

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE INFILTRAÇÃO EM SULCOS¹

FÁTIMA DA CONCEIÇÃO REZENDE² e EDMAR JOSÉ SCALOPPI³

RESUMO - Avaliam-se experimentalmente as características de infiltração de água em sulcos utilizando-se os métodos baseados na equação de balanço volumétrico e o método baseado na determinação da vazão de entrada e saída em um segmento de sulco. A avaliação dos métodos foi efetuada através de um balanço de volume ao final do período do teste, utilizando-se as equações de infiltração obtidas em cada método, e comparando o volume de água infiltrada ao volume determinado com a utilização dos dados obtidos no teste de infiltração. Os resultados revelaram pequenas diferenças entre os métodos utilizados, excetuados os obtidos pelo método baseado na determinação da vazão infiltrada, através da diferença entre as vazões de entrada e saída em um segmento do sulco. Neste caso, o volume de água infiltrado, calculado através da equação obtida por este método, foi cerca de 24% superior ao determinado.

Termos para indexação: irrigação por sulcos, avaliação da infiltração.

EVALUATION OF METHODS FOR DETERMINING FURROW INFILTRATION CHARACTERISTICS

ABSTRACT - Furrow infiltration characteristics were evaluated by four methods based on the volume balance equation and the widely used inflow-outflow method. The methods were evaluated by performing a balance of volume using the calculated infiltration equations obtained by each method, and comparing the results to that determined by the infiltration test data. The results obtained revealed little differences among the methods based on the rate of advance data. The inflow-outflow method overestimated the infiltrated volume of water by 24% of that determined from test data.

Index terms: furrow irrigation, infiltration evaluation.

INTRODUÇÃO

As características da infiltração da água no solo constituem um dos principais parâmetros requeridos no dimensionamento, operação, manejo e avaliação de sistemas de irrigação superficial. Em um trabalho resumindo três anos de avaliações de sistemas de irrigação por sulcos de infiltração no Colorado, Ley & Clyma (1981) concluíram que os fazendeiros parecem não estar conscientes dos efeitos da redução da razão de infiltração na quantidade de água armazenada na zona radicular.

A infiltração é um fenômeno complexo, dependente de inúmeras variáveis, relacionadas às características físicas e morfológicas do solo, e apresentando uma dependência especial do teor de água no perfil e à condição da superfície. Esta, por sua vez, é afetada pela geometria da seção de escoamento e pelo fluxo superficial, que determinam a condição física e a grandeza da área de infiltração.

Trabalhando em um modelo para predição do desempenho geral de um sistema de irrigação por sulcos, Karmeli et al. (1978) concluíram que o estabelecimento de uma função representativa de infiltração constituiu o fator mais difícil de ser avaliado e que afeta a qualidade da irrigação. Seus estudos indicaram que a infiltração deve ser estabelecida através de métodos que consideram o perímetro molhado aproximado durante a irrigação.

Alguns métodos simples empregados na determinação das características de infiltração, como o cilindro infiltrômetro simples (Richards 1954) ou duplo (Bouwer 1961), sulco infiltrômetro (Bondurant 1957) e sulco infiltrômetro "by-pass" (Shull 1961), efetivamente não representam as condições de fluxo superficial, nas quais a irrigação se desenvolve. Tem sido demonstrado que o fluxo superficial em sulcos ou faixas está associado ao transporte e reorientação de partículas de solo, que modificam sua condição superficial e alteram as características de infiltração.

Os métodos que reproduzem as condições nas

¹ Aceito para publicação em 4 de janeiro de 1985.

² Eng.^a - Agrícola, Centro Nacional de Engenharia Agrícola - MA, Fazenda Ipanema, CEP 18100 Sorocaba, SP.

³ Eng. - Agr., M.Sc., Dr., Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu, CEP 18600 Botucatu, SP.

quais a irrigação se desenvolve devem ser preferíveis em relação aos anteriores, conforme tem sido recomendado por Criddle et al. (1956), Davis & Fry (1963), Norum & Gray (1970), Singh & Chauhan (1973), Roth et al. (1974) e Karmeli et al. (1978).

Davis & Fry (1963) avaliaram experimentalmente quatro métodos para determinação da infiltração: cilindro infiltrômetro, sulco infiltrômetro, entrada e saída de água em um segmento do sulco e balanço volumétrico durante a fase de avanço. Os resultados obtidos permitiram concluir que o último foi mais preciso que os demais.

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a representatividade das equações de infiltração obtidas através de alguns métodos baseados na equação de balanço volumétrico, durante a fase de avanço da água no sulco e, do método da diferença entre as vazões de entrada e saída em um segmento do sulco.

MATERIAL E MÉTODOS

O teste de infiltração a que se refere este trabalho foi desenvolvido no Campo Experimental de Irrigação Superficial existente no Centro Nacional de Engenharia Agrícola, Fazenda Ipanema, Sorocaba, SP.

A área experimental tem sido anualmente cultivada com milho, adotando-se um esquema de preparo de solo através de enxada rotativa, e aplicando-se uma adubação básica na semeadura à razão de 300 kg/ha da fórmula 4-14-8 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. O solo apresenta uma textura com características da classe argila. A massa específica aparente, determinada a três profundidades, utilizando-se o cilindro amostrador de Uhland, revelou os valores de 1,33, 1,39 e 1,26 g/cm³, nas camadas 0 cm - 20 cm, 20 cm - 40 cm e 40 cm - 60 cm de profundidade.

O teor médio de água no solo, determinado em amostras gravimétricas, imediatamente antes e um dia após o teste, revelou os valores anotados na Tabela 1.

Para desenvolver o teste de infiltração, foram selecionados três sulcos paralelos e adjacentes, sendo que os dois externos tiveram um efeito de bordadura. Os sulcos foram obtidos utilizando-se sulcadores tracionados mecanicamente, assegurando uma satisfatória uniformidade de forma e dimensões, em toda sua extensão. O comprimento adotado foi 120 m, e o espaçamento entre os sulcos, 0,80 m. A declividade na direção do escoamento foi considerada uniforme, assumindo um valor médio de 0,14%. A vazão derivada aos sulcos foi mantida constante durante todo o período de aplicação de água, assumindo um valor de 0,40 l/s.

TABELA 1. Teor volumétrico médio de água no solo.

Profundidade cm	Antes do teste cm ³ /cm ³	Após o teste cm ³ /cm ³
0 - 20	0,2638	0,3583
20 - 40	0,2831	0,3693
40 - 60	0,2973	0,3486

Especialmente para o método de Criddle et al. (1956), o teste de infiltração foi desenvolvido em um segmento de um sulco adjacente, tendo 20 m de comprimento, entre o ponto de derivação de água e o ponto de determinação da vazão de saída. A vazão de entrada foi mantida constante durante o teste, sendo igual a 0,32 l/s e a vazão de saída calculada pelo método direto, através da determinação do volume coletado em função do tempo.

Com a finalidade de se determinar a equação de avanço da água no sulco e alguns elementos geométricos da seção de escoamento, a cada incremento de avanço da frente de molhamento, foram definidas estações de medição, desde o ponto de derivação de água, a cada 10 m até o final do sulco.

Utilizando um perfilômetro (Fig. 1), efetuou-se a determinação dos elementos geométricos da seção transversal do sulco em cada estação. Com estes dados, estabe-

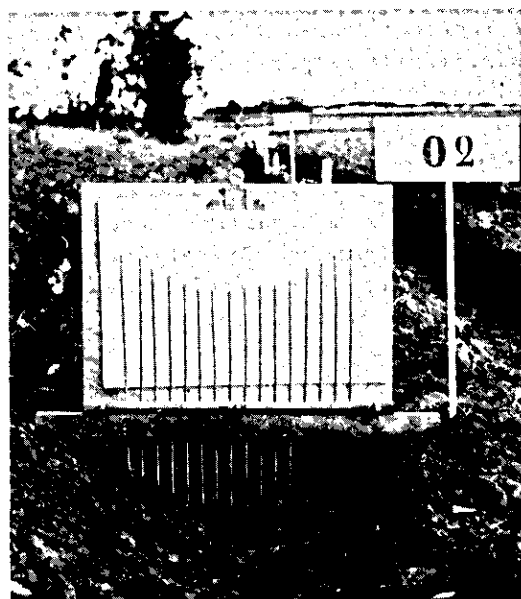


FIG. 1. Perfilômetro empregado na determinação dos elementos geométricos da seção transversal dos sulcos.

leceu-se uma relação entre a altura da lâmina, medida no centro geométrico da seção transversal do sulco, e a largura da superfície do fluxo correspondente. Estes dados foram ajustados através de regressão linear, obtendo-se um monômio de forma:

$$B = \alpha y^\beta \quad (1)$$

onde B = largura da superfície do fluxo, cm, y = altura da lâmina líquida, cm, α e β , coeficiente e expoente empíricos, respectivamente.

Reconhecendo-se que $B = dA/dy$, onde A = área da seção transversal de escoamento, pode-se facilmente chegar à expressão:

$$A = \alpha y^{\beta + 1} / (\beta + 1) \quad (2)$$

Para atender às exigências dos métodos baseados na fase de avanço da água nos sulcos, os dados de avanço da lâmina líquida em cada estação foram ajustados à uma expressão monomial de forma:

$$s = f t^h \quad (3)$$

onde s = distância de avanço correspondente ao tempo t, f e h = constantes empíricas.

A bem conhecida equação de Kostikov-Lewis foi escolhida para representar o processo de infiltração

$$z = k \tau^a \quad (4)$$

onde z = lâmina infiltrada no tempo de oportunidade τ , k e a = parâmetros determinados de acordo com cada método proposto.

Os métodos para determinação dos parâmetros da equação de infiltração, utilizados neste trabalho, foram aqueles propostos por Criddle et al. (1956), Christiansen et al. (1966), Gilley (1968), e Singh & Chauhan (1973). Para comparar os resultados, procedeu-se à determinação do volume de água infiltrado, a cada incremento de distância de avanço, até a água atingir o final do sulco, através do cálculo de um balanço volumétrico. Neste cálculo, determinou-se a área da seção transversal do fluxo em todas as estações compreendidas pela distância de avanço correspondente, obtendo-se um valor médio, que, multiplicado pela respectiva distância de avanço, fornece o volume de água superficial. Subtraindo-se este volume daquele aplicado, obtém-se o volume de água infiltrado em toda a extensão do avanço.

O valor do coeficiente angular obtido pela aplicação de uma análise de regressão aos logaritmos dos dados de lâminas médias infiltradas em função do tempo, representa o expoente da equação de infiltração tipo Kostikov-Lewis, tanto para o método de Christiansen et al. (1966) como para o de Singh & Chauhan (1973). O valor do coeficiente k da equação de infiltração é calculado a partir do coeficiente linear da regressão, levando-se em consi-

deração os fatores de forma para a lâmina infiltrada (σz) relativos a cada método considerado. Assim, no caso do método de Christiansen et al. (1966) o fator de forma é computado pela expressão:

$$\sigma z = F/(a + 1) \quad (5)$$

onde o valor de F pode ser estimado por

$$F = \frac{(a - 1) - h(a - 1) + 2}{h + 1} \quad (6)$$

sendo que h = expoente da equação de avanço conforme estabelecido na eq. (3).

Para o método de Singh & Chauhan (1973), o fator de forma σz é dado pela equação

$$\sigma z = \Gamma(h + 1) \Gamma(2 - h) \quad (7)$$

onde Γ = símbolo da Função Gama.

O método de Gilley (1968) baseia-se na análise de regressão linear aplicada aos logaritmos dos dados dos volumes infiltrados em função do tempo. Neste caso, o fator de forma para o volume infiltrado será dado por:

$$\sigma z = \frac{\Gamma(h + 1) \Gamma(a + 1)}{(h + a) \Gamma(h + a)} \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos durante o teste de infiltração estão anotados na Tabela 2.

Aplicando-se análise de regressão linear aos dados de avanço em função do tempo, obteve-se a seguinte equação:

$$s = 8,362 t^{0,552} \quad r^2 = 0,992$$

onde s = distância de avanço, em metros, e t = tempo correspondente, em minutos.

Nos cálculos das áreas infiltradas por qualquer um dos métodos utilizados no presente trabalho, assumiu-se o perímetro molhado como largura característica, por constituir uma variável em função da distância de avanço. O mesmo não aconteceria caso o espaçamento entre sulcos fosse assumido como largura característica. Dessa maneira, a área infiltrada em qualquer estação foi determinada em função do tempo de oportunidade para infiltração, bem como do perímetro molhado médio no intervalo de tempo considerado.

A análise de regressão aplicada aos logaritmos

dos dados de lâmina média infiltrada em função do tempo resultou nos valores de 1,1335 para o coeficiente linear e 0,38 para o angular, com um coeficiente de correlação $r = 0,98$. O valor do coeficiente angular obtido representa o expoente da equação de infiltração tipo Kostiakov-Lewis (a), para os Métodos de Christiansen et al. (1966) e Singh & Chauhan (1973). Para o cálculo do valor de k, tornou-se necessário a determinação dos fatores de forma para a lâmina infiltrada (σz), conforme estabelecem as eq. (5) e (7). Assim, substituindo-se os valores de a e h obtidos na eq. (6), obtve-se para F um valor de 1,11, resultando para σz uma valor de 0,804. O valor de k calculado pelo método de Christiansen et al. (1966) assumiu então o valor de 1,41 cm/min^a .

Para o método de Singh & Chauhan (1973) o fator de forma calculado pela eq. (7) foi 0,787. Procedendo-se como no método anterior, o coeficiente k da equação de Kostiakov-Lewis assumiu o valor de 1,44 cm/min^a .

O procedimento adotado conforme estabelece o método de Gilley (1968) resultou na obtenção de $\sigma z = 0,766$, e os parâmetros k e a, respectivamente iguais a 0,885 cm/min^a e 0,514.

Os valores dos parâmetros da equação de infiltração, k e a, obtidos pelos quatro métodos utilizados neste trabalho, estão resumidos na Tabela 3.

Substituindo-se os tempos de oportunidade para infiltração observados em cada estação nestas equações, obtêm-se as lâminas médias infiltradas correspondentes, conforme representado na Fig. 2.

Multiplicando-se as lâminas médias infiltradas pelos valores dos perímetros molhados médios em função do tempo, em cada estação, determinam-se as áreas infiltradas nos tempos de infiltração correspondentes.

O produto da área infiltrada média pela distância total de avanço fornece o volume total de infiltrado. Comparando-se os volumes infiltrados obtidos pelos quatro métodos referidos com aquele calculado, pode-se avaliar a validade de cada equa-

TABELA 2. Dados obtidos durante o teste de infiltração.

Dist. m	Tempo min.	Per. molh. médio dm	Área seção transv. méd. cm^2	Vol. aplic. dm^3	Vol. sup. dm^3	Vol. inf. dm^3	Lâm. méd. infiltr. cm
120	0	-	-	-	-	-	-
110	1	1,26	11,31	24	11,3	12,7	1,01
100	7	1,95	26,23	168	52,5	115,5	2,96
90	12	2,15	25,85	288	77,5	210,5	3,26
80	18	2,51	29,11	432	116,4	315,6	3,14
70	27	2,37	40,93	648	204,7	443,3	3,74
60	38	2,40	42,80	912	256,8	655,2	4,55
50	45	2,33	46,64	1.080	326,4	753,6	4,62
40	59	2,44	51,72	1.416	413,8	1.002,2	5,13
30	69	2,46	49,66	1.656	446,9	1.209,1	5,46
20	83	2,50	48,92	1.992	489,2	1.502,8	6,01
10	100	2,55	49,37	2.400	543,0	1.857,0	6,62
0	111	2,50	46,06	2.664	552,7	2.111,3	7,04

TABELA 3. Valores do coeficiente (k) e do expoente (a) da equação de infiltração tipo Kostiakov-Lewis, obtidos de acordo com a metodologia proposta pelos autores especificados.

Métodos	Criddle et al. (1956)	Christiansen et al. (1966)	Gilley (1968)	Singh & Chauhan (1973)
k (cm/min^a)	2,405	1,410	0,885	1,440
a	0,324	0,380	0,514	0,380

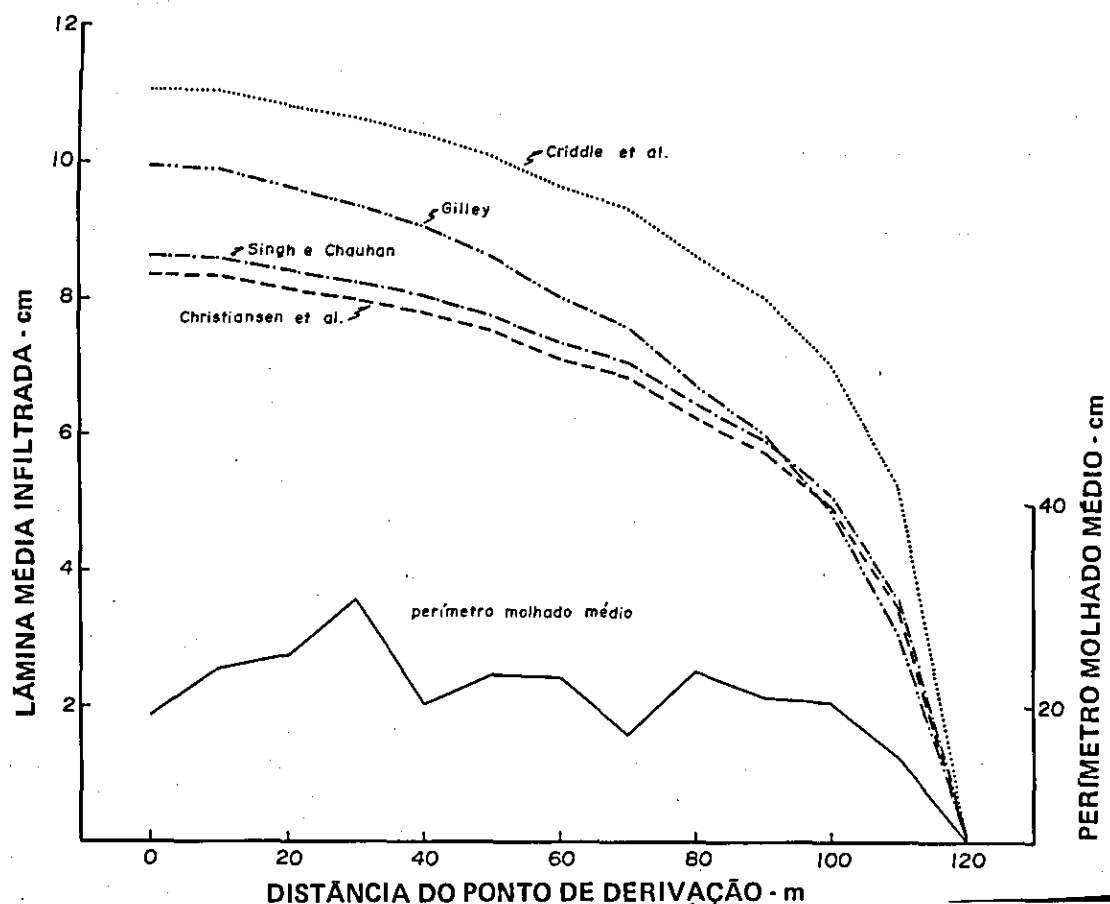


FIG. 2. Lâminas médias infiltradas em cada estação ao final da fase de avanço, calculadas pelas equações obtidas utilizando-se a metodologia proposta pelos respectivos autores.

ção para representar o processo de infiltração, através de uma equação do tipo Kostiakov-Lewis. Os resultados estão anotados na Tabela 4.

Conforme pode ser observado, o método de Gilley (1968) forneceu os resultados mais precisos. Também não foram observadas variações significativas entre os valores calculados e aqueles estimados pelo método de Singh & Chauhan (1973). O método de Christiansen et al. (1966) proporcionou resultados um pouco inferiores aos calculados, mas ainda considerados aceitáveis. Por outro lado, o método de Criddle et al. (1956), baseado em determinações de vazão de entrada e saída em um segmento do sulco, superestimou significativamente a quantidade de água infiltrada. Este resultado reforça a recomendação de que a infiltração não de-

ve ser avaliada considerando-se apenas um segmento reduzido do comprimento total do sulco, principalmente em condições de variabilidade espacial do solo. Além disso, a determinação efetiva da infiltração inicia-se somente após a água ter atingido a saída do segmento de controle do sulco, o que geralmente demora algum tempo, o suficiente para introduzir erros significativos nos valores dos parâmetros da equação de infiltração obtida. Outra limitação é que o método não considera a variação do volume de água superficial entre duas determinações sucessivas de vazão. Assim, os acréscimos do volume de água armazenado temporariamente na superfície do solo, notadamente durante a fase inicial do teste, e mesmo eventuais decréscimos, devidos à possível redução da vazão na entrada do

TABELA 4. Volumes infiltrados, determinados e calculados pelos quatro métodos analisados ao final da fase de avanço da água no sulco.

Métodos	Calculado	Criddle et al. (1956)	Christiansen et al. (1966)	Gilley (1968)	Singh & Chauhan (1973)
Vol. inf. - dm ³	2.111,3	2.620,0	1.939,1	2.194,6	2.000,8
Erro - %	0,0	+ 24,1	-8,2	+ 3,9	-5,2

segmento de controle do sulco, são atribuídos à infiltração. Este comportamento proporcionaria lâminas infiltradas superiores àquelas efetivamente observadas, notadamente nos períodos iniciais do teste de infiltração. Davis & Fry (1963) consideraram também o efeito bloqueador que um medidor de vazão, instalado na saída do segmento de controle do sulco pode apresentar, proporcionando uma lâmina superficial superior àquela observada em condições de fluxo livre.

Apesar de proporcionarem resultados finais essencialmente aproximados, pode-se observar uma particularidade interessante entre os métodos de Christiansen et al. (1966) ou de Singh & Chauhan (1973) e o método de Gilley (1968). Em virtude de os parâmetros da equação de infiltração revelarem valores bem distintos entre esses métodos, observa-se que essas diferenças refletiram-se nos valores de lâminas infiltradas calculadas em cada estação. Assim, para maiores tempos de infiltração, o método de Gilley proporcionou lâminas infiltradas significativamente superiores aos outros dois métodos (Tabela 4). Por outro lado, à medida que o tempo para infiltração foi sendo reduzido, nas estações mais distantes do ponto de derivação de água, o método de Gilley (1968) resultou em valores de lâminas infiltradas inferiores aos métodos de Christiansen et al. (1966) e Singh & Chauhan (1973), conforme se pode verificar na Tabela 3.

O fato de se ter obtido parâmetros da equação de infiltração diferentes, em função do método de determinação utilizado, vem reforçar a tese que as características de infiltração de um solo, para fins de dimensionamento de sistema de irrigação superficial, não podem ser baseadas apenas no expoente da equação de infiltração obtida. Conforme ficou demonstrado, tanto o coeficiente como o próprio expoente caracterizam a infiltração da água no solo, pelo menos durante os pe-

ríodos de aplicação de água que prevalecem na prática de irrigação.

CONCLUSÕES

1. As características de infiltração da água em sulcos podem ser adequadamente representadas por uma equação do tipo Kostikov-Lewis, cujos parâmetros foram calculados por três métodos de balanço volumétrico, baseados na razão de avanço da água no sulco.

2. O método de Gilley (1968) revelou-se como o mais preciso, apresentando pequenas diferenças em relação ao método de Singh & Chauhan (1973) e o de Christiansen et al. (1966).

3. O método baseado na determinação da vazão infiltrada através das diferenças entre as vazões de entrada e saída em um segmento do sulco, proposto por Criddle et al. (1956), não parece fornecer parâmetros que representem satisfatoriamente o processo de infiltração. O erro no cálculo do volume infiltrado obtido ao final do período de avanço foi de 24%, reforçando a tese de que este método geralmente superestima a quantidade de água infiltrada.

4. Ficou caracterizado que, apesar de os métodos baseados no avanço da água fornecerem resultados muito aproximados do volume infiltrado, os valores dos parâmetros da equação de infiltração, obtidos pelo método de Gilley, foram significativamente diferentes daqueles obtidos pelos métodos de Christiansen et al. (1966) e Singh & Chauhan (1973). Este fato vem evidenciar que tanto o coeficiente como o expoente da equação de infiltração caracterizam o processo de infiltração da água no solo. Assim, para os tempos de aplicação de água comumente observados na grande prática de irrigação, parece inadequado expressar a característica de infiltração apenas em função do expoente da equação tipo Kostikov-Lewis.

REFERÊNCIAS

- BONDURANT, J.A. Developing a furrow infiltrometer. *Agric. Eng.*, 38(8):602-4, 1957.
- BOUWER, H. A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil *in situ* above a water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25(5):334-9, 1961.
- CHRISTIANSEN, J.E.; BISHOP, A.A.; KIEFER JUNIOR, F.W. & FOK, Y.S. Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. *Trans. ASAE*, 9(5):671-4, 1966.
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H. & SHOCKLEY, D.G. *Methods for evaluating irrigation systems*. s.l., USDA. Soil Conservation Service, 1956. 24p. (Agriculture Handbook, 82).
- DAVIS, J.R. & FRY, A.W. Measurement of infiltration rates in irrigated furrows. *Trans. ASAE*, 6(4): 318-9, 1963.
- GILLEY, J.R. *Intake function and border irrigation*. Fort Collins, Colorado State Univ., 1968. 130p. Tese Mestrado.
- KARMELI, D.; SALAZAR, L.J. & WALKER, W.R. Assessing the spatial variability of irrigation water applications. Fort Collins, Colorado State Univ., 1978. 201p.
- LEY, T.W. & CLYMA, W. Furrow-irrigation practices in Northern Colorado. *Trans. ASAE*, 24(3):610-23, 1981.
- NORUM, D.I. & GRAY, D.M. Infiltration equations from rate-of-advance data. *J. Irrig. Drain. Div. Proc. ASCE.*, 96(IR2):111-9, 1970.
- RICHARDS, L.A., ed. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. s.l., USDA, 1954. (Agriculture Handbook, 60).
- ROTH, R.L.; FONKEN, D.W.; FANGMEIER, D.D. & ATCHISON, K.T. Data for border irrigation models. *Trans. ASAE*, 17(1):157-61, 1974.
- SHULL, H. A by-pass furrow infiltrometer. *Trans. ASAE*, 4(1):15-7, 1961.
- SINGH, P. & CHAUHAN, H.S. Determination of water intake rate from rate of advance. *Trans. ASAE*, 16(6):1081-4, 1973.