

EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO EM SULCO COM REDUÇÃO DA VAZÃO INICIAL*

Salassier Bernardo
Morethson Resende
José Joaquim Araújo**

1. INTRODUÇÃO

O método de irrigação em sulco é um dos mais usados quando se trata de cultivos em fileiras. Adapta-se a quase todas as culturas e é, em geral, o método de irrigação de menor custo. A permeabilidade excessiva do solo e a topografia irregular constituem as principais limitações ao seu emprego.

Embora tendo apenas estas duas principais limitações, um projeto de irrigação em sulco, quando mal conduzido, pode levar o usuário a resultados desastrosos.

Excesso de irrigação resultará em perda de nutrientes por lixiviação, como também em perdas de água por percolação ou por «runoff», causando com isto baixo rendimento da cultura e baixa eficiência da irrigação.

Pequena vazão no sulco poderá acarretar excesso de infiltração no início do sulco e deficiência de infiltração no outro extremo, causando baixa uniformidade de distribuição, o que provocará desuniformidade de produção ao longo dos sulcos.

Segundo HANSEN (4), a baixa eficiência de distribuição d'água, ou sua inadequada aplicação em um campo de cultura, é, na maioria das vezes, a causa da baixa produtividade em algumas áreas irrigadas. Nenhum aspecto da eficiência de irrigação pode ser abandonado, para que se possa ter o máximo de rendimento na produção.

Na maioria das vezes, a irrigação com pequena ou nenhuma perda de água no final do sulco («runoff») resulta em grande perda por percolação, e, por isto, muitas vezes, a irrigação é projetada com alguma «runoff». Para minimizar a «runoff» em irrigação por sulco, a vazão inicial deve ser a maior possível, sem que cause erosão, devendo ser reduzida para valores menores após determinado tempo (7).

A redução da vazão inicial é largamente usada para obter melhor uniformidade de infiltração ao longo do sulco (8).

No Brasil, muito pouco se tem feito para a obtenção de dados experimentais para nossas condições, no que diz respeito à engenharia de irrigação. Este trabalho tem por objetivo determinar alguns parâmetros que permitam planejar irrigação em sulco de modo mais eficiente, a fim de elevar ao máximo os benefícios.

* Trabalho baseado na tese apresentada ao IPH da U.F.R.G.S., pelo segundo autor, como uma das exigências do Curso de Mestrado.

Recebido para publicação em 21-10-1976.

** Professor Adjunto, Técnico da EMBRAPA e Professor Assistente da Universidade Federal de Viçosa.

cios advindos de irrigação mais técnica, para um solo da localidade de Viçosa, Minas Gerais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado na «Horta do Fundão», pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, utilizando-se uma área de 100 m por 20 m, anteriormente sistematizada, com declividade de 1,5%, sendo classificada como argila pesada, com a seguinte composição textural: argila, 61%; silte, 15%; areia fina, 14%; e areia grossa, 10%.

Após o preparo do solo, foram abertos 20 sulcos com espaçamento de 1,0 m. Utilizando-se um nível de engenheiro, conferiu-se a declividade dos sulcos, os quais posteriormente foram piqueteados de 10 em 10 m (estações), para determinar os dados de avanço do fluxo.

Foram separados 5 grupos de 4 sulcos e usou-se vazão diferente para cada grupo. Os dados foram coletados nos dois sulcos centrais, ficando os dois laterais como bordaduras.

As vazões usadas foram de 0,40; 0,61; 0,88; 1,22; e 1,64 l/s.

Determinou-se a umidade do solo antes e 24 horas depois de cada irrigação, pelo método padrão de estufa, com amostras retiradas a 10, 20, 40, 60 e 100 cm de profundidade, em quatro pontos ao longo dos sulcos.

Antes de cada teste para infiltração foram instalados quatro WSC — Flume (Figura 1) (2), sendo dois no início e dois 40 m abaixo, nos dois sulcos centrais.

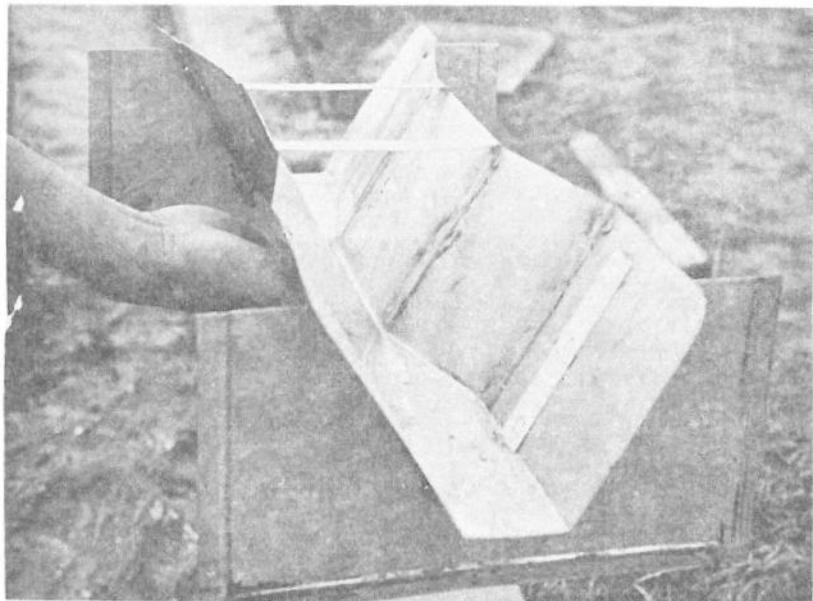


FIGURA 1 - WSC - Flume A, usado para medição da vazão nos sulcos.

O presente trabalho foi dividido em três etapas, no que diz respeito à coleta de dados. A primeira etapa consistiu em coletar dados de avanço de fluxo, em sulcos novos, com as cinco vazões, colocando-se, posteriormente, água em todos os sulcos para uniformizar a umidade da área experimental. Esperaram-se dez dias para coletar os dados da segunda etapa.

A segunda etapa consistiu em coletar dados em sulcos usados para avanço de fluxo, aumento de umidade no solo e velocidade de infiltração, sendo esta determinada pelo método de «entrada-saída» (1), usando-se as mesmas vazões. Em seguida, molharam-se novamente todos os sulcos para uniformizar a umidade do solo.

Na terceira e última etapa foram testadas as vazões de 0,61, 0,88 e 1,22 l/s. Após chegarem ao fim do sulco, os fluxos sofreram redução para 0,4 l/s. Foram coletados apenas os dados para determinação do perfil de molhamento, já que as velocidades de infiltração e os avanços de fluxo já tinham sido coletados na segunda etapa.

A metodologia para cálculo das eficiências foi baseada no trabalho de MERRIAN (6) e CRIDDLE *et alii* (3), isto é, de posse dos dados de velocidade de infiltração, foram estes plotados em papel log.log, 3 x 3 ciclos. Com estes dados foi determinada uma equação para a velocidade de infiltração. Integrando esta equação, obteve-se a equação da curva de infiltração acumulada, que também foi plotada em papel log.log, 3 x 3 ciclos.

O tempo de avanço do fluxo mais o tempo necessário para infiltrar a lâmina necessária no final do sulco representa o tempo que a água ficou no início do sulco (Ti), o que, pelo gráfico da infiltração acumulada, correspondeu a uma lâmina d'água aplicada no início do sulco (Li).

Os cálculos das eficiências a perdas de água foram feitos com base nas seguintes equações:

Eficiência de distribuição:

A eficiência de distribuição (Ed) foi calculada pela relação entre a lâmina aplicada no final do sulco e a média da lâmina final e inicial. Logo:

$$Ed = \frac{Lf}{(Li + Lf)/2} \times 100 \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

Ed = eficiência de distribuição (%)

Lf = lâmina infiltrada no final do sulco (mm)

Li = lâmina infiltrada no início do sulco (mm)

Eficiência de aplicação:

O cálculo da eficiência de aplicação (Ea) foi feito pela relação entre a lâmina aplicada no final do sulco e a lâmina média (Lm) aplicada no sulco.

A lâmina média aplicada no sulco foi calculada a partir do produto de tempo de aplicação de água no início do sulco (Ti) pela razão (Q) dividida pela área molhada ao longo do sulco, que, no presente trabalho, foi de 100 m². Logo:

$$Lm = \frac{Ti \times Q}{C \times E} \quad (\text{equação 2})$$

$$Ea = \frac{Lf}{Lm} \times 100 \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

Lm = lâmina média aplicada em cada sulco (mm)

Ti = tempo de aplicação d'água no início do sulco (s)

Q = vazão aplicada (l/s)

C = comprimento do sulco (m)

E = espaçamento entre sulcos (m)

O cálculo da eficiência de aplicação, quando se reduziu a vazão inicial, foi dado pelas seguintes equações:

$$L_m = \frac{(T_i - T_f) Q_i + T_f Q_r}{L \times C} \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

Q_i = vazão inicial (1/s)

Q_r = vazão reduzida (1/s)

Perdas de água por percolação:

Quando se desejar aplicar uma lâmina d'água ao solo, considerou-se percolação o excesso de água infiltrado além desta lâmina. Logo:

$$L_p = \frac{L_i + L_f}{2} - L_f \quad (\text{equação 5})$$

$$P_p = \frac{L_p}{L_m} \times 100 \quad (\text{equação 6})$$

Sendo:

L_p = lâmina percolada (mm)

P_p = % de água por percolação

Perdas de água por «runoff»:

Do total de água aplicada no sulco, certa quantidade ficou armazenada na zona do sistema radicular, outra parte se perdeu por percolação profunda e o restante foi a perda por «runoff» (P_r). Deve-se observar que não foram consideradas perdas de água por evaporação, infiltracão lateral de um sulco para outro, etc. As equações para o cálculo de P_r foram as seguintes:

$$L_r = L_m - L_f - L_p \quad (\text{equação 7})$$

$$P_r = \frac{L_r}{L_m} \times 100 \quad (\text{equação 8})$$

Sendo:

L_r = lâmina de «runoff» (mm)

P_r = % de água perdida por «runoff»

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Avanço de Água no Sulco

As Figuras 2 e 3 representam as curvas de avanço da água nos sulcos para as vazões testadas, em sulcos usados e novos, respectivamente. Observa-se que houve grande variação da velocidade de avanços entre os sulcos novos e usados. Esta variação pode ser atribuída à diferença das condições superficiais e estruturais entre o solo recém-preparado e o usado, principalmente no que diz respeito à velocidade de infiltracão. Nota-se também que, para os sulcos usados, todos os fluxos testados alcançaram o final dos sulcos (100 m) em tempo inferior a 150 min, o que não ocorreu nos sulcos novos para nenhuma vazão. Isso foi devido à alta velocidade de infiltracão nos sulcos novos, concordando com resultados de LYNDERMAN e STEGMAN (5).

3.2. Aumento de Umidade do Solo

As Figuras 4, 5, 6 e 7 mostram o aumento da umidade no perfil do solo, ao longo do sulco, 24 horas após cada irrigação, para vazões contínuas e com redu-

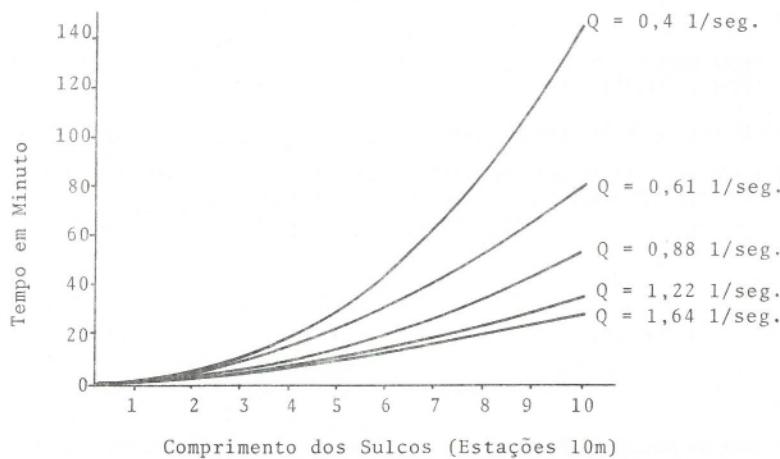


FIGURA 2 - Curvas de avanço de fluxo nos sulcos usados.

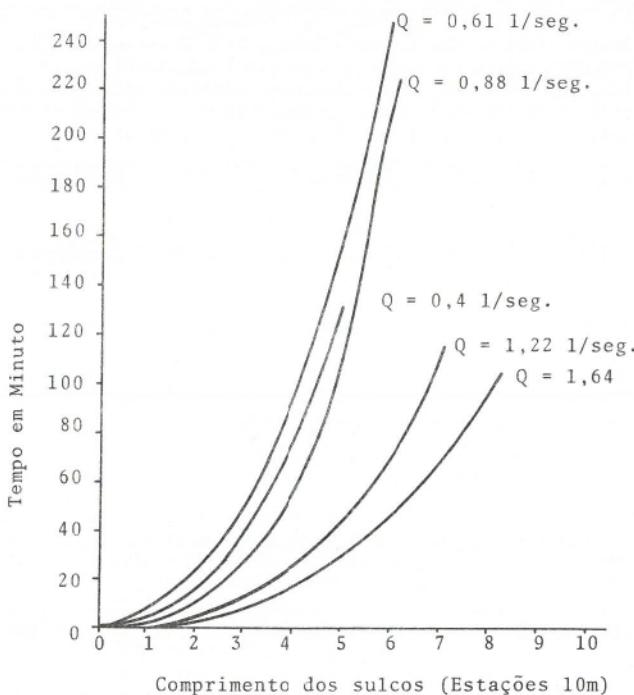


FIGURA 3 - Curvas de avanço de fluxo nos sulcos novos.

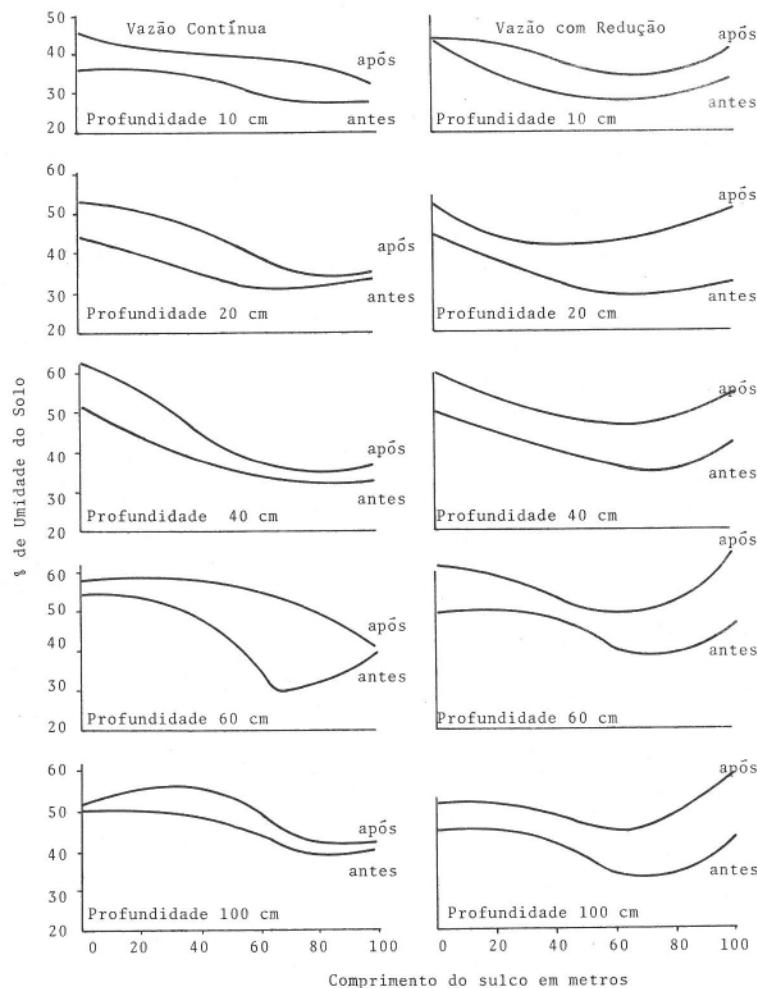


FIGURA 4 - Curvas de umidade d'água no solo antes e 24 horas após a irrigação, para $Q = 0,61 \text{ l/seg.}$

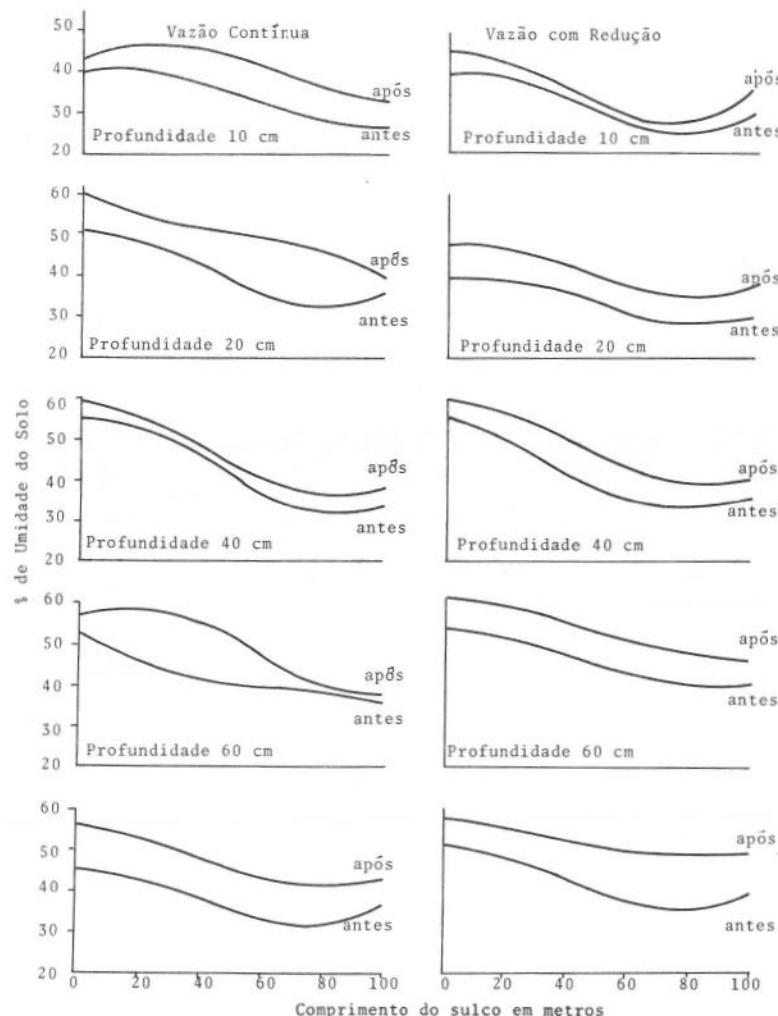


FIGURA 5 - Curvas de umidade d'água no solo antes e 24 horas após a irrigação, para $Q = 0,88 \text{ l/seg.}$

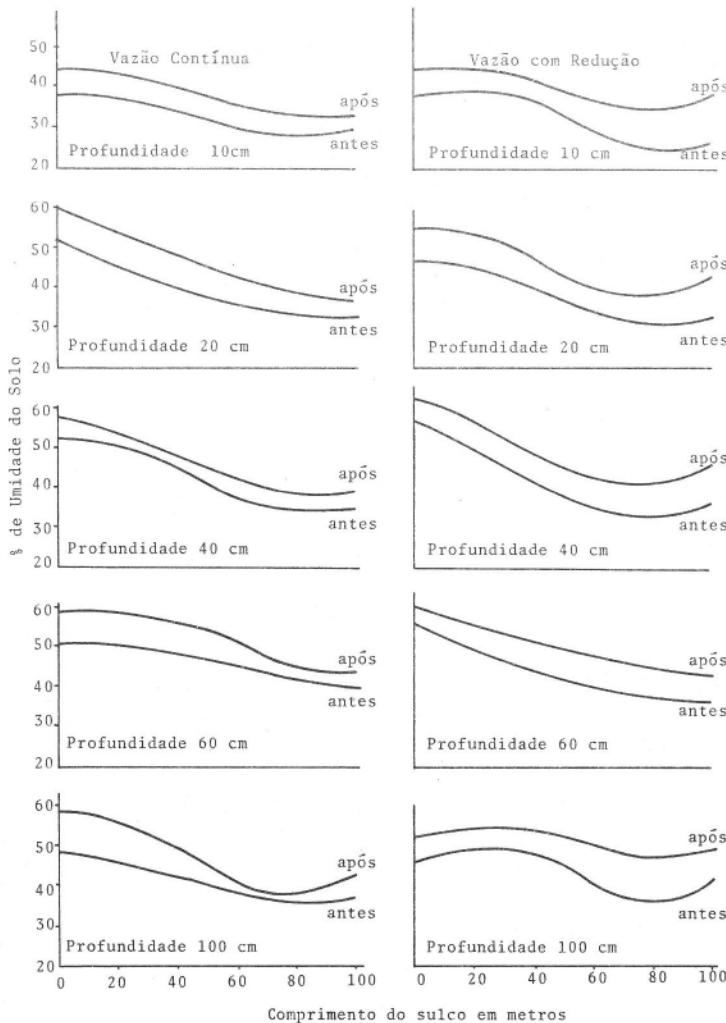


FIGURA 6 - Curvas de umidade d'água no solo antes e 24 horas após a irrigação, para $Q = 1,22 \text{ l/seg.}$

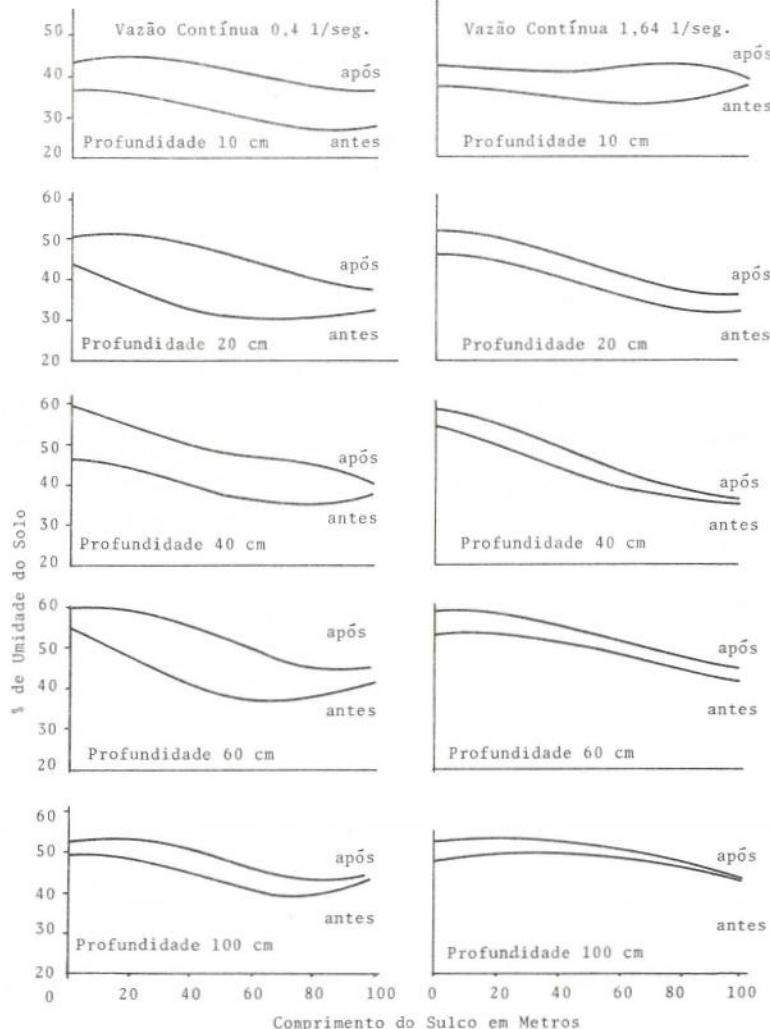


FIGURA 7 - Curvas de umidade d'água no solo antes e 24 horas após a irrigação, para $Q = 0,4 \text{ l/seg.}$ e $Q = 1,64 \text{ l/seg.}$

ção de vazão. Embora as lâminas d'água aplicadas no solo fossem diferentes, observa-se que, para vazões contínuas, o aumento de umidade no solo foi mais irregular do que quando se reduziu a vazão inicial.

Esta variação pode ser atribuída ao maior tempo para infiltração de uma mesma lâmina, quando se usa vazão reduzida, o que permite melhor redistribuição de água no perfil do solo.

3.3. Erosão

Ocorreu erosão quando foi usada a vazão de 1,64 l/s, sendo ela por isto eliminada dos cálculos. A maior vazão que não causou erosão apreciável no sulco foi a de 1,22 l/s. Segundo recomendações de CRIDDLE *et alii* (3), esta deveria ser a vazão inicial para uma posterior redução, mas no presente trabalho a-chou-se conveniente reduzir também as vazões de 0,88 e 0,61 l/s.

3.4. Infiltração

No Quadro 1 têm-se as equações de infiltração acumulada e de velocidade de infiltração para as vazões de 0,4, 0,61, 0,88 e 1,22 l/s.

QUADRO 1 - Equações de infiltração acumulada e velocidade de infiltração

Vazão (litro/s)	Infiltração acumulada (I) (litro por m sulco)	Velocidade de infiltração (VI) (litro/min por m sulco)
0,40	$I = 4,2 T^{0,5}$	$VI = 2,1 T^{-0,5}$
0,61	$I = 7,38 T^{0,42}$	$VI = 3,1 T^{-0,58}$
0,88	$I = 8,78 T^{0,41}$	$VI = 3,6 T^{-0,59}$
1,22	$I = 11,35 T^{0,37}$	$VI = 4,2 T^{-0,63}$

Usando uma vazão contínua de 0,61 l/s para aplicar uma lâmina d'água de 50 mm no final do sulco, de acordo com a equação do Quadro 1, necessita-se de um tempo de oportunidade de 95 minutos, que deverá ser o tempo de oportunidade no final do sulco (T_f), como o tempo necessário para que o fluxo chegasse ao final do sulco (100 m), de acordo com a Figura 2, foi de 81 minutos. O tempo de oportunidade de infiltração no início do sulco (T_i) foi de 176 minutos, correspondendo a uma lâmina infiltrada no início do sulco de $Li = 65$ mm, conforme mostra o esquema A da Figura 8.

Usando redução de vazão para 0,4 l/s, após ter o fluxo atingido o final do sulco, para infiltração de 50 mm, o tempo de oportunidade foi $T_f = 142$ min, como o tempo de avanço até o final do sulco (100 m) com a vazão de 0,61 l/s foi de 81 min. Assim, no início do sulco, $T_i = 223$ min, sendo que nos primeiros 81 min a infiltração ocorreu com uma vazão de 0,61 l/s, correspondendo à infiltração de uma lâmina de 47 mm. Os 142 minutos restantes, com a vazão de 0,4 l/s, correspondem à infiltração, no

início do sulco, de 25 mm (62,7 – 37,8), totalizando, assim, $Li = 72\text{ mm} (25 + 47)$, esquema B da Figura 8.

Pelo mesmo esquema, determinaram-se Ti , Li , Tf e Lf , para uma aplicação de 100 mm, com vazão de 0,61 l/s, sem e com redução. Para aplicação de 50 e 100 mm, com vazões de 0,88 l/s e 1,22 l/s, com e sem redução de vazão, respectivamente, nos esquemas C e D, Figura 8; esquemas A, B, C, e D das Figuras 9 e 10.

3.5. Eficiência de Irrigação

Usando as equações 1, 3, 6 e 8 e os dados das Figuras 8, 9 e 10, determinaram-se a eficiência de distribuição (Ed), a eficiência de aplicação (Ea), a percentagem percolada (Pp), e a percentagem de «runoff» (Pr), para as vazões de 0,61 l/s, 0,88 l/s e 1,22 l/s, com e sem redução da vazão inicial, conforme mostra o Quadro 2.

Observa-se que, quando não se fez redução de vazão, a eficiência de distribuição (Ed) aumentou com o aumento da vazão, bem como com o aumento da lámina d'água aplicada. Quando se aumentou a vazão, a velocidade de avanço do fluxo foi maior, diminuindo a diferença de tempo de oportunidade para infiltração entre o início e o fim do sulco. Quando se aumentou a lámina aplicada, aumentou-se o tempo necessário para infiltração, mas, como a velocidade de infiltração diminui com o tempo, a diferença de tempo de oportunidade para infiltração no início e no fim do sulco (tempo de avanço) causa menor diferença de lámina infiltrada. A eficiência de distribuição diminuiu um pouco quando se fez redução da vazão inicial, sem ser influenciada, porém, pela redução da vazão inicial.

A eficiência de aplicação diminuiu muito quando se aumentou a lámina aplicada e não se fez redução de vazão. Isto foi devido ao aumento da percentagem de «runoff» com o aumento da lámina aplicada. Mas, quando se fez a redução de vazão, a eficiência de aplicação aumentou muito, principalmente para as maiores láminas de irrigação. Isto por se obterem menores percentagens de «runoff» quando se fez redução de vazão.

A decisão de reduzir ou não uma vazão inicial dependerá da lámina d'água a ser aplicada, da vazão inicial disponível e do tipo de perda de água, se por percolação ou por «runoff».

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, visando determinar as eficiências para um sistema de irrigação em sulcos, com vazões contínuas e reduzidas.

Foram estudadas as vazões de 0,40, 0,61, 0,88, 1,22 e 1,64 l/s. Esta última foi eliminada dos cálculos em razão da grande erosão que causou nos sulcos. Foram estudadas sob a forma de irrigação, sem e com redução da vazão, para 0,4 l/s, quando alcançavam o final do sulco.

Foi determinada a velocidade de infiltração em 40 m dos 100 m do sulco, pelo processo de «entrada e saída», usando-se WSC flumes n.º 1 como medidores das vazões nos sulcos.

A umidade do solo antes, 24 horas depois de cada irrigação, foi determinada pelo processo padrão de estufa, em profundidade de 10, 20, 40, 60 e 100 cm, em 4 pontos ao longo do sulco.

Os dados de velocidade de avanço do fluxo foram obtidos através de estações de 10 em 10 m ao longo do sulco, e as equações de infiltração d'água no solo foram determinadas pelo processo log-log.

Os resultados obtidos permitem tirar as seguintes conclusões:

1. A velocidade de infiltração em sulcos novos foi maior que em sulcos usados.
2. O aumento de umidade no solo até a profundidade de 100 cm tendeu a ser mais uniforme para vazões com redução do que para vazões contínuas.
3. Para uma mesma vazão, menor perda por «runoff» causou maior perda

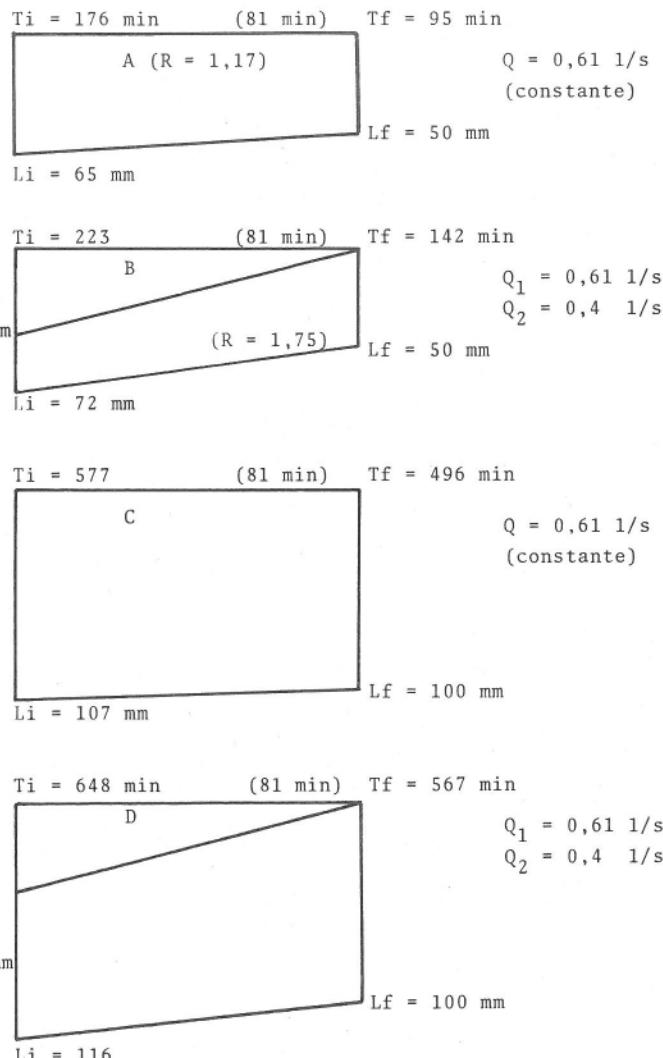


FIGURA 8 - Aplicação de 50 e 100 mm de irrigação, com e sem redução de vazão, esquemas A, B, C e D, respectivamente.

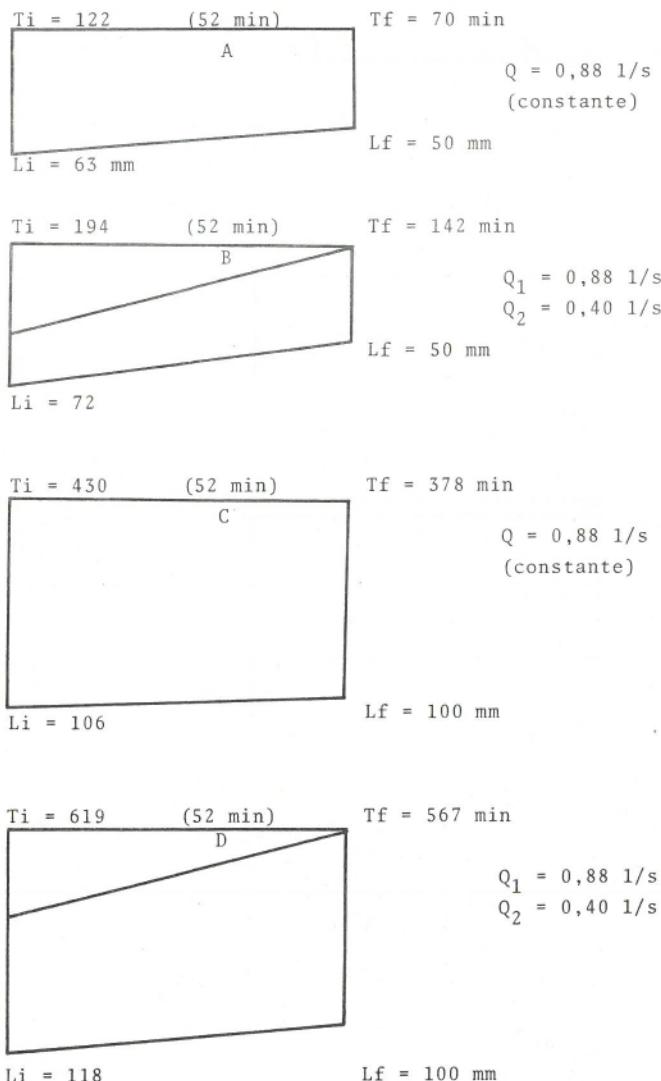


FIGURA 9 - Aplicação de 50 e 100 mm de irrigação, com e sem redução de vazão, esquemas A, B, C e D, respectivamente.

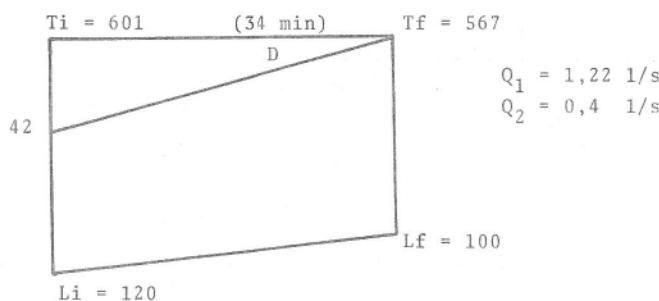
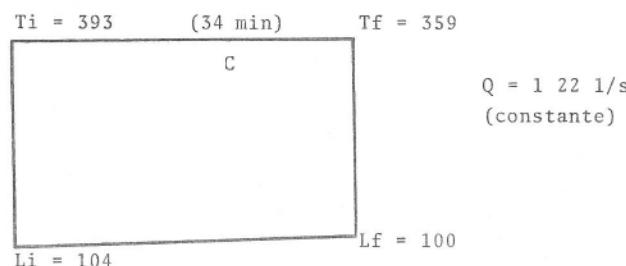
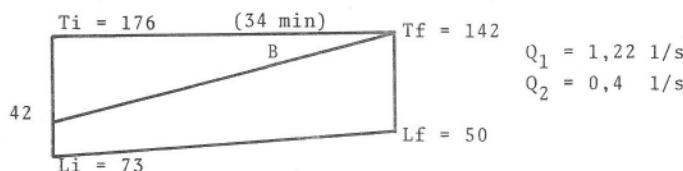
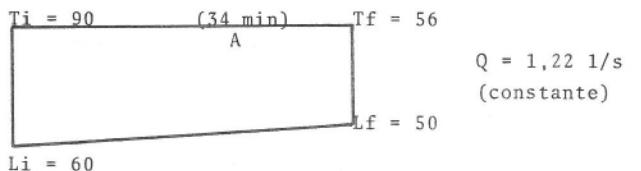


FIGURA 10 - Aplicação de 50 e 100 mm de irrigação, com e sem redução de vazão, esquemas A, B, C e D, respectivamente.

QUADRO 2 - Eficiências de distribuição, aplicação e percentagem de percolação e de "Runoff", para vazões de 0,61, 0,88 e 1,22 l/s, com e sem redução de vazão.

Vazão (l/s)	Lâmina aplicada (mm)	Ed (%)			Ea (%)	Pp (%)	Pr (%)		
		S/Redução	C/Redução	S/Redução					
0,61	50	87	82	78	78	12	17	10	5
	100	97	93	47	60	2	5	51	37
0,88	50	89	82	78	81	10	18	12	0,9
	100	97	92	44	61	1	6	55	33
1,22	50	91	81	76	85	8	20	12	-
	100	98	91	35	63	0,7	6,2	65	32

por percolação.

4. As eficiências de distribuição (Ed), e de aplicação (Ea), e as percentagens percoladas (Pp), e de «runoff» (Pr) foram influenciadas pela quantidade d'água aplicada, pela vazão inicial e pelo método de irrigação.

5. A eficiência de distribuição (Ed) aumentou com o aumento do fluxo inicial quando não se fez redução da vazão inicial.

6. À medida que aumenta a lámina aplicada por irrigação, maior o efeito da redução da vazão inicial no aumento das eficiências.

7. Para o local do teste, para aplicar uma lámina de 100 mm, com qualquer uma das vazões, deve-se fazer redução da vazão inicial.

5. SUMMARY

The objective of this study was to determine the efficiency of furrow irrigation with constant and cut-back flow rates.

Flow rates of 0.4, 0.61, 0.88 and 1.22 l/sec. were used under and with cut-back flow to 0.4 l/sec.

The following conclusions were reached:

1 The infiltration rate in a new furrow was greater than in used ones.

2 The increase in soil water to a depth of 100 cm was more uniform under cut-back than under constant flow.

3. Under the same flow rate, a decrease in runoff caused an increase in deep percolation.

4. The distribution efficiency (Ed), the application efficiency (Ea), the percolation percent (Pp) and the runoff percent (Pr) were affected by the irrigation method, depth of application and the initial flow rate.

5. The distribution efficiency increased with the increase in flow rate the constant flow rate system.

6. The effect of the cut-back system on efficiencies increased with the depth of application.

7. To apply water to a depth of 100 mm at the experimental site, with any one of the flow rates, the cut-back system is preferred.

6. LITERATURA CITADA

1. BERNARDO, S. *Água no Solo*. Viçosa, U.F.V. Imprensa Universitária, 1972. 26 p.
2. BERNARDO, S., FERREIRA, P.A. & SILVA, S.J. *Medições d'água em sulco de irrigação*. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária, 1971. Boletim Técnico, 30. 18 p.
3. CRIDDLE, W.D., DAVIS, S. & PAIR, C.H. *Methods for evaluating irrigation systems*. Washington, Soil Conservation Science, 1956. (Agricultural Handbook, 82)
4. HANSEN, V.E. Water storage efficiency. *J. Agric. Engng.*, 34(2):835-836. 1953. 8 p.
5. LIDERMAN, C. & STEGMAN, E.C. Seasonal variation of hidraulic parameters and their influence upon surface irrigation application efficiency. *Trans. ASAE* 14(5):914-918, 1971.

6. MERRIAN, J.L. *Irrigation system evaluation and improvement*. California, Blake Printery, 1968. 57 p.
7. RADLEY, L. & PANDYA, A. Furrow irrigation with decreasing inflow rate. *J. Irrig. Drainage Div.* 96(4):451-460. 1970.
8. WOODWARD, G. Scheduling furrow irrigation for practical farm operation. *Trans. ASAE*, 71:731-733. 1971.