mm}$; lâmina aplicada $Y_a= 163,5\text{mm}$; uniformidade de distribuição $U_d= 92,5\%$; eficiência de aplicação $E_a= 24,5\%$; eficiência de armazenamento $E_s= 100\%$; perdas por percolação $P_p= 2,3\%$ e perdas por escoamento $P_e= 73,3\%$. Na barra de menu, a opção Gráficos fornece o gráfico da altura da lâmina infiltrada (mm) x distância (m) e o gráfico do tempo de

oportunidade de infiltração (Figura 6), relativos ao exemplo.

Visualização da Tabela para cálculo da lâmina média

x (m)	Tav (min)	Tt (min)	Tméd(m) Zi (mm)
0	0,0000	233,9455	
10	1,4089	232,4368	233,1410
20	3,3413	230,5042	231,4704
30	5,5372	228,3083	229,4063
40	7,9239	225,8216	227,1150
50	10,4633	223,3622	224,6919
60	13,1314	220,7141	222,0492
70	15,9116	217,9339	219,3240
80	18,7914	215,0541	216,4940
90	21,7613	212,0842	213,5691
100	24,8136	209,0319	210,5980
110	27,9420	205,9036	207,4977
120	31,1413	202,7047	204,2832
130	34,4063	199,4316	200,9697
140	37,7317	196,0897	197,5622
150	41,1123	192,6745	194,0657
160	44,5429	189,1814	190,4852
170	48,0183	185,6159	186,8257
180	51,5333	181,9826	183,0922
190	55,0837	178,2861	179,2907
200	58,6643	174,5319	175,4272

Resultados:

Lâmina Média Infiltrada ($Y_m = 2 \cdot Zi / N$) 43,7 (mm)
 Lâmina Aplicada (Y_a) 163,5 (mm)

Uniformidade de Distribuição (U_d) 92,5 (%)
 Eficiência de Aplicação (E_a) 24,5 (%)
 Eficiência de Armazenamento (E_s) 100 (%)
 Perdas por percolação (P_p) 2,3 (%)
 Perda por escoamento (P_e) 73,3 (%)

FIGURA 5. Exemplo do formulário Avaliação do Desempenho

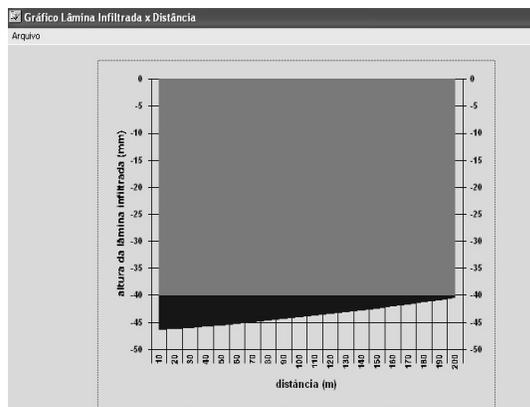
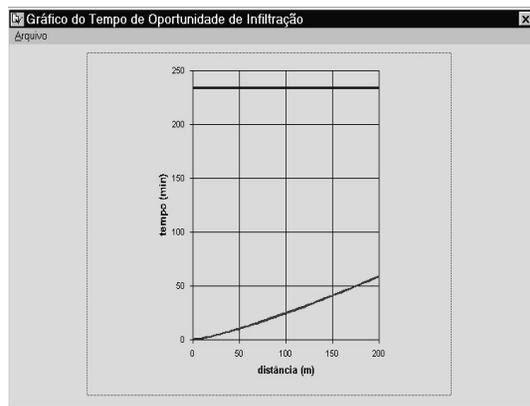


FIGURA 6. Gráfico lâmina infiltrada x distância e gráfico Tempo de Oportunidade de infiltração

O usuário optando por Sulcos em Desnível acessa um formulário que fornece resultados de dimensionamento como: comprimento do sulco, tempo de avanço da água no sulco, tempo de infiltração do volume requerido, tempo total de aplicação de água e os índices de desempenho para vazão contínua. Um formulário auxiliar fornece o valor da vazão máxima não erosiva em função da declividade e da textura do solo. Obtidos os resultados, torna-se habilitado o formulário Avaliação do desempenho para vazão reduzida que avalia o sistema de irrigação em estudo, quando é usada redução da vazão inicial. Este formulário fornece o valor da vazão reduzida, do tempo de irrigação com vazão reduzida e dos índices de desempenho para vazão reduzida. Um botão para a visualização da tabela para cálculo da vazão reduzida, também está presente neste formulário.

O formulário Sulcos em Desnível (Figura 7) apresenta um exemplo baseado em Frizzone (1993) cujos valores de entrada são: declividade $S_o = 0,8\%$; vazão $Q_o = 0,81/s$ espaçamento entre sulcos $W = 1m$; lâmina requerida $Y_r = 50mm$; perímetro molhado médio $P_m = 0,26m$; parâmetros da equação de avanço $g = 0,0647m/min^h$ e $h = 1,4286$; parâmetros da equação de infiltração $k = 0,0035$ e $a = 0,78$. Clicando o botão Resultados obtém-se o comprimento do sulco $L = 80m$; o tempo de avanço $T_x = 34min$; o tempo de infiltração do volume requerido $T_r = 128min$; o tempo total de aplicação de água $T_a = 162min$ e os índices de desempenho como uniformidade de distribuição $U_d = 90,8\%$; eficiência de aplicação $E_a = 41,2\%$; eficiência de armazenamento $E_s = 100\%$; perdas por percolação $P_p = 4,2\%$ e perdas por escoamento $P_e = 54,7\%$.

O formulário Avaliação do Desempenho – Vazão Reduzida (Figura 8) apresenta um exemplo usando a sugestão de Bernardo (1995) de que o tempo de aplicação da vazão reduzida seja metade do tempo total de aplicação. Sendo assim, os parâmetros considerados são: comprimento do sulco $L = 80m$; vazão $Q_o = 0,81/s$; tempo total de aplicação de água $T_a = 162min$ e tempo de irrigação com vazão inicial $T_o = 81min$. Obtém-se,

então, uma tabela de valores para cálculo da vazão reduzida e, clicando o botão Resultados, obtém-se: vazão reduzida $Q_{red} = 0,391/s$; tempo de irrigação $c/vazão$ reduzida $T_{red} = 81min$; uniformidade de distribuição $U_d = 90,8\%$; eficiência de aplicação $E_a = 56,0\%$; eficiência de armazenamento $E_s = 100\%$; perdas por percolação $P_p = 5,7\%$ e perdas por escoamento $P_e = 38,3\%$.

Dados de Entrada

- Declividade (So): 0,8 (%)
- Vazão (Qo): 0,8 (l/s)
- Espaçamento entre sulcos (W): 0,8 (m)
- Lâmina requerida (Yr): 50 (mm)
- Perímetro Molhado Médio (Pm): 0,26 (m)

Equação de avanço: $tx = g \cdot x^b$

- Coefficiente g da Eq. de Avanço: 0,0647 (m²/min²)
- Exponente h da Eq. de Avanço: 1,4286

Equação de infiltração acumulada: $z = k \cdot t^a$

- Coefficiente k da Eq. de Infiltração: 0,0035 (m³/min²)
- Exponente a da Eq. de Infiltração: 0,78

Resultados

- Comprimento do Sulco (L): 30 (m)
- Tempo de Avanço (Tx): 34 (min)
- Tempo de Infiltração do volume requerido (Tr): 128 (min)
- Tempo Total de Aplicação de água (Ta): 162 (min)

Desempenho para Vazão Contínua

- Uniformidade de Distribuição (Ud): 90,8 (%)
- Eficiência de Aplicação (Ea): 41,2 (%)
- Eficiência de Armazenamento (Es): 100,0 (%)
- Perdas por percolação (Pp): 4,2 (%)
- Perda por escoamento (Pe): 54,7 (%)

Botões: CÁLCULO DA VAZÃO MÁXIMA NÃO EROSIVA, RESULTADOS, AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO PARA VAZÃO REDUZIDA

FIGURA 7. Exemplo do formulário Sulcos em Desnível

Dados

- Comprimento do Sulco (L): 30 (m)
- Vazão (Qo): 0,8 (l/s)
- Tempo Total de Aplicação de água (Ta): 162 (min)

Dados de Entrada

- Tempo de irrigação com vazão inicial (To): 81 (min)

Visualização da Tabela para Cálculo da Vazão Reduzida

x (m)	Tx (min)	Tred (min)	W (l/min por m)	V/m x 10m	V/loc
0	0,0000	81,0000	0,2639	0,0000	0,0000
10	1,7358	79,2642	0,2712	2,7059	2,7059
20	4,6726	76,3274	0,2735	2,7236	5,4295
30	8,3391	72,6609	0,2765	2,7498	8,1793
40	12,5779	68,4221	0,2802	2,7831	10,9624
50	17,3003	63,6997	0,2846	2,8237	13,7861
60	22,4477	58,5523	0,2899	2,8726	16,6597
70	27,9777	53,0223	0,2963	2,9312	19,5899
80	33,9576	47,1422	0,3041	3,0020	22,5918

Resultados

- Vazão Reduzida ($Q_{red} = V/loc / 60$): 0,38 (l/s)
- Tempo de irrigação c/ Vazão Reduzida ($T_{red} = Ta \cdot Qo / Q_{red}$): 81 (min)

Desempenho para Vazão Reduzida

- Uniformidade de Distribuição (Ud): 90,8 (%)
- Eficiência de Aplicação (Ea): 56,0 (%)
- Eficiência de Armazenamento (Es): 100,0 (%)
- Perdas por percolação (Pp): 5,7 (%)
- Perda por escoamento (Pe): 38,3 (%)

Botões: VISUALIZAÇÃO DA TABELA PARA CÁLCULO DA VAZÃO REDUZIDA, RESULTADOS

FIGURA 8. Exemplo do formulário de Avaliação do Desempenho – Vazão Reduzida

A opção Sulcos em Nível permite o acesso a um formulário que fornece resultados de dimensionamento como: altura da lâmina superficial, o tempo de infiltração da lâmina requerida, o tempo de avanço da água no sulco e o comprimento do sulco. O formulário Sulcos em Nível (Figura 9) apresenta um exemplo baseado em Frizzone (1993) com os seguintes valores de entrada: vazão $Q_o = 1l/s$; espaçamento entre sulcos $W = 0,8m$; lâmina requerida $Y_r = 50mm$; rugosidade $n = 0,04$; eficiência de aplicação requerida $E_a = 0,8$; parâmetros da equação de forma $c = 1,21m/m^m$ e $m = 0,51$ e parâmetros da equação de infiltração $k = 0,00482m/min^a$ e $a = 0,64$. Os resultados obtidos são: altura da lâmina superficial $y = 3,6cm$; tempo de infiltração da lâmina requerida $T_r = 290min$; tempo de avanço $T_x = 46min$ e comprimento do sulco $L = 246m$.

Dados de Entrada

- Vazão (Qo): 1 (l/s)
- Espaçamento entre sulcos (W): 0,8 (m)
- Lâmina requerida (Yr): 50 (mm)
- Rugosidade (n): 0,04
- Eficiência de Aplicação Requerida (Ea): 0,8

Equação de Forma do sulco: $B = c \cdot y^m$

- Coefficiente c da Eq. de Forma: 1,21 (m³/m³)
- Exponente m da Eq. de Forma: 0,51

Equação de infiltração acumulada: $z = k \cdot t^a$

- Coefficiente k da Eq. de Infiltração: 0,00482 (m³/min²)
- Coefficiente a da Eq. de Infiltração: 0,64

Resultados

- Altura da Lâmina Superficial (y): 3,6 (cm)
- Tempo de Infiltração da lâmina requerida (Tr): 290 (min)
- Tempo de Avanço (Tx): 46 (min)
- Comprimento do Sulco (L): 246 (m)

Botão: RESULTADOS

FIGURA 9. Exemplo do formulário Sulcos em Nível

4. CONCLUSÕES

O programa computacional Irriga Sulco auxilia técnicos na simulação do avanço e do dimensionamento em sistemas de irrigação por sulcos. As simulações que podem ser geradas conduzem a inúmeras alternativas de dimensionamento, a um custo e tempo reduzidos. O programa pode ser usado como um recurso

didático em disciplinas de irrigação. Seu caráter didático mostra-se na simplicidade do seu uso, nos vários gráficos gerados, no exemplo disponível em cada formulário e no arquivo de ajuda, que fornece a fundamentação teórica à cada parte do programa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ALAZBA, A. A. Explicit volume balance model solution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.125, n.5, 1999.

[2] BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 6ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657p.

[3] CARVALHO, J. M. de ;VIEIRA, R. C. S.; DANIEL, L. A. Determinação das características de avanço da água em sulcos de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002. Salvador/BA, *Anais...* Salvador: SBEA, 2002. 1 CD.

[4] FRIZZONE, J. A. *Irrigação por superfície*. Piracicaba: Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” — Universidade de São Paulo. 1993. 183p. (Série Didática, 005).

[5] SCALOPPI, E. J. Sistemas de irrigação por superfície. *Informe Agropecuário*, v.12, n.139, p.12-26, 1986.

[6] VALIANTZAS, J. D.; AGGELIDES, S.; SASSALOU, A. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, v.52, p.17-32, 2001.