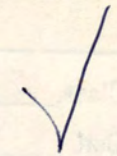


345-REPIDISCA



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE BALANÇO
VOLUMÉTRICO E DESENVOLVIMENTO DOS PROGRAMAS
COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS**

ANA LÚCIA DE OLIVEIRA DARÉ

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL.

ÁREA : HIDRÁULICA E SANEAMENTO

ORIENTADOR : PROF. DR. ARTHUR MATTOS

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017707

Modelos matemáticos de balanço volumétrico / Simulação por sulcos

São Carlos,
Julho, 1995 2007

RF 126 25
() ()



Class.	TESE/EESC
Cutt.	1861
Tombo	122/95

Hidráulica e Saneamento

st 0742522

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

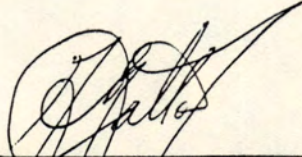
D217a Daré, Ana Lúcia de Oliveira
Avaliação de modelos matemáticos de balanço volumétrico e desenvolvimento dos programas computacionais para simulação da irrigação por sulcos / Ana Lúcia de Oliveira Daré.—São Carlos, 1995.
241p.

Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1995.
Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos

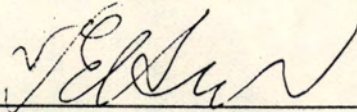
1. Modelos matemáticos de balanço volumétrico. 2.
Simulação da irrigação por sulcos. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

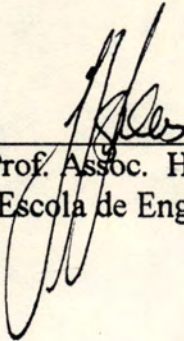
Dissertação defendida e aprovada em 20-7-1995
pela Comissão Julgadora:



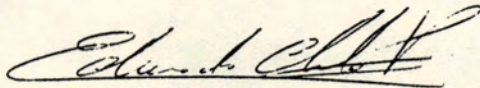
Prof. Doutor ARTHUR MATTOS - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



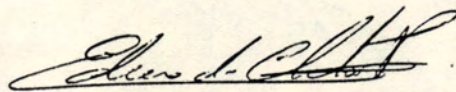
Prof. Titular ANTONIO EVALDO KLAR
(Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP)



Prof. Assoc. HANS GEORGE ARENS
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES



Coordenador da área - Hidráulica e Saneamento
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES

Ao meu pai,
uma ausência sempre presente,
minha homenagem.

À minha mãe, irmãos,
esposo e filhos,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Arthur Mattos pela excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho e, especialmente pelas demonstrações permanentes de idealismo, dedicação e amizade dispensada.

Ao Professor Mestre Luiz Daré Neto, da UNESP-Bauru, pela decidida contribuição na realização desta pesquisa.

Ao Professor Mestre Eduardo Luiz de Oliveira, da UNESP-Bauru, pela colaboração prestada e pelo grande apoio e incentivo.

Ao Professor Doutor Fazal Hussain Chaudhry, dedicado pesquisador, pelos esclarecimentos e disposição demonstrada.

À Professora Doutora Luisa Fernanda R. Reis, pela disposição na concessão de informações e pelo incentivo.

Ao colega Lucien Akabassi, pela valiosa bibliografia cedida, e pela amizade e apoio dispensados.

À tecnóloga Fátima de Lourdes dos Santos Nunes, do polo computacional da UNESP-Bauru, pela colaboração nos trabalhos de computação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Mecânica da UNESP-Bauru, pelas facilidades concedidas em todas as fases deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela formação no mestrado.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela compreensão, estímulo, apoio e amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1 Histórico.....	8
2.2 Irrigação superficial.....	10
2.3 Irrigação por sulcos.....	14
2.3.1 Tipos de sulcos.....	15
2.3.1.1 Sulco reto.....	15
2.3.1.2 Sulcos em contorno.....	17
2.3.1.3 Sulcos em corrugação.....	18
2.3.1.4 Sulcos em ziguezague.....	19
2.3.2 Descrição da irrigação superficial em sulcos...20	
2.3.3 Características do escoamento.....	24
2.3.4 Parâmetros de campo dos sulcos.....	25
2.3.4.1 Parâmetros geométricos do sulco.....	26
2.3.4.2 Perímetro molhado.....	27
2.3.4.3 Rugosidade hidráulica.....	28
2.3.4.4 Infiltração.....	30
2.4 Modelo matemático da irrigação superficial.....	43
2.4.1 Modelos hidrodinâmicos completos.....	43
2.4.2 Modelos inércia zero.....	46
2.4.3 Modelos de onda cinemática.....	48
2.4.4 Modelos de balanço volumétrico.....	51
2.5 Modelos de eficiência, otimização e pesquisas de campo para a irrigação por sulcos.....	57
3. METODOLOGIA.....	63
3.1 Modelo computacional.....	64
3.1.1 Modelo algébrico de LEVIEN-SOUZA (1987).....	64
3.1.1.1 Fase de avanço.....	64

3.1.1.2 Fase de recessão.....	69
i) Cálculo de t_r , início do tempo de recessão..	69
ii) Cálculo da curva de recessão.....	73
iii) Cálculo do escoamento superficial.....	79
iv) Cálculo do escoamento superficial que ocorre antes da recessão.....	79
v) Cálculo do escoamento superficial durante a recessão.....	80
3.1.1.3 Características do programa do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987), para processamento em microcomputador.....	83
3.1.2 Modelo analítico para a irrigação por sulcos de YU e SINGH (1990).....	87
3.1.2.1 Derivação do modelo.....	87
3.1.2.2 Seção transversal padronizada do sulco...	87
3.1.2.3 Fase de avanço.....	90
3.1.2.4 Fase de armazenamento.....	98
3.1.2.5 Fase de recessão vertical.....	100
3.1.2.6 Fase de recessão horizontal.....	101
3.1.2.7 Características do programa do modelo de YU e SINGH (1990), para processamento em microcomputador.....	103
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	111
4.1 Avaliação do desempenho dos modelos para simulação da irrigação por sulcos.....	112
4.1.1 Exemplo nº 01: Dados de Ramsey.....	115
4.1.2 Exemplo nº 02: Dados do Colorado.....	121
4.1.3 Exemplo nº 03: Dados de Stieben Farm.....	127
5. CONCLUSÕES.....	134
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
APÊNDICE 1 - GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	156
APÊNDICE 2 - CÁLCULO DA INTEGRAL $\int \frac{1}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta$	158

APÊNDICE 3 - CÁLCULO DA INTEGRAL	$\int \frac{\zeta^{5/3}}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta$161
APÊNDICE 4 - PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR - MODELO DE LEVIEN E SOUZA (1987)	164
APÊNDICE 5 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - MODELO DE LEVIEN E SOUZA (1987)	180
APÊNDICE 6 - PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR - MODELO DE YU E SINGH (1990)	186
APÊNDICE 7 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - MODELO DE YU E SINGH (1990)	212

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Representação esquemática dos principais sistemas de irrigação superficial (a) Faixas e sulcos retos e tabuleiros retangulares (b) Faixas em contorno (c) Sulcos em contorno. (SCALOPPI, 1986)	11
Figura 02- Sistema de sulcos retos com declive	16
Figura 03- Sistema de sulcos em contorno	17
Figura 04- Sistema de sulcos em corrugação	19
Figura 05- Sistema de sulcos em ziguezague	20
Figura 06- Fases características de um processo típico de irrigação superficial (após BASSETT, 1973)	22
Figura 07- Exemplo de variação periódica na infiltração acumulada, Z, para eventos de irrigação (após WALKER e SKOGERBOE, 1984)	31
Figura 08- Exemplo da taxa de infiltração, I, e infiltração acumulada, Z (após WALKER e SKOGERBOE, 1984)	32
Figura 09- Perfis de umedecimento do solo durante a infiltração (após BODMAN e COLEMAN, 1943)	36
Figura 10- Lâminas superficial e infiltrada, durante a fase de avanço na irrigação por sulcos (após SOUZA, 1983)	65
Figura 11- Elementos geométricos da seção transversal parabólica de um sulco de irrigação (após SOUZA, 1983)	66
Figura 12- Perfis superficiais esquemáticos - Fase de depleção (JENSEN, 1980)	70
Figura 13- Volume superficial esquemático - Fase de depleção (LEVIEN e SOUZA, 1987)	70
Figura 14- Perfis superficiais esquemáticos - em sulco com extremidade final livre (JENSEN, 1960) ..	74
Figura 15- Volume superficial esquemático - Fase de recessão (LEVIEN e SOUZA, 1987)	75

Figura 16- Fluxograma do programa desenvolvido para processamento em computador digital - Modelo de Levien e Souza (1987)	85
Figura 17- Fluxograma do programa desenvolvido para processamento em computador digital - Modelo de Yu e Singh (1990)	105
Figura 18- Fluxograma para a pesquisa de Fibonacci.....	109
Figura 19- Distribuição da água infiltrada - Irrigação deficiente (após WALKER e SKOGERBOE, 1984) ..	114
Figura 20- Distribuição da água infiltrada - Irrigação adequada (após WALKER e SKOGERBOE, 1984)	114
Figura 21- Distribuição da água infiltrada - Irrigação excessiva (após WALKER e SKOGERBOE, 1984) ...	114
Figura 22- Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em sulcos (Dados de Ramsey, 1976)	119
Figura 23- Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em sulcos (Dados do Colorado)	126
Figura 24- Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em sulcos (Dados de Stieben Farm)	132

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01- Dados de avanço e recessão de RAMSEY (1976)...116
- Tabela 02- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 01- Dados de RAMSEY, 1976).....117
- Tabela 03- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 01- Dados de RAMSEY, 1976).....118
- Tabela 04- Dados de avanço e recessão do Colorado.....123
- Tabela 05- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 02- Dados do Colorado).....124
- Tabela 06- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 02- Dados do Colorado).....125
- Tabela 07- Dados de avanço e recessão do Stieben Farm....129
- Tabela 08- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 03- Dados de Stieben Farm).....130
- Tabela 09- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 03- Dados de Stieben Farm).....131
- Tabela 10- Erros relativos médios e erros absolutos médios de cada simulação dos exemplos 01, 02 e 03.....133

LISTA DE SÍMBOLOS

- a = Expoente da equação de infiltração de Kostiaikov ou Kostiaikov modificada
 A = Área de escoamento (L^2)
 A_0 = Área da seção transversal de escoamento na entrada do sulco (L^2)
 A_1 = Área de água infiltrada na entrada do sulco, no tempo t (L^2)
 A_2 = Área de escoamento superficial na seção 2 m antes da frente de avanço (L^2)
 A_e = Área de escoamento superficial na entrada do sulco (L^2)
 A_f = Área média da seção transversal do sulco (L^2)
 A_i = Função de área da água superficial (L^2)
 A_s = Função de área do escoamento superficial (L^2)
 A_t = Área de escoamento superficial na saída do sulco, no tempo t_r (L^2)
 A_y = Área média da seção transversal (L^2)
 A_z = Área média infiltrada (L^2)
 A_{iz} = Área de água infiltrada na seção 2 m antes da frente de avanço (L^2)
 A_{zo} = Área infiltrada acumulada, ou volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco (L^2)
 $A_{i\text{barra}}$ = Área média subsuperficial, correspondendo a posição S da frente de avanço, no tempo t (L^2)
 $A_{s\text{barra}}$ = Área média superficial, correspondendo a posição S da frente de avanço, no tempo t (L^2)
 $A_e(T_s)$ = Área de escoamento na saída do sulco, no tempo t_s (L^2)
 $A_y(y)$ = Área da seção transversal, função da lâmina y (L^2)
 A_{zr} = Área da seção transversal infiltrada necessária (L^2)
 b_0 = Largura máxima (L)
 B = Largura da superfície livre da água, na seção transversal do sulco (L)

- $B(y_0)$ = Largura da superfície livre da água, função de y_0
 (L)
- $B(y_1)$ = Largura da superfície livre da água, função de y_1
 (L)
- C = Coeficiente da equação da largura da superfície livre da água no sulco (L^{1-M})
- C_0 = Constante de infiltração básica na equação de Kostiakov modificada ($L.T^{-1}$)
- C_N = Coeficiente na equação da área infiltrada, função do tempo
- C_u = Coeficiente dependente do sistema de unidades usado ($L^{1/2}.T^{-1}$)
- d_0 = Profundidade (L)
- e_0 = Coeficiente na equação da área de escoamento superficial, função do tempo
- E = Espaçamento entre sulcos (L)
- E_a = Eficiência de aplicação da água (%)
- E_r = Erro relativo médio (%)
- E_s = Eficiência de armazenamento (%)
- E_{ab} = Erro absoluto médio (T)
- $EX1$ = Exemplo 01, computado através do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987)
- $EX2$ = Exemplo 02, computado através do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987)
- $EX3$ = Exemplo 03, computado através do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987)
- $EXEM1$ = Exemplo 01, computado através do modelo de YU e SINGH (1990)
- $EXEM2$ = Exemplo 02, computado através do modelo de YU e SINGH (1990)
- $EXEM3$ = Exemplo 03, computado através do modelo de YU e SINGH (1990)
- f = Coeficiente de correção do escoamento variado
- G = Constante
- h = Profundidade de escoamento na superfície do solo (L)
- h_0 = Profundidade normal para a taxa de entrada, na seção $x=0$ (L)

h_z	= Profundidade de escoamento na seção 2 m antes da frente de avanço (L)
h_e	= Profundidade de escoamento na saída do sulco (L)
h_t	= Profundidade de escoamento na saída do sulco, no tempo t_r (L)
$h_e(T_s)$	= Profundidade de escoamento na saída do sulco, no tempo T_s (L)
i	= Número de incrementos de tempo calculados
I	= Taxa de infiltração média ($L.T^{-1}$)
$I(t_M)$	= Taxa de infiltração média, função de t_M ($L.T^{-1}$)
$I(t_r)$	= Taxa de infiltração média, função de t_r ($L.T^{-1}$)
$I(t_r-t_L)$	= Taxa de infiltração média, função de (t_r-t_L) ($L.T^{-1}$)
I_{barra}	= Taxa de infiltração média sobre todo o comprimento do sulco ($L.T^{-1}$)
I_{barra}	= Taxa de infiltração média no tempo T_v ($L.T^{-1}$)
K	= Coeficiente da equação de infiltração de Kostiakov ou Kostiakov modificada ($L.T^{-\alpha}$)
l	= Comprimento da porção inundada do sulco (L)
L	= Comprimento do sulco (L)
m	= Declividade lateral (L)
M	= Expoente da equação da largura da superfície livre da água no sulco
N	= número de observações (adimensional)
n	= Coeficiente de rugosidade de Manning ($T.L^{-1/3}$)
P_0	= Perímetro molhado na entrada do sulco (L)
P_z	= Perímetro molhado do escoamento superficial 2 m antes da frente de avanço (L)
P_e	= Perímetro molhado do escoamento superficial na entrada do sulco (L)
P_f	= Perímetro médio da seção transversal do sulco (L)
P_m	= Perímetro molhado (L)
P_t	= Perímetro molhado na saída do sulco, no tempo t_r (L)
P_{barra}	= Perímetro molhado médio do escoamento superficial (L)
P_{barra}	= Perímetro molhado médio no tempo T_v (L)

$P_e(T_s)$	= Perímetro molhado na entrada do sulco, no tempo T_s (L)
Q	= Vazão de escoamento ($L^3.T^{-1}$)
Q_0	= Vazão de entrada no sulco ($L^3.T^{-1}$)
Q_1	= Vazão no final do sulco ($L^3.T^{-1}$)
Q_2	= Taxa de escoamento 2 m antes da frente de avanço ($L^3.T^{-1}$)
Q_t	= Taxa de escoamento superficial no tempo t_r ($L^3.T^{-1}$)
Q_{of}	= Taxa de escoamento superficial na saída do sulco ($L^3.T^{-1}$)
Q_{inf}	= Vazão infiltrada no sulco ($L^3.T^{-1}$)
$Q_1(t_r)$	= Vazão no final do sulco, função de t_r ($L^3.T^{-1}$)
$Q_{of}(T_s)$	= Taxa de escoamento superficial no tempo T_s ($L^3.T^{-1}$)
r_y	= Fator de forma do perfil superficial
r_z	= Fator de forma do perfil subsuperficial
R	= Raio de um sulco semi-circular padronizado (L)
R_h	= Raio hidráulico (L)
S	= Posição da frente de avanço (L)
S_0	= Declividade do fundo do sulco ($L.L^{-1}$)
S_y	= Declividade da linha energética ($L.L^{-1}$)
t	= Tempo gasto para a frente de avanço atingir a distância x (T)
t	= Tempo de infiltração, ou tempo de oportunidade (T)
t_2	= Tempo de infiltração médio 2 m antes da frente de avanço (T)
t_L	= Tempo de avanço da água no sulco (T)
t_a	= Tempo total de avanço (T)
t_c	= Tempos calculados (T)
t_e	= Tempo no qual a irrigação termina (T)
t_r	= Tempo no qual a recessão começa (T)
t_s	= Tempo total de entrada (T)
t_{co}	= Tempo de corte do fornecimento de água para o sulco (T)
t_{ob}	= Tempos observados (T)

t_{vc}	= Tempo de irrigação acumulado no final da fase de recessão vertical (T)
v_2	= Velocidade de escoamento 2 m antes da frente de avanço ($L \cdot T^{-1}$)
V_0	= Volume total de água aplicado ao sulco (L^3)
V_s	= Volume superficial (L^3)
V_t	= Volume total de água no tempo t (L^3)
V_y	= Volume armazenado na superfície do solo (L^3)
V_z	= Volume infiltrado no solo (L^3)
V_{ia}	= Volume total de água infiltrada, no tempo t (L^3)
V_{ro}	= Volume escoado superficialmente (L^3)
V_{sa}	= Volume de água superficial, no tempo t (L^3)
V_{tr}	= Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r (L^3)
V_{iv}	= Volume de água na superfície, no início do tempo de recessão (L^3)
V_u	= Volume de água útil (L^3)
$V_y(t_r)$	= Volume superficial, no tempo t_r (L^3)
$V_z(t_r)$	= Volume infiltrado, no tempo t_r (L^3)
$V_{ro}(t)$	= Volume de escoamento superficial, no tempo t (L^3)
$V_{ro}(t_e)$	= Volume total de escoamento superficial, no tempo t_e (L^3)
$V_{ro}(t_r)$	= Volume superficial, no tempo t_r (L^3)
x_a	= Distância horizontal de avanço, no sentido do escoamento do sulco (L)
x_r	= Posição de recessão (L)
y	= Lâmina d'água (L)
y_0	= Lâmina d'água na cabeceira do sulco (L)
y_1	= Lâmina d'água no final do sulco (L)
y_{no}	= Lâmina normal, função de Q_0 (L)
y_{n1}	= Lâmina normal, função de Q_1 (L)
$y_1(t_r)$	= Lâmina d'água no final do sulco, função de t_r (L)
Z_r	= Lâmina infiltrada necessária (L)
$Z(t)$	= Lâmina infiltrada acumulada, função de t (L)
$Z(t_r)$	= Lâmina infiltrada acumulada, função de t_r (L)

$Z(t_r - t_L)$ = Lâmina infiltrada acumulada, função de $(T_r - t_L)$
(L)

ξ = Variável adimensional

τ = Tempo de infiltração (T)

RESUMO

A utilização de modelos matemáticos para a simulação da irrigação superficial constitui um recurso valioso, capaz de considerar inúmeras alternativas de dimensionamento a um custo e tempo reduzidos. Foi realizada uma análise teórica e computacional de modelos matemáticos, baseados na equação de balanço volumétrico, para a irrigação por sulcos em declive e com drenagem livre no final da parcela, simulando todas as fases da irrigação. O trabalho inclui o desenvolvimento dos programas computacionais e uma avaliação de desempenho dos modelos, utilizando-se dados experimentais obtidos no campo. A análise comparativa e aproximação entre os dados de avanço e recessão observados e computados pelos modelos algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e analítico de YU e SINGH (1990), bem como o estudo de erros relativo e absoluto devido ao uso das equações e das hipóteses consideradas pelos modelos, foi feita por meio da representação gráfica dos mesmos. Foram analisados também, além do avanço e recessão, outros parâmetros necessários ao projeto e avaliação de sistemas de irrigação por sulcos, como os volumes de escoamento superficial e infiltrado e as eficiências de aplicação e de armazenamento da água. Os resultados mostram a validade e boa aproximação dos modelos analisados para a predição de todo o ciclo da irrigação por sulcos, sendo notado um bom desempenho dos mesmos.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos, Balanço Volumétrico, Irrigação por Sulcos, Simulação, Curvas de avanço e recessão.

ABSTRACT

The potential utilization of mathematical models to simulate the surface irrigation process is a valuable resource, able to consider countless alternatives. The objective of this study is the theoretical and computational analysis of mathematical models, based on the balance of volume equation, for a sloping open-ended furrow system, which simulates all phases of irrigation. It includes computational programs and evaluation of the models, using field experimental data. The comparative analysis and approach between the observed advance and recession data and those calculated by LEVIEN and SOUZA (1987) algebraic and YU and SINGH (1990) analytical models, as well as the study of average relative error and average absolute error due to the use of equations and assumed concepts by the models, we've made their graphical presentation. Some others parameters required by furrow irrigation systems project and evaluation were also analysed, besides advance and recession parameters, like runoff and infiltrated volumes, water application efficiency and a storage efficiency. Results obtained seem to show not only the validity of the analysed models but also for an accurate prediction of the entire furrow irrigation cycle, so their good performance.

Keywords: Mathematical models; Balance of volume equation; Furrow irrigation; Simulation; Advance and recession curves.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo geral da irrigação é prover um meio ambiente adequadamente úmido ao solo, para o crescimento adequado da planta. A água aplicada deve ser distribuída com a maior uniformidade possível sobre a superfície do solo, com perdas mínimas de armazenamento da água. A erosão e deterioração da estrutura do solo devem ser minimizados. A quantidade aplicada não deve exceder a capacidade de armazenamento do solo, na zona radicular, evitando a erosão. O excesso de irrigação e o lixiviamento de nutrientes deve ser evitado. A irrigação deficiente, por sua vez, permite que os sais se acumulem no solo e podem causar falta de água para a planta, portanto, ela não é a solução para o problema de eficiência¹ da irrigação.

Atualmente, apesar de representarem 15% de toda a área cultivada no mundo, as áreas irrigadas respondem por 30 a 50% da produção agrícola mundial. Praticamente 75% das áreas irrigadas no mundo estão localizadas em 22 países subdesenvolvidos, entre eles o Brasil (GUIA RURAL - Água: Manual de Irrigação, 1991).

O Brasil tem 3 milhões de hectares irrigados, com as mais diversas culturas e métodos, o que representa 6% da área agrícola cultivada em todo o país, estimada em 50 milhões de hectares. No entanto, esses 6% respondem por 17% da produção nacional e por 25% do valor total dessa produção anual (GUIA RURAL - Água: Manual de Irrigação, 1991).

1- Os termos relativos à eficiência empregados estão de acordo com os conceitos especificados pelo On Farm Irrigation Committee da Divisão de Irrigação e Drenagem da ASCE (1971).

Os sistemas de irrigação superficial, podem ser classificados de acordo com suas características operacionais em:

- inundação total por contenção da água na superfície do solo;
- inundação total por condução da água na superfície do solo;
- inundação parcial por condução da água na superfície do solo.

O primeiro grupo refere-se ao sistema conhecido por inundação ou tabuleiros de inundação, usado especialmente na cultura do arroz. O segundo denomina-se faixa de infiltração, adequado para cereais de pequeno porte e culturas forrageiras e o terceiro grupo identifica os sulcos de infiltração e corrugações, que se adaptam melhor à culturas desenvolvidas em linhas esquematicamente espaçadas como o milho, sorgo, cana-de-açúcar, amendoim, batata, soja, feijão, fumo, tomate, algodão, café, árvores frutíferas e culturas olerícolas.

Tendo em vista as previsões de escassez de água e elevação do custo de energia, uma das primeiras prioridades na agricultura é o desenvolvimento de projetos de irrigação que sejam mais eficientes no uso destes recursos, para vários tipos de plantações e práticas da fazenda.

Uma parte desta pesquisa é o desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevam eficazmente o processo de irrigação. Estes modelos podem ser usados para desenvolver e aprimorar novas tecnologias de irrigação, testar rapidamente e com baixo custo novos projetos para uma grande faixa de condições e preparar uma avaliação econômica dos diferentes projetos. Entretanto, para que sejam úteis, os modelos devem representar eficientemente a interação entre as propriedades hídricas do solo e o projeto do sistema de irrigação, incluindo o sistema de distribuição hidráulica das água superficiais.

Durante os últimos 20 anos, houveram avanços significativos no entendimento dos princípios físicos e da modelagem matemática da irrigação superficial. Os modelos

calculados necessitam de valores para os parâmetros que descrevem as características de rugosidade e infiltração do canal ou sulco, o que implica em numerosas tentativas para se estimar esses parâmetros através de simples testes de campo. Sob condições ideais, tais testes podem fornecer estimativas reais dos parâmetros de campo, que permitem a computação dos modelos para simular fisicamente os aspectos das várias fases da irrigação.

A verificação bem sucedida dos vários modelos matemáticos é atualmente obtida devido a imposição de que um conjunto de parâmetros são constantes, um fato que tem sido reconhecido como uma super simplificação.

Na prática, não é conveniente esperar que valores eficazes dos parâmetros de campo estejam disponíveis e que possam ser considerados constantes.

Obviamente, estimativas imprecisas das propriedades de campo ocasionaram sérias ineficácias na simulação numérica e diminuíram o valor de excelentes modelos matemáticos. De fato, mesmo que os testes de campo sejam realizados antes de cada simulação, não existe garantia de que o modelo computacional reproduza o processo físico corretamente, já que os valores medidos para os parâmetros e os introduzidos no modelo não coincidem necessariamente.

As aproximações no modelo matemático e a tolerância dos parâmetros de campo estão inter relacionadas de uma forma complicada e essencialmente desconhecida, produzindo finalmente o que é conhecido como uma solução numérica.

A finalidade é minimizar os erros na produção do modelo, que pode ser obtida com um conjunto de parâmetros que não são os melhores descritores das propriedades de campo mas que, quando introduzidos nos modelos produzem a melhor previsão das quantidades medidas diretamente, tais como a taxa de avanço e a profundidade de escoamento.

Estes parâmetros podem ser classificados em tres categorias. O primeiro grupo, o dos fatores geométricos, tais como as alturas, dimensões e perfil da seção

transversal do sulco, são geralmente determinados durante o projeto do sistema. O segundo conjunto de parâmetros representam os fatores do solo e da plantação, infiltração e rugosidade. A infiltração tem uma influência significativa na relação entre o avanço e a recessão, assim como na frente de umidade. A rugosidade afeta o avanço e a recessão, mas geralmente não influencia diretamente o perfil infiltrado. O terceiro conjunto de parâmetros representa o gerenciamento das alternativas avaliáveis para o irrigador. Estes incluem a hidrografia de entrada, tipicamente representada por vazão de entrada e tempo de corte, e a umidade do solo no período de irrigação, ou o gerenciamento do déficit permitido (KATOPODES et al, 1990).

As técnicas de estimativa do fenômeno de escoamento, para a irrigação superficial, podem ser as seguintes:

- 1 - Modelos de balanço volumétrico, onde a equação da Quantidade de Movimento é substituída por um volume do escoamento superficial adotado. Utiliza-se a Equação da Continuidade e são adotadas a profundidade normal no início do canal, um fator de perfil para o volume superficial, e um fator de perfil subsuperficial entre os últimos dois pontos medidos no avanço;
- 2 - Modelo de onda cinemática (SMITH, 1972), onde a equação da Quantidade de Movimento é substituída por uma relação conhecida entre a profundidade e a vazão;
- 3 - Pseudo inércia zero, onde os termos de aceleração são desprezados e os gradientes de profundidade são medidos em função da distância;
- 4 - Inércia Zero, onde os termos da aceleração na equação da Quantidade de Movimento são desprezados. São avaliadas versões linearizadas localmente (STRELKOFF e KATOPODES, 1977; ELLIOTT e WALKER, 1982) e totalmente não lineares (STRELKOFF, 1985);
- 5 - Hidrodinâmicos, onde é usada a equação da Quantidade de Movimento (KATOPODES e STRELKOFF, 1977).

Os modelos hidrodinâmicos completos consistem na

solução das equações de Saint-Venant (equação da Conservação da Massa e da Quantidade de Movimento); são altamente eficazes, porém eles são complexos e onerosos. Tanto os métodos cinemáticos quanto os de inércia zero supõem que os termos da aceleração nas equações de momento são desprezados. Apesar de ambos os procedimentos darem bons resultados, as soluções cinemáticas não se aplicam a canais bloqueados ou com declividade pequena ou nula, porém são as mais utilizadas para canais rugosos íngremes.

As aproximações por balanço volumétrico usam simplesmente a lei da Conservação da Massa e adotam alguns fatores de condição para os perfis superficiais e de infiltração. Estes modelos podem fornecer resultados satisfatórios para muitos problemas, mas sua aplicação está limitada a uma pequena faixa de condições (STRELKOFF e KATOPODES, 1977).

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis na previsão da resposta dos sistemas de irrigação para parâmetros de projeto e de operação. O ideal seria que esses modelos fossem simples e eficazes.

Os modelos disponíveis podem ser divididos em duas categorias. Na primeira, as equações diferenciais que descrevem o fenômeno do escoamento são resolvidas numericamente (HALL, 1956; BASSETT, 1972; STRELKOFF e KATOPODES, 1977; ELLIOTT et al., 1982; JAYNES, 1986).

Na segunda categoria, as equações básicas, que são usadas para modelar o processo físico, são resolvidas analiticamente, evitando assim, o método de tentativas e erros quando se aplicam os métodos numéricos. Mas para se obter soluções analíticas, deve-se considerar apenas a lei da Conservação da Massa, ou para muitos, as cinemáticas do escoamento. Exemplos desses modelos incluem LEWIS e MILNE (1938), PHILIP e FARRELL (1964), FOK e BISHOP (1965), CUNGE e WOLHISER (1975), SHERMAN e SINGH (1982), TURBAK e MOREL-SEYTOUX (1988a, b). Na mesma categoria se enquadram os métodos que utilizam uma visão da técnica modificada de Muskingum, para escoamento em hidrologia. O outro se baseia na suposição da capacidade de armazenamento constante.

Os métodos de irrigação superficial por inundação e por sulcos são bastante usados. Esses dois métodos oferecem a vantagem de permitir uma irrigação, rápida e relativamente fácil. A análise do sistema hidráulico da irrigação por sulcos é mais complexo do que o da irrigação por inundação, devido a variação da taxa de entrada da água no solo e da mudança no perfil da água na superfície do solo.

Comparado ao método de inundação, nos sulcos a análise se torna mais complexa devido a variação na largura e no perímetro molhado com a profundidade de escoamento. A irrigação pode ser efetuada sem escoamento superficial e com mínima perda por percolação na profundidade, nos sistemas de inundação. Em muitos sulcos, entretanto, a irrigação com pouco ou mesmo sem escoamento superficial resulta em grandes perdas por percolação na profundidade.

Os sistemas de irrigação por sulcos são, dessa forma, sempre projetados com perda, por exemplo, superficial na extremidade mais baixa. Essas são surpreendentemente grandes, para a condição da profundidade da água armazenada à jusante ser adotada como sendo a profundidade de água necessária.

Por causa da complexidade da infiltração por sulcos, podem ser feitas duas simplificações. Primeiro, os pesquisadores (ELLIOTT et al.; LEWIS e SOUZA, 1987; SINGH e HE, 1988) usaram a equação de Kostikov modificada para calcular o volume da água infiltrada. Depois, muitos pesquisadores tentaram expressar as diferentes variedades de forma da seção transversal, em termos de uma função (WALKER e HUMPHERYS, 1983; ELLIOTT et al., 1982; RAYEJ e WALLENDER, 1987).

Contudo, alguns parâmetros geométricos, tais como a largura e o perímetro molhado da água num sulco retangular, ou com seção transversal larga, podem não ser bem representados por essa função. Com essas duas simplificações, os modelos feitos para a irrigação por inundação podem ser modificados para a irrigação por sulcos (ELLIOTT et al., 1982; WILKE e SMERDON, 1965; KARMELI, 1978;

SOUZA, 1981.; PHILIP e FARRELL, 1984; WALKER e HUMPHERYS, 1983).

Para a aplicação prática, os modelos de irrigação deveriam ser simples, sistemáticos, suficientemente eficazes e fáceis de aplicar.

A possibilidade de simular o fenômeno hidráulico associado à irrigação superficial, constitui um recurso rápido, preciso e econômico para racionalizar o dimensionamento, a operação e o manejo desses sistemas, em função de níveis de eficiência e uniformidade da irrigação.

Com o desenvolvimento experimental dos modelos matemáticos pode-se efetuar as simulações necessárias para avaliar o desempenho dos sistemas.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento teórico e computacional de modelos matemáticos baseados na equação de balanço volumétrico, para a simulação de todas as fases da irrigação superficial, através de sulcos, à saber, avanço, armazenamento, depleção e recessão. O trabalho inclui o desenvolvimento dos programas computacionais e uma avaliação de desempenho, utilizando-se dados experimentais obtidos no campo.

Os modelos selecionados para este estudo foram o algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e o analítico de YU e SINGH (1990).

A análise comparativa entre os dados de avanço e recessão observados e aqueles computados através da utilização dos modelos de simulação estudados, foi feita por meio de representação gráfica dos mesmos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRICO

A irrigação tem sido praticada dos tempos mais antigos ao mais moderno, em muitas áreas do mundo. Tem-se conhecimento que fazendeiros do Egito, China, Índia e países do meio Leste irrigaram terras a pelo menos 4000 anos atrás.

O historiador grego Herodotus, de 450 A.C., visitou a Babilônia quando partes daquele país já tinham sido cultivadas a 2000 anos e depois descreveu sua agricultura irrigada, servida por uma vasta rede de canais. (THORNE, 1951).

Por volta de 200 A.C., os fazendeiros de Hohokam desviaram a água do agora conhecido Salt River, em 200 Km de braços de canais ao redor do sítio Phoenix, Arizona (Salt River Project, 1960, citado por JENSEN, 1980).

Realmente acredita-se que todas essas irrigações tenham sido efetuadas superficialmente, sendo que existem poucas indicações que outros sistemas estivessem disponíveis. Esta dependência dos métodos superficiais continuou até depois de terminar a II Guerra Mundial, quando a tecnologia, a energia, e o apoio industrial tornaram possível o surgimento do método de irrigação por aspersão.

Esta longa história da irrigação superficial é válida. Evidências, dos sistemas que foram mantidos, ilustram a contribuição que a irrigação bem sucedida pode trazer à sociedade. Já as evidências de solos salinos e sistemas abandonados enfatizam a necessidade do uso prudente da irrigação superficial.

Os aperfeiçoamentos na irrigação superficial parecem resultar de uma combinação habilidosa da experiência

e da teoria, ou seja, do entendimento dos processos envolvidos. Enquanto a experiência tem sido acumulada por centenas de anos, as análises teóricas dos processos envolvidos são relativamente recentes.

A escassez de água prevista e o alto custo de energia, necessário para dirigir os sistemas alternativos sugerem que a irrigação superficial permanecerá popular, especialmente se puderem ser evitados abusos associados a esses fatores.

O projetista de sistemas de irrigação pode considerar muitos fatores do solo e fatores topográficos, na seleção do método de irrigação. A viabilidade de cada método (superficial, aspersão e gotejamento) deve ser considerado para condições específicas da região.

Segundo JENSEN (1980), os fatores do solo e topográficos que o projetista considera na seleção do sistema são:

- (1) características topográficas, tais como irregularidades superficiais, ângulo da declividade, mudanças na direção da declividade;
- (2) características hídricas, tais como a capacidade de campo, vazão de entrada e lâmina d'água;
- (3) características geométricas, tais como a forma do campo, drenagens naturais, construções, benefícios ou obstruções.

E os fatores que podem influenciar na seleção de um sistema superficial e preparação do solo são:

- (1) abastecimento de água, qualidade da água, vazão no ponto de derivação e localização;
- (2) necessidade e disponibilidade de mão-de-obra;
- (3) necessidade de energia e custo desta;
- (4) custo do sistema de instalação, operação e manutenção;
- (5) disponibilidade de equipamentos de fazenda;
- (6) a preferência do fazendeiro.

Se for escolhido o método de irrigação superficial, a superfície do campo deve ser fornecida detalhadamente. Raramente é possível estabelecer um sistema de irrigação superficial satisfatório, sem alterar a topografia da superfície do campo, para um nivelamento

planejado.

O solo é removido de pontos altos para pontos baixos, para tornar a irrigação eficiente e remover a água superficial. Sem esses níveis uniformes, as áreas baixas podem receber excesso de água e causar o afogamento das plantas. As áreas altas podem não receber água suficiente para evitar redução na produção. Além disso, os sais podem se acumular nas áreas altas, causando um posterior prejuízo nas plantas e redução na produção.

A irrigação superficial é e continuará sendo a figura central na engenharia de irrigação.

2.2 IRRIGAÇÃO SUPERFICIAL

A característica principal da irrigação superficial - irrigação por inundação, por faixas de infiltração ou por sulcos - é que a distribuição da água na área irrigada se dá por escoamento gravitacional. Estes sistemas estão esquematicamente representados na Fig. 01.

A água é aplicada na cabeceira da vala ou no início do sulco e automaticamente escoar à jusante pela força gravitacional. Para suprir a zona radicular com água suficiente usando este tipo de técnica de irrigação, que é amplamente empregada em quase todas as regiões irrigadas do mundo, existem certas perdas excessivas de água durante o percurso de transporte, perdas por percolação profunda e por escoamento superficial, que além do desperdício de água que provocam são responsáveis pela lixiviação e arrasto de fertilizantes, elevação do nível do lençol freático associado ao problema de drenagem, erosão e assoreamento. Por causa destas perdas, que não podem ser evitadas, a eficiência da aplicação da irrigação superficial é, muitas vezes, baixa (WU e BISHOP, 1970).

A modelagem matemática da irrigação superficial tem se tornado uma regra crucial na facilitação da pesquisa, projeto e gerenciamento desses sistemas (OWEIS e WALKER, 1990).

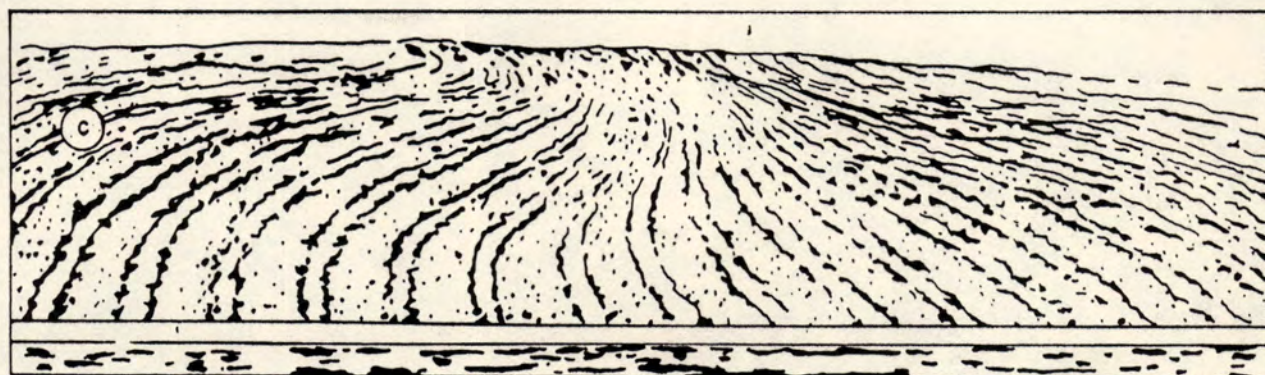
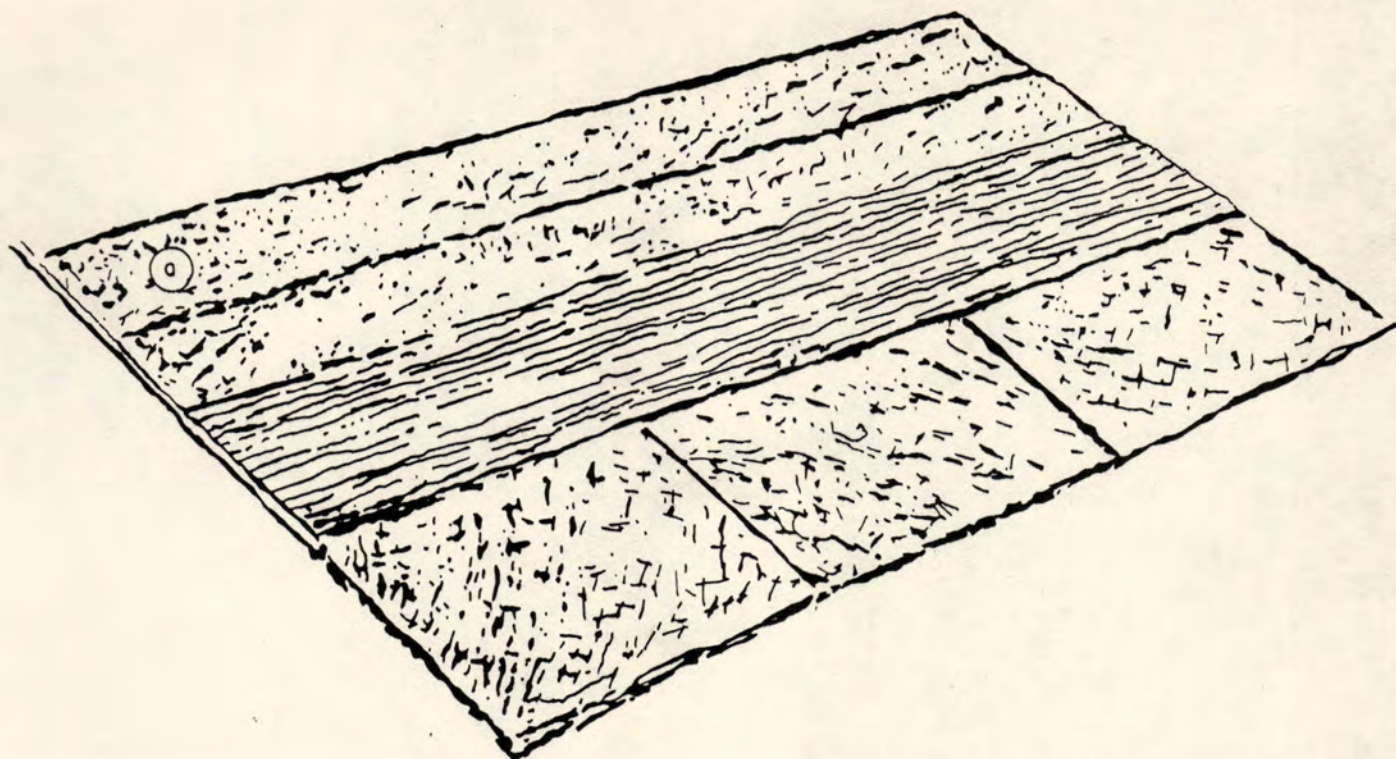


Figura 01 - Representação esquemática dos principais sistemas de irrigação superficial (a) Faixas e sulcos retos e tabuleiros retangulares (b) Faixas em contorno (c) Sulcos em contorno (SCALOPPI.1986)

Uma característica comum de tais modelos é que eles foram aplicados inicialmente ao método de irrigação por inundação, também denominado tabuleiros retangulares ou diques em declive e extendidos ou aperfeiçoados posteriormente ao método de irrigação por sulcos. Na irrigação por inundação, o terreno é dividido em parcelas¹ ou faixas estreitas e compridas, separadas por meio de diques. A água é aplicada na cabeceira da parcela e avança na forma de lâmina no sentido do declive do terreno, ao mesmo tempo em que infiltra no solo na direção vertical.

As práticas de gerenciamento da irrigação superficial são muito importantes e, de acordo com WALKER e SKOGERBOE (1984), podem ser classificadas como:

- (1) regulação da vazão de entrada no campo;
- (2) correção da superfície do solo e
- (3) recuperação e reutilização da água.

Os sistemas de irrigação por superfície apresentam inúmeras vantagens, em relação aos outros sistemas de irrigação. SCALOPPI (1986) destacou as seguintes:

- geralmente revelam o menor custo, incluindo os custos fixos e variáveis;
- maior simplicidade operacional, facilmente assimilada pelos irrigantes;
- adaptados a um grande número de solos e culturas;
- operação pouco afetada pelos ventos;
- elevado potencial para aumento de eficiência da irrigação;
- elevado potencial para redução do consumo de energia;
- não interferem nos tratamentos fitossanitários das culturas;
- permitem a utilização de águas contendo apreciáveis quantidades de sólidos em suspensão ou poluídas;
- maior flexibilidade para superar eventuais interrupções operacionais;
- possibilidade de automação operacional.

1- O termo parcela aqui empregado diz respeito especificamente a superfície condutora do fluxo durante o processo de irrigação.

À semelhança de outros sistemas de irrigação, também apresentam importantes limitações, indicadas por SCALOPPI (1986) como:

- acentuada dependência às condições topográficas, geralmente requerendo sistematização (regularização da superfície);
- inadequados para solos excessivamente permeáveis, pouco profundos e desprovidos de estrutura no horizonte superficial;
- seu dimensionamento envolve ensaios de campo;
- variabilidade de importantes parâmetros de dimensionamento, dentre os quais, a característica de infiltração da água no solo;
- reavaliações frequentes, com a finalidade de introduzir medidas dimensionais e operacionais corretivas, para assegurar um desempenho satisfatório do sistema;
- o sistema integra a área para a qual foi projetado e, portanto, não pode ser deslocado para outras áreas;
- a cultura deve se adaptar ao sistema de irrigação. Assim, torna-se praticamente impossível desenvolver um eficiente sistema de irrigação por superfície em qualquer cultura instalada, sem a previsão de ser irrigada;
- medidas efetivas de controle da erosão devem ser adotadas;
- limitada divulgação pela indústria e pelos técnicos. Não há interesse comercial envolvido.

O uso inadequado e o desconhecimento das potencialidades dos sistemas superficiais têm resultado numa eficiência reduzida. Por estas razões, eles têm recebido a imerecida reputação de sistemas de reduzida eficiência, MERRIAM (1976). Entretanto, quando adequadamente dimensionados e operados, podem apresentar um desempenho comparável a qualquer outro sistema de irrigação, conforme demonstraram os resultados obtidos por MUSICK et al. (1973) e SCHNEIDER et al. (1976). Além disso, a possibilidade de automação, procurando-se incorporar alguns conceitos recentemente desenvolvidos sobre fluxo intermitente, tem resultado em melhor desempenho e maior simplicidade operacional. Estas vantagens adicionais tornam os sistemas

superficiais ainda mais atrativos.

2.3 IRRIGAÇÃO POR SULCOS

O método de irrigação por sulcos é um dos métodos de irrigação superficial mais antigos, no qual se faz passar água por valas estreitas feitas por instrumentos agrícolas, ou seja, por pequenos canais, entre as linhas de plantio, descendo das áreas mais altas para as mais baixas da propriedade, com a finalidade de conduzir e distribuir a água à área irrigada.

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1984), as vantagens dos sulcos, em relação aos demais sistemas são:

- (1) possibilitam um melhor gerenciamento da água na fazenda, sobre várias condições de irrigação superficial;
- (2) as taxas de escoamento por unidade de largura podem ser reduzidas substancialmente e as condições topográficas podem ser mais severas e variáveis;
- (3) em espaçamentos grandes entre as plantas, uma área molhada menor pode reduzir as perdas por evaporação e
- (4) fornecem uma flexibilidade operacional importante para se obter altas eficiências em cada irrigação.

É simples, embora trabalhoso, ajustar o tipo de vazão do sulco, mudando as características de entrada, alterando simplesmente o número de sulcos abastecidos simultaneamente.

Genericamente falando, as desvantagens dos sulcos são:

- (1) risco de salinidade entre os sulcos;
- (2) maior probabilidade de perdas por escoamento, a menos que se use diques;
- (3) limitação da mobilidade do maquinário transversalmente a direção lateral do campo;
- (4) a construção dos sulcos e
- (5) um aumento potencial de erosão.

Segundo FANGMEIER e RAMSEY (1978), a simplicidade da irrigação contrasta com o estudo das características hidráulicas do escoamento no sulco, que são complicadas por

causa da geometria da seção transversal e pela ocorrência do escoamento variado e não-uniforme.

Como no sistema de faixas de irrigação, a mesma superfície condutora de água é o local onde ocorre a infiltração. O sistema repõe no solo a água consumida pelas plantas, fazendo com que ela infiltre verticalmente pelo fundo do canal ou horizontalmente, pelas paredes laterais de cada sulco. Esse movimento lateral da água infiltrada é responsável pelo fornecimento de água ao sistema radicular das culturas, portanto, os sulcos mais próximos às linhas de plantio fornecem água com maior eficiência às culturas.

A mão-de-obra necessária na irrigação por sulcos costuma ser maior do que em qualquer outro sistema de irrigação superficial.

A grande vantagem desse sistema de irrigação é a de não inundar toda a superfície do solo, como acontece na irrigação por inundação.

2.3.1 TIPOS DE SULCOS

2.3.1.1 Sulco reto

O sulco reto é o mais comum e o mais utilizado pelos agricultores. Pode ser projetado com declividades uniformes variando de 0,2 a 1% ou em nível, dependendo da condição topográfica. Neste caso, exige a sistematização do terreno e é o tipo que mais se adapta a quase todas as culturas em linha e que podem sofrer danos quando a água atinge suas folhas, ou os talos das plantas como o milho, hortaliças, cana-de-açúcar, beterraba açucareira, algodão, batata, soja, amendoim, feijão, fumo, tomate, café, árvores frutíferas e culturas olerícolas.

O sistema de irrigação por sulcos retos apresenta inúmeras vantagens, podendo-se destacar as seguintes:

- aproveitamento da água, sem perda por escoamento no final dos sulcos;
- podem ser usados em solos com baixa capacidade de infiltração;
- permitem boa distribuição de água;

- permitem boa distribuição de água;
- permitem o aproveitamento de toda a infra-estrutura de irrigação existente, para a obtenção de duas ou mais colheitas no mesmo ano agrícola.

Esse sistema apresenta as seguintes desvantagens:

- presença de considerável mão-de-obra para o controle da aplicação da água na entrada dos sulcos;
- adequada uniformização do terreno.

No caso de sulcos retos, com declive (Fig. 02):

- grandes quantidades de culturas podem ser exploradas em sequência, sem necessidade de mudanças na estrutura de irrigação da área;
- investimento inicial relativamente baixo, desde que o terreno não precise ser sistematizado;
- possibilidade de irrigar solos de crosta endurecida na superfície, uma vez que a água se move lateralmente.

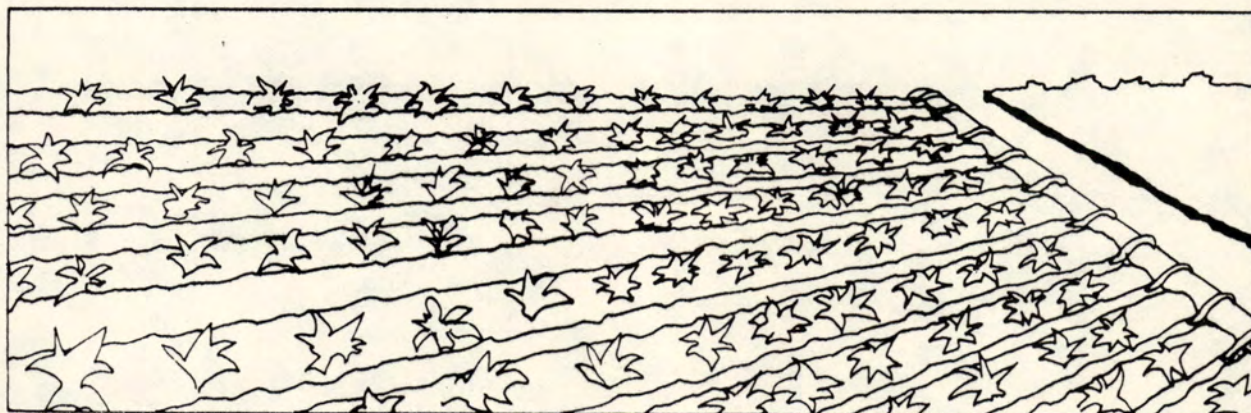


Figura 02- Sistema de sulcos retos com declive

Desvantagens no caso de sulcos retos, com declive:

- possível ocorrência de erosão por ocasião do período de chuvas com intensa precipitação e em área com declividade muito acentuada;
- o custo de sistematização do terreno pode ser muito alto;
- custo de mão-de-obra elevado, caso se façam necessários

maiores cuidados com a vazão e o fluxo para obter uma boa distribuição da água;

- permitem maior salinização do solo em relação aos demais sistemas de irrigação na superfície.

2.3.1.2 Sulcos em contorno

Os sulcos em contorno são sulcos construídos com determinada declividade e na direção das curvas de nível, em terrenos já com acentuado declive ou de superfície bastante irregular. A água é transportada por canais revestidos ou por tubulações na direção campo abaixo. A vazão aplicada por sulco é, em geral, pequena, a fim de se evitar transbordamento e, em consequência, risco de erosão. Porém, os sulcos devem ser suficientemente grandes para reter a água da chuva sem causar transbordamento - razão por que esses tipos de sulcos não são indicados para regiões sujeitas a chuvas intensas.

Vantagens que a irrigação por sulcos em contorno (Fig. 03) apresenta:

- irrigação de culturas em áreas cuja declividade tornaria imprópria a utilização de outros sistemas de superfície;
- emprêgo em terrenos de superfície irregular sem necessidade de sistematização.

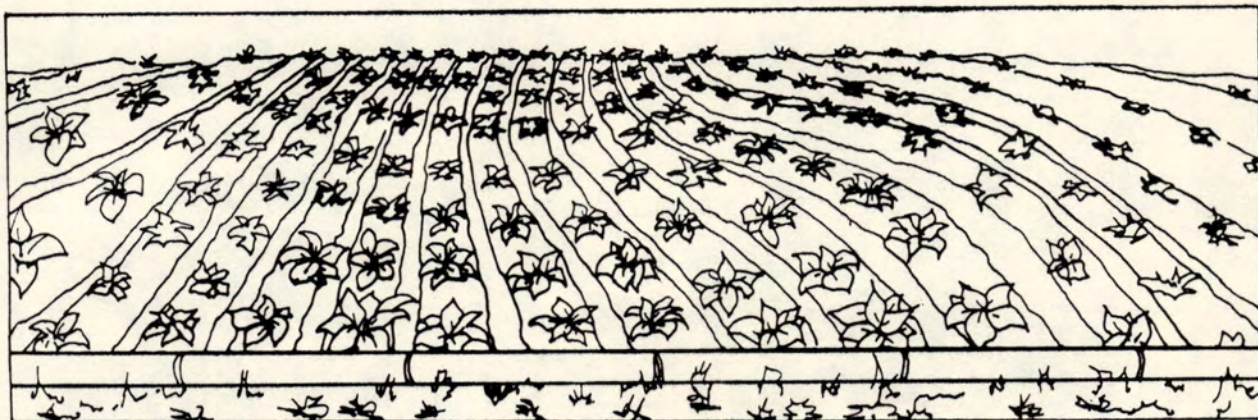


Figura 03- Sistema de sulcos em contorno

Pode-se destacar como desvantagens:

- são impróprios para regiões com chuvas intensas;
- exigem sistema de drenagem para o excesso da água de irrigação ou pluvial;
- exigem contróle da vazão de entrada a fim de evitar o transbordamento da água nos sulcos, o que pode causar erosão;
- necessidade de mais mão-de-obra em relação aos outros sistemas de superfície, no manejo da irrigação e no bloqueio da vazão de alguns pontos;
- podem impedir a passagem de máquinas agrícolas, dificultando a mecanização da lavoura.

2.3.1.3 Sulcos em corrugação

Os sulcos em corrugação são sulcos muito pequenos (minissulcos), construídos na direção da maior declividade do terreno, a fim de direcionar o fluxo de água sobre a superfície do solo. Este tipo de irrigação vai bem no caso de culturas que não exijam capinas e que tenham alta densidade de plantio por área, como pastagem, alfafa e forrageiras. Entretanto, o método vem sendo usado em plantas cultivadas em fileiras, como o arroz e o trigo.

A irrigação por corrugação adapta-se melhor a solos de textura média, que possuam boa capacidade de movimentar a água na horizontal. Todavia, não é recomendada para solos arenosos, com altas infiltrações, por causa das excessivas perdas por percolação profunda.

Pode-se destacar as seguintes vantagens para o sistema de sulcos em corrugação (Fig. 04):

- permitem a irrigação de solos com acentuado declive e de áreas com superfície irregular, nas quais outros sistemas de superfície dificilmente poderiam ser adotados;
- normalmente, o custo de uniformização do terreno é baixo.

Desvantagens:

- podem ocorrer problemas com erosão em solos cuja declividade é muito acentuada;

- exige grande quantidade de mão-de-obra, caso a vazão de entrada da água necessite ser cuidadosamente manejada;
- em regiões e áreas com propensão à salinização, este sistema deve ser usado com muito cuidado.

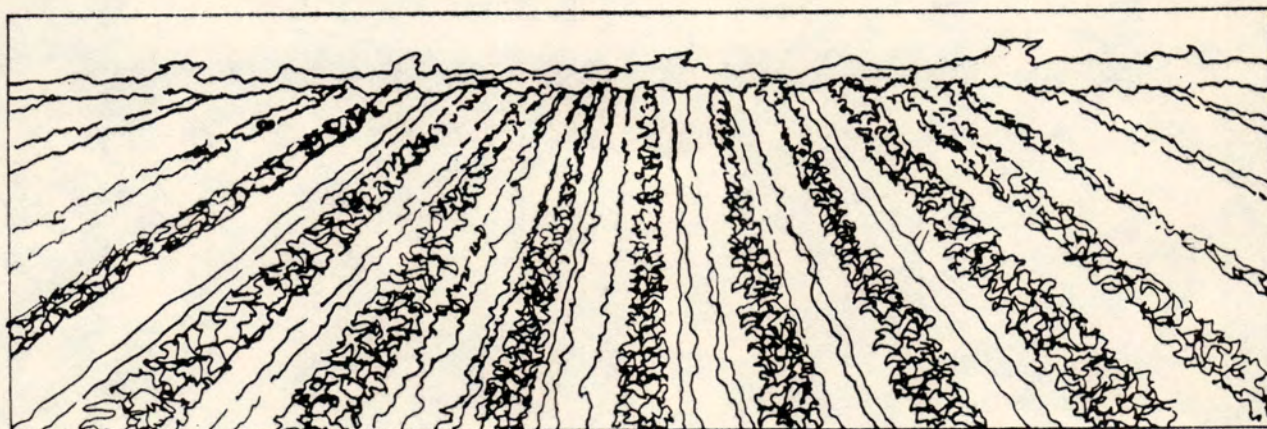


Figura 04- Sistema de sulcos em corrugação

2.3.1.4 Sulcos em ziguezague

Um outro tipo de sulco é o ziguezague (Fig. 05), usado quando se quer aumentar o caminho que a água tem de percorrer até chegar ao final da parcela. Por ser pouco eficiente, a irrigação por sulcos exige grande quantidade de água.

O transporte da água, da fonte de abastecimento até o local da irrigação, é geralmente feito por meio de canais de alvenaria, canais de terra sem revestimento ou revestidos. Os canais de terra revestidos reduzem as perdas de água e permitem que uma área maior da lavoura seja irrigada.

A distribuição de água no sulco pode ser feita por sifões, tubos janelados ou enxada. As vazões por sulco variam, geralmente, entre 0,2 e 2 litros por segundo.

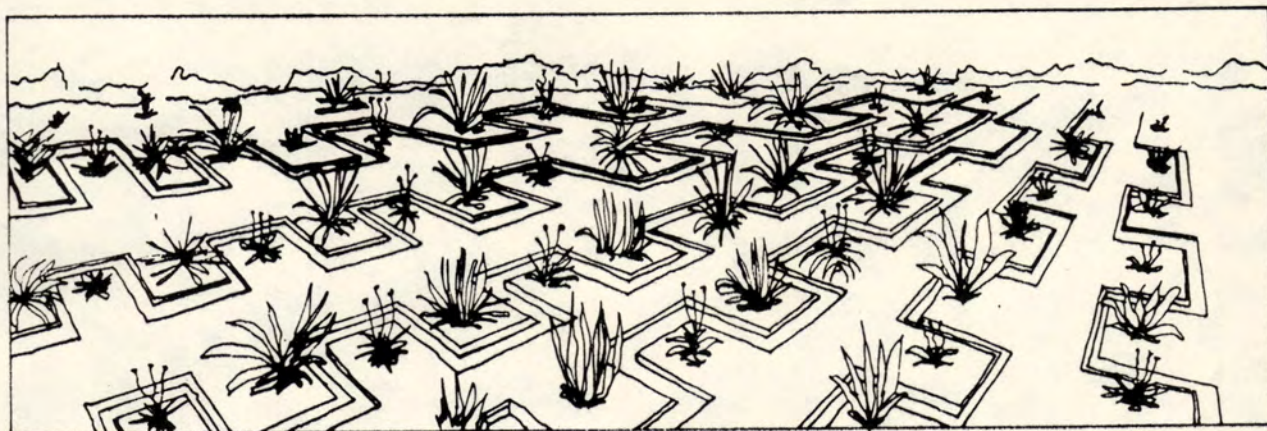


Figura 05- Sistema de sulcos em ziguezague

2.3.2 DESCRIÇÃO DA IRRIGAÇÃO SUPERFICIAL EM SULCOS

Considera-se que o processo completo de irrigação, através de sistemas superficiais com drenagem livre no final das parcelas, ocorra em quatro fases: avanço, armazenamento, depleção e recessão. Esta divisão é escolhida arbitrariamente por comodidade para se descrever o processo de escoamento e a ocorrência de várias condições limites (BASSETT e FITZSIMMONS, 1976). Além disso, a manifestação sequencial das quatro fases consideradas pode ser alterada. Por exemplo, interrompendo-se o fornecimento de água durante a fase de avanço, a fase de armazenamento não se manifesta, e a recessão pode ocorrer simultaneamente ao avanço. Neste caso, a qualidade da irrigação é quase sempre insatisfatória. Ou ainda, a fase de depleção pode ser desprezada, sem erro significativo nos cálculos.

Assim que a água seja introduzida na extremidade mais alta do sulco, começa a fase de avanço, isto é, a água se movimenta na superfície do solo por gravidade, no sentido do declive. Esta fase termina quando a frente de avanço atinge a extremidade final do sulco. Se a adução de água é continuada, o sulco se mantém coberto por uma lâmina d'água em toda a extensão, a fase de armazenamento se inicia [denominada por Bassett como "continuing phase"]. Se o sulco

não for bloqueado no final, começam as perdas de água por escoamento superficial. Se existir dique para prevenir o escoamento, a água então será armazenada. Isto é marcado por um decréscimo na lâmina d'água na extremidade à montante do sulco. A ocorrência de deflúvio superficial nessa extremidade, pode ou não ser caracterizada como perda de água, dependendo de sua eventual reutilização para irrigação. Esta fase deve se prolongar até que a quantidade de água requerida tenha sido repostada ao solo, em considerável extensão da parcela irrigada, através de infiltração, o que determina o encerramento da aplicação da água à parcela, terminando assim a fase de armazenamento e iniciando-se a de depleção. A lâmina d'água terá uma profundidade normal constante (adotando uma vazão de entrada constante) ou diminuirá gradualmente, aproximando-se da profundidade normal. Quase sempre a fase de depleção apresenta curta duração, encerrando-se no momento em que, por escoamento superficial e infiltração, a lâmina d'água for removida da superfície, na extremidade à montante, definindo o início da recessão. Quando a água tiver se escoado totalmente da superfície do solo na extremidade à jusante, então, a fase de recessão e o processo de irrigação terá terminado. Na maioria das vezes, a fase de recessão é muito pequena com a água desaparecendo quase que instantaneamente.

Durante todas essas fases do processo de irrigação por sulcos, a água escoar em duas direções. Por causa da força da gravidade, uma parte da vazão infiltra verticalmente através do fundo do sulco, enquanto que o restante escoar ao longo do plano da superfície do solo, sendo que a água infiltra horizontalmente através das paredes laterais; a lâmina d'água, por sua vez, varia com a distância ao longo do sulco e com o tempo, conseqüentemente, a infiltração da água no solo é também uma função do tempo e da lâmina d'água.

Têm sido dada ênfase a fase de avanço da irrigação por sulcos por causa da sua relativa importância e complexidade. Esta fase é de grande interesse, já que é

responsável pela maioria das não-uniformidades na distribuição final da água infiltrada.

A Figura 06 ilustra curvas típicas de avanço e recessão. A curva de avanço é determinada em função do tempo necessário para a frente líquida atingir diferentes distâncias do ponto de derivação, durante a fase de avanço e a curva de recessão relaciona os tempos e as distâncias correspondentes à condição de lâmina superficial nula.

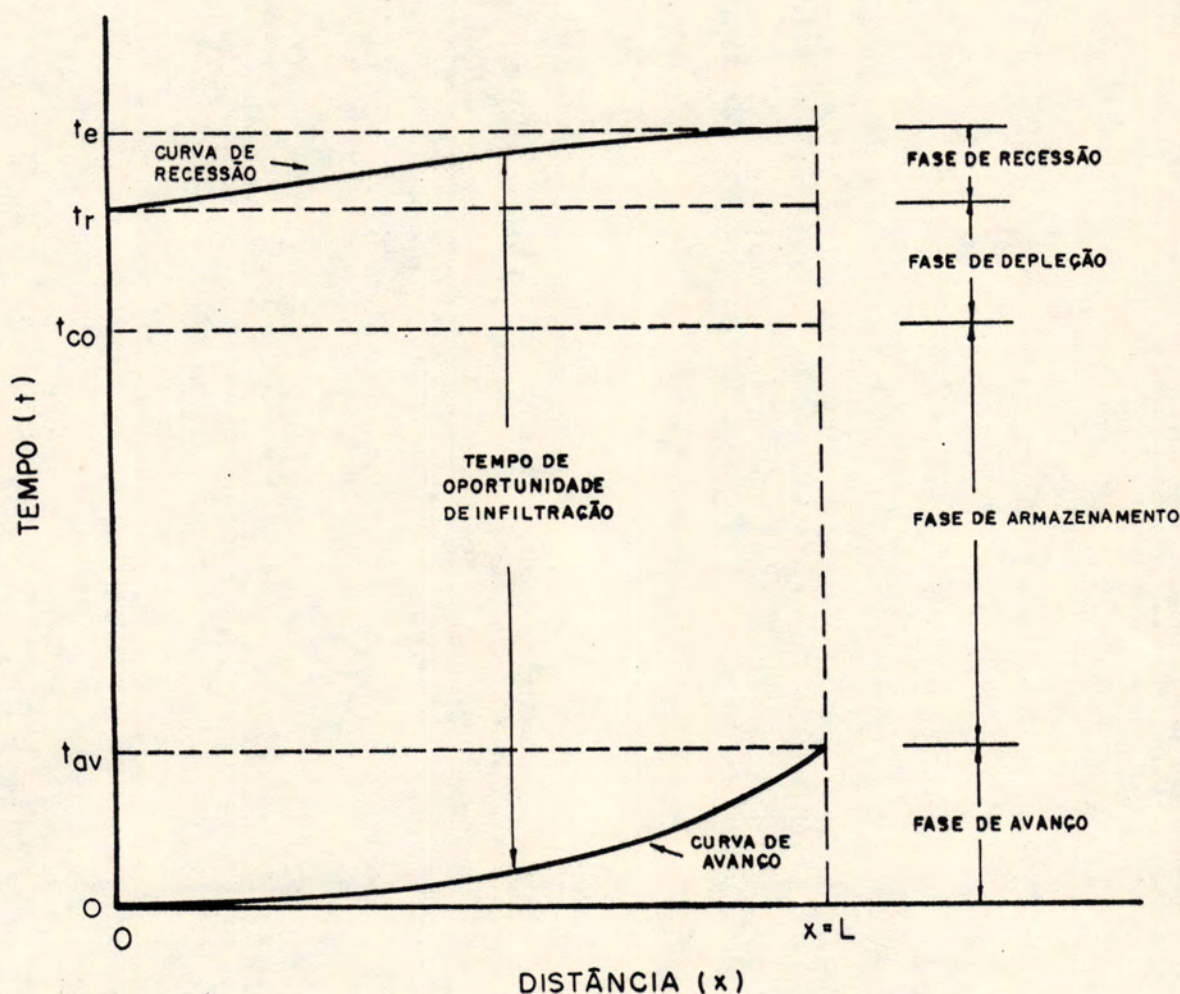


Figura 06- Fases características de um processo típico de irrigação superficial (BASSETT, 1973)

Estas duas curvas constituem duas funções que podem ser modificadas no dimensionamento de sistemas de irrigação superficial, objetivando a obtenção de elevados níveis de eficiência e uniformidade de distribuição da água. O intervalo de tempo decorrido entre as curvas de avanço e recessão determinam o tempo de oportunidade para infiltração ou, simplesmente, o tempo de infiltração para cada ponto considerado. De acordo com SCALOPPI (1986), pequenas variações do tempo de infiltração, ao longo do comprimento da parcela, asseguram elevada uniformidade de distribuição da água. Esta condição implica em curvas de avanço e de recessão aproximadamente paralelas, muito desejáveis para se ter um desempenho satisfatório dos sistemas superficiais.

No escoamento, uma parte da água escoou sobre a superfície e outra infiltra no solo. Esta taxa de infiltração normalmente diminui com o tempo, em cada ponto do campo. Assim, se a vazão de entrada for mantida constante com o tempo, a vazão de escoamento e a lâmina d'água, num dado ponto a jusante, diminuirá gradualmente com o tempo. Por outro lado, a vazão de escoamento, num certo tempo, diminuirá quanto maior for a distância, ao longo do canal. A taxa de avanço da frente de molhamento, necessariamente diminuirá com o tempo e com a distância, assim mais solo fica disponível para absorver água e reduzir a vazão superficial de escoamento.

Segundo JENSEN (1980), além das diferenças na geometria do canal e das condições limite, as características de escoamento básicas são as mesmas em todos os métodos superficiais. A geometria e as condições limite numa irrigação por faixas são matematicamente mais simples do que na irrigação por sulcos. Por esta razão, há mais estudos que analisam o escoamento na irrigação por faixas, e mais conhecimento sobre o que escoou. Hidraulicamente, a irrigação por tabuleiros e por inundação podem ser considerados casos especiais do escoamento por faixas.

A situação de escoamento da irrigação por sulcos é similar a irrigação por faixas, exceto que o canal é estreito, e a influência das paredes do canal no

retardamento do escoamento e infiltração, pode ser significativa.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

A classificação do escoamento na irrigação superficial é complicada, por causa da existência de diferentes regimes de escoamento, em diferentes tempos, em vários locais, numa única irrigação. Por exemplo, enquanto ocorre adução de água, o escoamento no trecho superior do canal é marcado diferentemente no raso, escoamento de baixa velocidade que ocorre durante a recessão e também no fundo, escoamento de baixa velocidade que ocorre quando a água é armazenada na superfície.

A modelagem do escoamento superficial é muito complicada porque se tenta seguir estas mudanças de regime, com o tempo e a distância. Muitos estudos informam terem sido baseados num único regime de escoamento, existente durante a maior parte da irrigação. Assim, se reconhece que a eficácia da descrição pode ser sacrificada nas zonas de escoamento de transição encontradas. Em vista da dificuldade da especificação dos parâmetros, tais como rugosidade e infiltração, provavelmente não se justifica um aperfeiçoamento a este respeito.

O estado do escoamento, no processo de irrigação, é muito parecido ao turbulento, ou ao de transição, sempre com o número de Reynolds bem abaixo de 1000. Já que os números de Froude são normalmente bem abaixo da unidade, o escoamento é tipicamente sub-crítico. Outros tipos de regimes de escoamento parecem ocorrer atrás da frente de molhamento, durante o avanço, na extremidade da frente de recessão, e próximo a certos limites. Os pesquisadores afirmam que pode ocorrer algum erro resultante dos regimes descritos, mas este é muito menor do que os introduzidos com alguma informação de entrada (JENSEN, 1980).

2.3.4 PARÂMETROS DE CAMPO DOS SULCOS

Durante os últimos 20 anos, houveram avanços significativos no entendimento dos princípios físicos e da modelagem matemática da irrigação superficial. Os modelos calculados necessitam de valores para os parâmetros que descrevem as características de rugosidade e infiltração do sulco, o que resultou em numerosas tentativas para se estimar esses parâmetros através de simples testes de campo. Sob condições ideais, tais testes podem fornecer estimativas reais dos parâmetros de campo, que permitem a computação dos modelos para simular fisicamente os aspectos das várias fases da irrigação.

As medidas diretas são preferíveis, mas a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de campo, a dificuldade e despesas com a instrumentação necessária, e a variedade das fórmulas alternativas têm limitado o uso de tais estudos para suprir de dados e efetuar a verificação dos modelos. Desta forma, é mais realista avaliar diretamente as condições de rugosidade e de infiltração pelo monitoramento físico das variáveis medidas, tais como a taxa de avanço e a lâmina d'água. A verificação bem sucedida dos vários modelos matemáticos é atualmente obtida porque adota-se que um conjunto de parâmetros são invariáveis no tempo e no espaço, um fato que tem sido reconhecido como uma super simplificação.

Na prática, é sempre irracional esperar que valores eficazes dos parâmetros de campo sejam avaliados e que possam ser considerados constantes. Obviamente, estimativas imprecisas das propriedades de campo ocasionaram sérias ineficácias na simulação numérica e diminuíram o valor de excelentes modelos matemáticos. De fato, mesmo que os testes de campo sejam realizados antes de cada simulação, não existe garantia de que o modelo computacional reproduza o processo físico corretamente, já que os valores medidos para os parâmetros e os introduzidos no modelo necessariamente não coincidem. As aproximações no modelo matemático e a tolerância dos parâmetros de campo estão

inter-relacionadas de uma forma complicada e essencialmente desconhecida, produzindo finalmente o que é conhecido como uma solução numérica.

2.3.4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO SULCO

Para a modelagem e avaliação da irrigação por sulcos são necessárias informações sobre o perfil dos sulcos. A área da seção transversal é necessária para calcular o armazenamento superficial e a velocidade de escoamento. A profundidade do escoamento é necessária para calcular a elevação superficial da água e ainda, a declividade é usada nos modelos hidráulicos zero-inércia e hidrodinâmicos.

Normalmente, o comprimento dos sulcos varia entre 50 e 300 m, podendo atingir até 600 m ou mais. Os solos mais argilosos, com menor velocidade de infiltração, permitem maiores comprimentos. Mas solos arenosos, em que há uma elevada razão de infiltração, precisam ter sulcos curtos, que reduzam a perda de água por percolação profunda, mesmo restringindo o tempo de avanço da água nos sulcos.

Estas perdas causam o lixiviamento dos nutrientes das plantas da zona radicular, e em alguns solos argilosos podem agravar problemas internos de drenagem. Talvez, a pior consequência da percolação seja que o aumento de água pode encharcar o solo e possibilitar a introdução de problemas de salinidade na zona radicular (WITHERS e VIPOND, 1974).

O comprimento do sulco é um dos fatores mais importantes num projeto de irrigação. A quantidade de mão-de-obra exigida, o custo da irrigação, a perda de áreas de cultivo e a dificuldade de mecanizar a lavoura aumentam, quando o comprimento do sulco diminui. Por outro lado, sulcos muito extensos aumentam as perdas de água, diminuem a eficiência de aplicação e provocam erosão nos períodos de chuva. Normalmente, quanto menor for a infiltração e maior a vazão na cabeceira do sulco, maior deverá ser o seu comprimento. O comprimento dos sulcos é determinado em função de sua declividade, da natureza do solo e da

quantidade de água a ser aplicada, num dado tipo de solo.

As declividades mais indicadas na direção do escoamento variam entre 0,2% e 1%; dificilmente ultrapassam 2%. Quanto mais íngreme a declividade, mais alta a velocidade e mais baixa a lâmina d'água para um dado escoamento e perfil do sulco. Inversamente, quanto menor a declividade, menor a capacidade do sulco e então a necessidade de laterais mais altas.

Segundo SCALOPPI (1986), o gradiente de declive na direção perpendicular ao fluxo pode atingir até 10 ou 15%. Acima destes valores aumenta o risco de transbordamento dos sulcos, o que poderá causar grandes problemas de erosão. Para se evitar estes riscos, quanto maior o gradiente de declive transversal, maior deverá ser a uniformidade do gradiente longitudinal.

Assim como o espaçamento, a forma do sulco depende das características do solo, do equipamento utilizado em sua construção e da cultura que será irrigada. Alterando a forma do sulco, pode-se manter condições de crescimento mais adequadas.

A forma do sulco mais usada é a triangular, apresenta de 20 a 30 cm de largura e de 15 a 20 cm de profundidade. No entanto, não é a mais recomendada. Quando o corte do fundo do sulco é muito pequeno, as primeiras irrigações provocam erosão, o que diminui a profundidade e a seção do sulco. A forma mais indicada é a semi-circular, em forma de U, com maior corte para movimentação da água e menor possibilidade de erosão (SCALOPPI, 1986).

2.3.4.2 PERÍMETRO MOLHADO

O perímetro molhado é um fator importante na simulação da infiltração em sulcos. Normalmente, os modelos assumem o perímetro molhado como sendo constante e só a profundidade de escoamento aumenta com a vazão. Na realidade, os perímetros do sulco não são fixos e podem se tornar maiores à medida que haja um aumento de vazão. Se a largura do sulco aumenta proporcionalmente com a

profundidade do escoamento, o perfil da seção transversal de escoamento permanece constante e só o tamanho aumenta com a vazão. Esses modelos de perfil constante resultam em relações gerais simples entre os parâmetros hidráulicos e geométricos, o que simplifica a análise de complicadas iterações que ocorrem durante a irrigação por sulcos.

Segundo SCHWANKL e WALLENDER (1988), o fato de assumir o perímetro molhado constante implica numa super previsão tanto dos tempos de avanço da água, quanto da uniformidade de aplicação, quando comparadas as simulações que assumem o perímetro molhado variável.

Já TROUT (1991), concluiu que os modelos que utilizam o perímetro constante se comparam melhor aos perfis do sulco medidos em campo e são mais fáceis de explicar conceitualmente. Entretanto, tanto os modelos que assumem o perímetro molhado constante, como aqueles que o assumem como variável, combinam bem as importantes relações entre os parâmetros geométricos e os parâmetros hidráulicos. A relação mais importante entre a área de escoamento e o fator de seção de escoamento uniforme é insensível para ambos os modelos e perfis. Os modelos são mais sensíveis à variação da profundidade na largura máxima de escoamento do sulco, do que ao perfil do mesmo.

Em contraste aos modelos de irrigação por inundação, a profundidade da água em sulcos tem uma influência elementar na infiltração. Se a profundidade do escoamento permanece relativamente constante em toda parte e os parâmetros de infiltração forem medidos para aquela profundidade, o volume infiltrado por unidade de comprimento, calculado no modelo matemático de escoamento em sulcos, dependerá somente do tempo de chegada da água. Mas, um gradiente de profundidade significativo resulta em erro, à menos que a profundidade variável seja incorporada ao cálculo da infiltração.

2.3.4.3 RUGOSIDADE HIDRÁULICA

Semelhantemente as outras situações de canal

aberto, são necessárias algumas medidas de resistência superficial ao escoamento em canais de irrigação. Enquanto a escolha dos valores de rugosidade para as superfícies como, por exemplo canais de concreto, é trivial, a escolha de um valor correspondente para pequenos canais de irrigação é muito menos segura. A descrição da rugosidade em tais canais é complicada porque o escoamento é retardado não somente por causa do leito, mas também por causa da vegetação (normalmente pelo crescimento das plantas). Esta vegetação pode se projetar verticalmente dentro ou através do escoamento da água.

Os efeitos desses elementos de resistência podem variar com o tempo e com a distância, dentro de uma irrigação, com a dissolvição dos torrões de terra, com o inclinamento da vegetação pela força da água, e com as mudanças na profundidade e velocidade da água. A drenagem durante o escoamento também mudará entre as irrigações, assim que o cultivo e o crescimento das plantas ocorrer.

A escolha de uma expressão matemática da rugosidade para o uso em simulações também é incerta, já que nenhuma das expressões comuns foram desenvolvidas expressamente para esta situação específica. Enquanto muitos estudos têm sido feitos para descrever o nível de drenagem local (de acordo com o solo e a vegetação), muitos pesquisadores têm usado e aceito as expressões de rugosidade existentes.

Collins e Bassett (1964), citados por JENSEN (1980), obtiveram resultados satisfatórios usando o fator de atrito "f" encontrado na equação de perda de carga de Darcy-Weisback.

Schreider e Bassett (1967), citados por JENSEN (1980) usaram uma relação empírica para a expressão de Chezy.

ROTH, et al. (1974), executaram um trabalho de pesquisa na Universidade do Arizona, que é útil na identificação da faixa de valores de rugosidade que podem ser encontrados em canais vegetados e não-vegetados.

BASSETT e FITZSIMMONS (1976) desenvolveram um

modelo do processo completo de irrigação por faixas, no qual a rugosidade superficial pode ser representado tanto pelo coeficiente "n" de Manning, quanto pelo Sayre-Albertson Chi.

KATOPODES e STRELKOFF (1977a) e KATOPODES e STRELKOFF (1977b) também obtiveram resultados satisfatórios com o coeficiente "n" de Manning.

Felizmente, estudos sugerem que o retardo superficial não é importante na determinação da performance da irrigação, assim como outras variáveis independentes. Desse modo, é evidente que tenham sido obtidos resultados satisfatórios com tais expressões comuns, como o coeficiente "n" de Manning, e a modelagem do trabalho pode seguir efetivamente, enquanto estão sendo desenvolvidas expressões de rugosidade aperfeiçoadas. A escolha dos valores de rugosidade específicos, provavelmente permanecerá dependendo sobretudo da experiência.

2.3.4.4 INFILTRAÇÃO

Infiltração é o fator mais importante que afeta a irrigação superficial. Este único parâmetro controla essencialmente não apenas a quantidade de água que entra no reservatório de armazenagem de água do solo, mas também a taxa de avanço do escoamento sobre terra.

O conhecimento das características de infiltração do solo é fundamental para o engenheiro avaliar, projetar ou gerenciar um sistema de irrigação superficial. Sem esta informação, é muito difícil julgar eficazmente a performance do sistema, a eficiência de aplicação e sua uniformidade (WALKER e WILLARDSON, 1983).

Os modelos matemáticos de irrigação por sulcos têm descrições da infiltração bem mais complexas do que os modelos de irrigação por inundação. Nos de inundação, os efeitos da profundidade foram descritos por STRELKOFF e SOUZA (1984) como sendo mínimos; com uma dada estrutura do solo, as mudanças na profundidade superficial da água afetam somente os gradientes hidráulicos, conduzindo a água dentro do solo. Já que muitos desses gradientes provêm de altas

pressões negativas nos poros, no solo não saturado à montante da frente de umidade, mesmo as grandes variações na profundidade superficial afetam bem pouco as taxas de infiltração.

A infiltração é um processo complexo que depende sobretudo das propriedades do solo, propriedades físicas e hidráulicas, da umidade inicial do solo, da história de molhamento (prévio), das mudanças de permeabilidade devido ao movimento da água superficial e da influência do ar. Para as superfícies irrigadas, a função infiltração muda dramaticamente para cada evento de irrigação. Um exemplo típico dessa variação é mostrado na Figura 07. Para um certo campo irrigado superficialmente, a função infiltração depende essencialmente das práticas de cultivo, do tipo de plantação e dos efeitos climáticos (WALKER e SKOGERBOE, 1984).

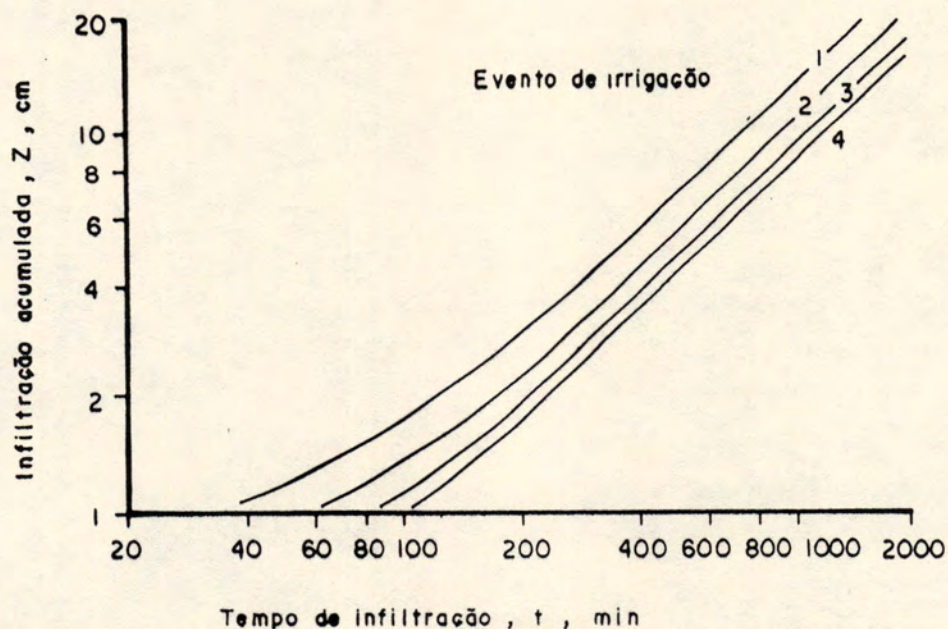


Figura 07- Exemplo de variação periódica na infiltração acumulada, Z, para eventos de irrigação (WALKER e SKOGERBOE, 1984)

Na Figura 08 são mostradas curvas típicas da taxa de infiltração "I", e da infiltração acumulada "Z". Num solo inicialmente seco, a taxa de infiltração tem um valor inicial muito alto, mas decresce rapidamente com o tempo, até que seja atingida uma taxa de infiltração quase constante. Segundo WALKER e SKOGERBOE (1984), esta taxa de infiltração constante é sempre considerada como uma taxa de infiltração básica e próxima do valor da condutividade hidráulica da superfície do solo.

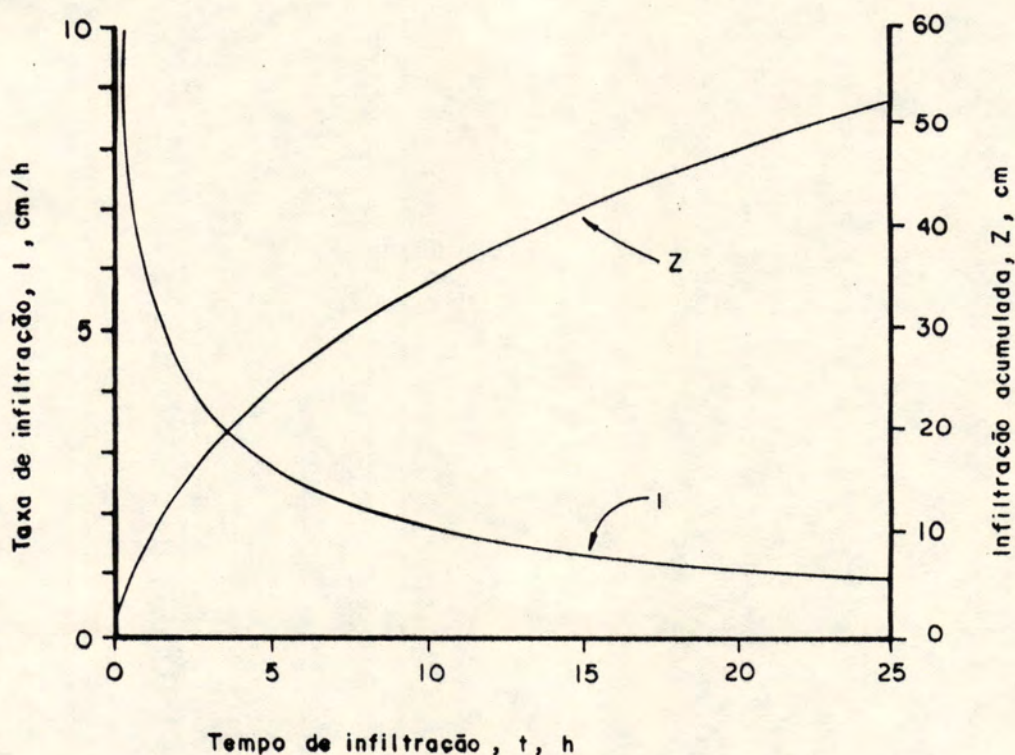


Figura 08- Exemplo da taxa de infiltração, I, e infiltração acumulada, Z (WALKER e SKOGERBOE, 1984)

Conforme JENSEN (1980), a infiltração pode envolver o movimento vertical da água no solo em uma dimensão, tal como ocorre durante a irrigação por aspersão ou na irrigação por inundação; o movimento da água em duas dimensões, tal como o escoamento num sulco de irrigação; ou em três dimensões, tal como o escoamento numa irrigação por gotejamento.

A infiltração numa irrigação por sulcos envolve o movimento da água no solo nas direções vertical e lateral. Dessa forma, o escoamento da água num sulco de irrigação, dentro do perfil do solo, é conhecido como sendo um fenômeno de infiltração em duas dimensões, estudado por muitos pesquisadores.

As características de infiltração permanecem um desafio na avaliação e projeto dos sistemas de irrigação por sulcos, assim como nos de inundação. Os benefícios da modernização dos sistemas de irrigação superficial, incluindo o controle de escoamento e o nivelamento à laser, só serão realizados com o aperfeiçoamento do conhecimento da função infiltração-tempo (RENAULT e WALLENDER, 1992). Um entendimento melhor da teoria hidráulica da irrigação superficial poderá auxiliar o desenvolvimento de métodos mais curtos de estimativa das funções de infiltração, provenientes do avanço da água, através do campo.

Normalmente, as tentativas para caracterizar a infiltração em aplicações de campo têm envolvido conceitos simplificados, que permitem que a taxa de infiltração ou volume de infiltração acumulado, seja expresso algebricamente em função do tempo e de certos parâmetros do solo (JENSEN, 1980).

Já que a taxa de infiltração tem um efeito marcante na performance do sistema, isso justifica o cuidado na escolha apropriada das constantes. Deve-se dar atenção ao fato de que a taxa de infiltração pode mudar substancialmente dentro de um único campo, dentro de uma estação de crescimento e entre estações, tais como mudança de plantações (JENSEN, 1980).

Um problema comum de todas as medidas de infiltração é que elas são bastantes específicas e um tanto únicas para faixas particulares do solo, atmosfera e condições de escoamento. Muitas vezes isto pode ser adequado nos projetos para condições de escoamento máximo, mas apresenta algumas dificuldades na caracterização atual das funções de infiltração para operações diárias, especialmente em solos erosivos. Consequentemente, é sempre necessário

ajustar os parâmetros do sistema de irrigação a priori, apesar de que a estação muda as condições de infiltração. Para serem úteis, estes parâmetros de infiltração devem ser representativos das condições médias de campo.

A uniformidade da profundidade de água infiltrada para a irrigação é um fator importante que afeta a plantação e o uso eficiente da água. Geralmente, quanto menor a taxa de infiltração, mais simples é de se obter uma irrigação uniforme. Para os sistemas de irrigação superficial, tais como sulcos, a uniformidade depende das características hidráulicas do sistema, assim como a variabilidade espacial das características de infiltração no solo. As variáveis hidráulicas importantes para a infiltração por sulcos são a vazão de entrada, o comprimento do canal, o tempo de corte, a rugosidade superficial e a declividade (YITAYEW, et al., 1985).

Várias equações teóricas empíricas, funções de infiltração, foram desenvolvidas para caracterizar as condições de campo e incorporar os efeitos de variabilidade do solo. Algumas das funções empíricas mais comuns para a infiltração acumulada são:

$$\text{Kostiakov-Lewis} \quad : \quad Z = K.t^a \quad (1)$$

$$\text{Equação SCS} \quad : \quad Z = K.t^a + c \quad (2)$$

$$\text{Kostiakov modificada} \quad : \quad Z = K.t^a + c.t \quad (3)$$

$$\text{Equação de Phillip} \quad : \quad Z = K.t^{0.5} + c.t \quad (4)$$

onde Z = volume infiltrado acumulado, por unidade de área, m^2 ;

t = tempo de infiltração, min;

K , a , e c = coeficientes empíricos.

Os parâmetros destas equações não têm interpretação física e devem ser avaliados de dados experimentais.

Existem numerosas outras equações de infiltração empíricas, tais como a de HORTON (1940) e COLLIS-GEORGE e FREEBAIRN (1979), que são menos usadas, principalmente por causa da necessidade de dados específicos. A equação de

Kostiakov-Lewis (KOSTIAKOV, 1932; LEWIS, 1937), referida sempre como Equação de Kostiakov, provavelmente é a forma de função de infiltração mais utilizada.

A característica mais óbvia do processo de infiltração é que a vazão diminui rapidamente com o tempo, no decorrer do evento de infiltração. Apesar de ser atribuído a diferentes fenômenos físicos, esta característica é refletida por todas as equações aproximadas da infiltração (JENSEN, 1980).

Green e Ampt (1911), citados por EVANS, et al. (1990) foram os primeiros a propor uma teoria física, uma função de infiltração derivada analiticamente, mas foi difícil aplicar em situações de campo. Consequentemente, foram desenvolvidas várias equações teóricas empíricas para caracterizar as condições de campo e incorporar os efeitos de variabilidade do solo.

Bodman e Coleman (1943), citados por JENSEN (1980) e WALKER e SKOGERBOE (1984), foram os primeiros a apresentar a distribuição de água, durante a infiltração, num solo relativamente seco e com perfil uniforme. Eles mostraram que o perfil de umedecimento poderia ser dividido em quatro zonas mostradas esquematicamente na Fig 09. A zona saturada se estende da superfície a uma profundidade máxima de aproximadamente 1,5 cm. A zona de transição, uma região de rápido decréscimo de volume de água no solo, se estende da zona de saturação até a zona de transmissão, uma zona de volume de água aproximadamente constante, que se prolonga até o término da infiltração. A zona de umedecimento mantém um perfil quase constante durante a infiltração e culmina na frente de umidade, que é um limite visível de penetração da água no solo. Embora haja controvérsias, pode-se dizer que, em muitos casos, o solo não será completamente saturado na superfície, por causa do efeito do ar e a sua possível resistência ao escoamento. Muitas teorias sobre o movimento da água no solo não preveem a zona de transição.

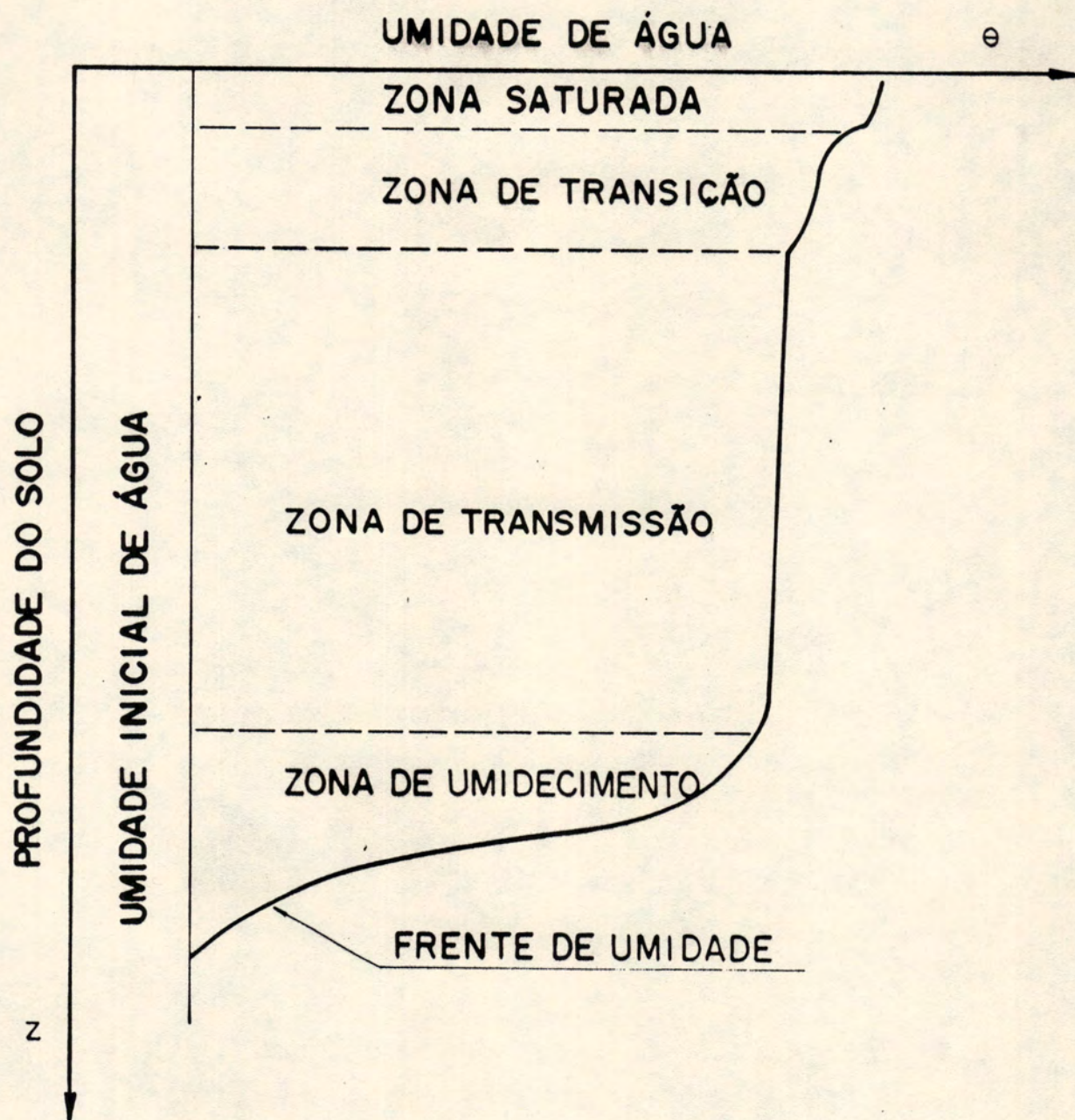


Figura 09- Perfis de umedecimento do solo durante a infiltração (BODMAN e COLEMAN, 1943)

Willians, Doneen e Ririe (1957), citados por EVANS, SMITH, MITCHELL e NEWTON (1990), desenvolveram uma técnica onde a medida da vazão de entrada é a diferença, no escoamento, entre as vazões na parte mais baixa e a mais alta do sulco. Esta aproximação ficou conhecida como técnica de entradas e saídas.

Bondurant (1957), citado por EVANS et al. (1990), constatou, estudando o escoamento da água num dado comprimento de sulco, que a infiltração era determinada mais eficazmente pelas medidas de entrada e saída.

Shockley et al. (1959), citados por EVANS et al. (1990), aplicaram a aproximação de entradas e saídas de Willians, Doneen e Ririe (1957) com medidas de escoamento aperfeiçoadas.

WILLARDSON e BISHOP (1967), mostraram que é relativamente fácil de se obter eficiências de aplicação da água acima de 60% para uma larga faixa de vazões em sulcos, ou para certas condições de avanço da água em canais. As eficiências atingem mais que 70% em solos mais argilosos, com menor velocidade de infiltração. Estes valores de eficiência de aplicação da água são resultado de uma irrigação sobre todo o campo, sem recorrer a ajustes para reduzir o escoamento superficial.

Se a água do escoamento puder ser recuperada e se a capacidade de armazenamento da zona radicular não for excedida, a eficiência de aplicação da água pode superar 80%. A mudança das características de infiltração do solo com o tempo, muitas vezes complica o problema da obtenção da eficiência da aplicação de água.

As irrigações curtas tendem a ser menos eficientes que as longas, por causa da baixa uniformidade de distribuição. Outro fator que afeta a eficiência é a variação real da capacidade de armazenamento de água no solo, que é resultado de aplicações prévias não-uniformes de água.

Bartells (1968), citados por EVANS, SMITH, MITCHELL e NEWTON (1990), apresentou dados de campo de volume infiltrado após 2 horas, e as vazões finais de entrada para vários anos, medidas por infiltrômetros cilíndricos, em pastos irrigados, nas terras roxas do Vale de Goulburn.

McWhorter (1976), citado por JENSEN (1980), mostrou que se for considerado o efeito do ar, poderia-se prever, para a infiltração por precipitação, uma diminuição abrupta no perfil da água, próximo a superfície, justificando, dessa forma, a existência da zona de transição.

Miller e Rasmeissen (1978), citados por EVANS et al (1990), usaram um conceito similar para medir simultaneamente vários grupos de sulcos.

SCS - Furrow Irrigation, Soil Conservation Service (1979), citado por EVANS, SMITH, MITCHELL e NEWTON (1990), propôs uma variação da Equação de Kostiaikov-Lewis, adicionando o termo constante "c". O SCS fixou este termo como sendo 1.6 l/m, mas ele também pode ser estabelecido pelas famílias de textura do solo, ou determinado por dados de campo. O valor de "c", na Equação SCS, é interpretado como sendo o "volume de infiltração cedido", ou a quantidade de água que preenche os macroporos e fendas superficiais.

Collis-George e Freebairn (1979), citados por EVANS et al. (1990), também se referiram a este conceito de volume de fendas como "armazenamento instantâneo". O termo "c" também incorpora erros de medida e outras causas de desvios significativos nas taxas de avanço do sulco. Usaram infiltrômetros e um canal de laboratório para desenvolver as funções de infiltração empíricas para limites classificados, em terra roxa. Indicaram que em solos erosivos, o avanço é essencialmente linear. Sobre estas condições, o balanço volumétrico aproxima os resultados na equação de infiltração

quase linear, que é mais sensível as mudanças nos volumes de fenda, do que à infiltração.

Collis-George (1980), citados por EVANS et al. (1990), usaram infiltrômetros e um canal de laboratório para desenvolver as funções de infiltração empíricas para limites classificados, em terra roxa.

ELLIOTT e WALKER (1982), na tentativa de aumentar as eficiências de aplicação dos sistemas de irrigação por sulcos, empreenderam um grande número de medições da taxa de infiltração e volumes infiltrados, utilizando os cilindros concêntricos e o infiltrômetro de sulco bloqueado. Os autores afirmaram que a eficiência de aplicação é limitada pelas grandes variações espacial e temporal, das características de infiltração. Enquanto são divulgadas periodicamente eficiências de 85 a 90%, a partir de estudos com cuidadoso monitoramento da umidade atual do solo e emprêgo da automação, esses índices geralmente não ultrapassam 50 ou 60%. Eles determinaram, ainda, que a Equação de Kostiaikov modificada fornece uma função mais representativa, já que ela permite uma taxa de infiltração básica com o termo " $c \times t$ ". A Equação de Phillip (PHILLIP, 1954) fixa o valor do coeficiente "b" como 0,5, entretanto, ela é basicamente equivalente à Equação de Kostiaikov modificada.

Mehanni e Bleasdale (1983), citados por EVANS et al. (1990), apresentaram valores do expoente "a", das equações de infiltração, obtidos por infiltrômetros, em baías.

ELLIOTT et al. (1983) apresentaram um método para utilizar dados de campo, juntamente com curvas de avanço adimensionais, para determinar a função de infiltração numa irrigação por sulcos. Os dados de campo necessários foram a taxa de avanço, a vazão de entrada para o sulco, a declividade do sulco, a relação entre a lâmina de escoamento

e a área de escoamento da seção transversal, e a lâmina de escoamento atual no início do sulco, ou próximo a ele. Esta metodologia foi aplicada na análise de dados de campo de três fazendas do Colorado. Para os dados estudados, os autores concluíram que a equação de infiltração de Kostiaikov modificada descreveu melhor a infiltração num sulco do que a equação de Kostiaikov. Num solo franco arenoso, a compactação teve um efeito marcante na infiltração, sendo que os sulcos mais compactados exibiram taxas de infiltração menores.

IZADI e WALLENDER (1985) compararam, através de uma teoria estatística clássica e regionalizada, a influência da taxa de escoamento variando temporalmente com a lâmina d'água superficial, com infiltrações medidas, com a rugosidade do sulco e com a geometria deste. Os autores concluíram que a rugosidade do sulco diminui mais para o escoamento em que as condições estão estáticas e em que existe uma forte correlação entre as rugosidades inicial e final.

Tisdall e Adem (1986), citados por EVANS et al. (1990), usaram um infiltrômetro num sulco com a extremidade bloqueada, em terras roxas, mas só apresentaram o volume infiltrado depois de 3 e 24 horas.

Somers (1987), citado por EVANS, SMITH, MITCHELL e NEWTON (1990), mediu o movimento lateral da água em sulcos artificiais, com alguns dados de campo coletados em terras roxas.

SINGH et al. (1987) desenvolveram modelos de infiltração para 1, 2 ou 3 dimensões em sulcos de irrigação semi-circulares, usando uma equação de energia e a lei de Darcy. Estes modelos poderiam ser usados para modificar os modelos de infiltração que dependem da equação de energia de Bernoulli, tais como o de GREEN-AMPT (1911).

Maheshwari et al. (1988), citados por EVANS et

al. (1990), desenvolveram uma equação de infiltração usando uma técnica de otimização para fixar a função de infiltração. Estas funções foram determinadas por meio de uma aproximação do balanço volumétrico, obtidos de dados de campo avaliados para vários tipos de solo, um dos quais a terra roxa.

Rengasamy e Mehanni (1988), citados por EVANS et al. (1990), mediram a infiltração ocorrida após 150 min com infiltrômetros, em pastos irrigados, sobre limites classificados. As taxas de infiltração básicas foram da ordem de 4 a 10 mm/hora, dependendo da quantidade de água aplicada e dos níveis de salinidade do solo.

TROUT e MACKEY (1988a) também usaram a técnica de entradas e saídas, porém com medidas de escoamento aperfeiçoadas. Concluíram que a variabilidade da infiltração acumulada geralmente é bem menor do que as taxas de infiltração e que a redução depende somente da relação de infiltração do solo.

TROUT e MACKEY (1988b) analisaram a sensibilidade da infiltração medida pela técnica de entradas e saídas, e indicaram a eficácia das medidas de infiltração encontradas e métodos para maximizar esta eficácia. Concluíram que a incerteza, na determinação da taxa de infiltração aumenta rapidamente, a medida que a quantidade de água que infiltra diminui.

SINGH e YU (1990) usaram sistemas de aproximações para desenvolver um modelo de infiltração geral; mostraram as várias equações de infiltração publicadas na literatura como sendo casos especiais do modelo geral; mostraram as relações entre alguns destes modelos de infiltração e desenvolveram uma solução explícita do modelo de HORTON (1940). Este estudo também apresentou uma análise de primeira ordem das incertezas e um método simples para a estimativa dos parâmetros do modelo.

EVANS et al. (1990) apresentaram um método de medida da infiltração denominado RFI. A vantagem desse método, segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) é que ambas as condições geométricas e hidráulicas são incluídas, e as análises são simplificadas por outros métodos. O Método RFI tem sido usado por numerosos pesquisadores e agências de governo na irrigação por sulcos, normalmente em sulcos com comprimentos relativamente curtos (isto é, de 1 a 5m), e os resultados se comparam satisfatoriamente com os outros métodos de medida de infiltração.

VOGEL e HOPMANS (1992) desenvolveram um modelo de escoamento de duas dimensões, através de elementos finitos, usado para simular a infiltração numa irrigação por sulcos. Os valores medidos e os simulados foram bastante semelhantes em três eventos de irrigação, mas significativamente diferentes no quarto evento. As causas dessas discrepâncias foram estudadas como sendo: (1) A infiltração num sulco seco adjacente, comparado a um sulco adjacente com água; (2) Os efeitos de um decréscimo na condutividade hidráulica, na infiltração acumulada; (3) A influência da mudança de nível de água do sulco, na infiltração e (4) Diferenças entre os perfis de solo homogêneos e heterogêneos.

CHILDS et al. (1993) mediram a infiltração numa plantação de algodão, na região norte do Vale San Joaquin, na Califórnia, através de infiltrômetros. Eles quantificaram espacialmente e temporalmente a variação das condições de infiltração no campo, durante a estação. As condições e a variabilidade da infiltração foram maiores para as irrigações realizadas antes do plantio do que as irrigações realizadas depois deste, e a variabilidade do solo contribuiu mais para a variabilidade do volume infiltrado do que para a variabilidade do tempo de infiltração.

BAUTISTA e WALLENDER (1993) examinaram o cálculo do perímetro molhado, dependente da vazão de entrada, num modelo de simulação da irrigação por sulcos, usando uma

fórmula de infiltração empírica.

2.4 MODELO MATEMÁTICO DE IRRIGAÇÃO SUPERFICIAL

Os modelos de irrigação superficial empregam os princípios da Mecânica dos Fluidos para resolver a fase de avanço da irrigação superficial e se dividem em quatro categorias: o hidrodinâmico completo (KATOPODES e STRELKOFF, 1977); o de inércia zero (STRELKOFF e KATOPODES, 1977); o de onda cinemática (CHEN, 1970) e o de balanço volumétrico (LEWIS e MILNE, 1938).

Segundo KARMELI (1978), a distribuição da água num campo irrigado pode ser calculada utilizando-se medidas de campo, se for estabelecido o seguinte:

- (1) taxa de avanço da frente de umidade;
- (2) características de infiltração do solo e
- (3) taxa de recessão da água.

O fenômeno de escoamento dos fluidos por gravidade em sulcos, é um caso de escoamento em canais abertos, não-permanente e gradualmente variado, sobre um leito poroso e rígido, com taxa de infiltração variável. Ele apresenta um problema complexo na análise teórica, devido à variação na taxa de infiltração do solo e devido as mudanças no perfil superficial da água, na superfície do solo.

Geralmente os estudos da fase de avanço em faixas e sulcos se dividem em dois grupos. Num deles, a aproximação hidrodinâmica, a análise se baseia de alguma forma nas equações de escoamento contínuo espacialmente variado, deduzidas por Saint-Venant, um matemático francês que trabalhou no século XIX. No outro grupo, são usadas aproximações mais simples, por balanço volumétrico.

2.4.1 MODELOS HIDRODINÂMICOS COMPLETOS

A aproximação hidrodinâmica se baseia nas equações diferenciais parciais da Continuidade e Quantidade de Movimento (Equações 5 e 6, respectivamente), conhecidas como equações de Saint-Venant e relacionam a profundidade de

escoamento e velocidade de escoamento em canais abertos de forma arbitrária.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{D \cdot V_i}{g \cdot A} \quad (6)$$

onde x = distância, m;

t = tempo, min;

Q = vazão de escoamento, m³/s ou na irrigação por faixas, m²/s;

A = área da seção transversal do escoamento, m²;

$\frac{\partial Z}{\partial t}$ = taxa de volume da infiltração, por unidade de comprimento do canal, m/s;

g = aceleração da gravidade, m/s²;

V = Q/A = velocidade média na seção transversal do escoamento, m/s;

y = lâmina d'água, m;

S₀ = declividade do fundo do sulco, m.m⁻¹;

S_f = declividade da linha energética, m.m⁻¹;

D = constante do termo de infiltração dinâmica da equação da Quantidade de Movimento.

Essas equações diferenciais não-lineares, do tipo hiperbólicas, não podem ser resolvidas diretamente, entretanto, podem ser obtidas soluções aproximadas através de soluções numéricas.

STRELKOFF (1970) classificou as soluções aproximadas das equações de Saint-Venant em quatro categorias:

(1) desenvolvimento do Método das Características;

(2) diferenciação finita explícita das equações características numa rede retangular, no plano x-t;

(3) direta, por diferenciação finita explícita das equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, numa malha retangular;

(4) direta, por diferenciação finita implícita das equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, numa malha

retangular.

Atualmente, três técnicas para as soluções numéricas são empregadas com sucesso: o método das características, integração em células retangulares e integração em células oblíquas.

Têm sido estudadas soluções gráficas desde a virada do século, mas foi o advento de computadores digitais eletrônicos em larga escala que propiciaram o desenvolvimento dessas técnicas, para soluções numéricas rápidas e rotineiras. As soluções analíticas têm sido obtidas somente para casos restritos e simplificados.

Os modelos hidrodinâmicos servem como um padrão para avaliação e calibração dos métodos mais simples, quando as informações experimentais não são seguras ou não existem; porém, eles são complexos e onerosos. Esses modelos, para servirem como base de comparação à outros, de acordo com KATOPODES e STRELKOFF (1977), deveriam ser:

- (1) teóricamente corretos, baseados em equações hidrodinâmicas completas e totalmente livres de parâmetros arbitrários ou empíricos;
- (2) numericamente consistentes, estáveis e eficazes para altas ordens;
- (3) fisicamente completos, isto é, capazes de simular todas as fases da irrigação superficial;
- (4) simples de programar e econômicos para operar.

KATOPODES e STRELKOFF (1977) afirmaram não ter conhecimento da existência de modelos que possuíssem todas as características descritas.

Os modelos hidrodinâmicos apresentam como desvantagens a extensiva programação em computador e o considerável tempo de processamento para a solução numérica das equações diferenciais.

Em muitas situações práticas de projeto, não se deseja a utilização de computadores em grande escala, mesmo quando eles estão disponíveis. Por outro lado, principalmente por causa da grande complexidade geométrica da superfície natural do solo e da vegetação, a estrutura granular do solo e os efeitos da umidade antecedente, é

muito difícil de especificar, para um dado canal, parâmetros como a rugosidade hidráulica, o arrasto da vegetação e as características de infiltração. Nos modelos hidrodinâmicos tenta-se evitar este problema, adotando-se que todas as variáveis sejam conhecidas, para se obter a precisão necessária (KATOPODES e STRELKOFF, 1977).

A precisão dos resultados para simular situações reais depende, portanto, da validade dos dados requeridos pelos modelos para representar o processo, ou dos parâmetros envolvidos nos cálculos (STRELKOFF, 1977). Considerando-se todos esses fatores, não se justifica o emprego de modelos hidrodinâmicos completos, no uso rotineiro de dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação superficial. Porém, os modelos hidrodinâmicos, segundo BASSETT e FITZSIMMONS (1976), podem ter outras aplicações como, na previsão do desempenho de um determinado sistema de irrigação superficial sob várias combinações de variáveis, objetivando a elevação dos níveis de eficiência; na avaliação de modelos matemáticos mais simplificados, ou mesmo métodos gráficos, aritméticos ou adimensionais; e no aspecto didático envolvido.

2.4.2 MODELOS INÉRCIA ZERO

As aproximações pelo método inércia zero são uma boa alternativa para o complexo modelo hidrodinâmico completo, sobre velocidades de escoamento baixas, tais como aquelas que ocorrem na irrigação superficial. Sobre tais condições, os termos inerciais da equação da aceleração parecem ter pouco efeito nos resultados finais. KATOPODES e STRELKOFF (1977a) mostraram que quando o número de Froude é menor que 0,10, pode-se assumir a velocidade como sendo nula, com um erro insignificante (menor do que 1%). CLEMMENS (1978 e 1979) demonstrou que esta suposição é razoável, porque o número de Froude de muitos sistemas por canais estão abaixo de 0,3, além do que as forças que agem na vazão superficial estão essencialmente em balanço.

Por esta hipótese, os termos que representam as

acelerações local $(\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t})$, convectiva $(\frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x})$ e, devido aos efeitos da infiltração $(\frac{D}{g} \cdot \frac{V_i}{a})$, na equação geral da Conservação da Quantidade de Movimento, podem ser desprezados e a Eq. (6) pode ser simplificada.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (7)$$

Considerando-se as pequenas lâminas d'água encontradas na irrigação superficial, o gradiente de profundidade $\frac{\partial y}{\partial x}$ é bem menor que a declividade do fundo do sulco (S_o) ou do que a declividade da linha energética (S_f). Assim sendo, estes últimos estão em balanço e a Eq. (7) pode ser reescrita como

$$S_o = S_f \quad (8)$$

podendo-se aplicar a equação de Manning para o escoamento uniforme,

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \quad (9)$$

e a equação da área hidráulica (ELLIOTT, WALKER e SKOGERBOE, 1982),

$$A^2 \cdot R^{4/3} = d \cdot A^f \quad (10)$$

O uso da aproximação por inércia zero, assim como as outras, limitou-se inicialmente à irrigação por inundação (STRELKOFF e KATOPODES, 1977b). Desenvolvimentos posteriores consideraram apenas a fase de avanço da irrigação contínua por sulcos (ELLIOTT et al. 1982). Os autores utilizaram a técnica de linearização das equações diferenciais, na solução das mesmas através de métodos numéricos e concluíram que os resultados não foram significativamente afetados por essa versão linearizada do modelo inércia zero e, por fim, que o modelo pode simular efetivamente a fase de avanço da irrigação por sulcos. Este procedimento tem a grande

vantagem de reduzir apreciavelmente o tempo de processamento e a utilização da memória do computador, reduzindo assim, o custo de simulação.

O modelo de SOUZA (1981) apresentou dados comprovando a inexpressiva contribuição dos termos inerciais no resultado final da irrigação em sulcos de infiltração.

Numerosos estudos tem mostrado que a abordagem "inércia-zero" simula precisamente e eficientemente o relacionamento hidráulico da irrigação por inundação. A hipótese utilizada na análise inércia-zero (isto é, o desprezo das acelerações da água), também é válida para o escoamento em sulcos, devido a semelhança de fluxo. Entretanto, o estudo dos sulcos é complicado por causa da geometria do canal, que dita o relacionamento entre as profundidades do escoamento, o perímetro molhado e a seção transversal da área de escoamento. Estes fatores também afetam as características de entrada do sulco (ELLIOTT, WALKER e SKOGERBOE, 1982).

Em seu estudo, WALLENDER e RAYEJ (1985), concluíram que os modelos inércia zero descrevem a irrigação por sulcos mais eficazmente do que os modelos de balanço volumétrico e de onda cinemática, para declividades quase planas, sem incluir os termos inerciais, considerados nos modelos hidrodinâmicos completos.

SCHMITZ e SEUS (1992) relataram que os modelos inércia zero necessitam de uma programação extensiva e considerável tempo de processamento para as suas soluções numéricas (ELLIOTT et al., 1982; RAYEJ e WALLENDER, 1987), mesmo assim, JAYNES (1992) o classificou como sendo a melhor aproximação para a modelagem da irrigação superficial, sobre uma larga faixa de condições e pelo fato de que seus resultados concordam satisfatoriamente com aqueles observados em campo.

2.4.3 MODELOS DE ONDA CINEMÁTICA

A onda cinemática foi descrita por Lighthill e Whitham (1955), citados por SMITH (1972), como sendo uma onda

cujas propriedades podem ser descritas por uma equação da Continuidade e uma relação entre o armazenamento e a vazão, definida pela eq. (9), a equação de Chezy ou Gauchler-Manning.

O método de onda cinemática é usado há muito tempo, cêrca de seis décadas, como uma técnica para prever o movimento do fluxo em rios, mas somente a três décadas passou a ser utilizado como uma ferramenta para resolver o problema da irrigação superficial. O modelo de onda cinemática, para a irrigação por inundação, foi formulado e discutido por SHERMAN e SINGH (1978, 1982) (SINGH e RAM, 1984).

De acôrdo com CHEN (1970), a principal característica do modelo matemático pelo método de onda cinemática, que difere do modelo chamado cinemático, ou aproximações por balanço volumétrico (assim denominado por HART, BASSETT e STRELKOFF, 1968), é que uma equação da aceleração simplificada, uma fórmula de escoamento uniforme, é incorporada às equações da Continuidade para os escoamentos superficiais e sub-superficiais, na formulação do modelo. Quando se usa a equação da aceleração, apesar de sua generalidade ou simplicidade na expressão, é levado em consideração o comportamento dinâmico do movimento da água, na superfície do solo.

Ou ainda, JENSEN (1980) afirmou que quando a relação profundidade-vazão está baseada na profundidade normal, o resultado é denominado "modelo de profundidade normal", que conhecemos como balanço volumétrico. Já uma relação entre a profundidade e a vazão unidas numa equação de conservação do volume, resulta num modelo de onda cinemática.

Segundo SINGH e RAM (1984) existem dois tipos de solução para a onda-cinemática: (a) analítico e (b) numérico. As soluções analíticas tem sido propostas considerando uma vazão de entrada constante e infiltração constante; já que raramente a vazão de entrada e a infiltração são contantes, estas soluções tem valor limitado para o projeto de irrigação. Pelo fato das soluções

numéricas terem sido obtidas para infiltração e vazão variáveis, em função do tempo, elas são complicadas e onerosas (RAM et al., 1986).

A aproximação por onda cinemática tem sido usada com sucesso nos estudos de escoamento sobre terra. Unindo-a a infiltração variável, pode-se obter modelos de irrigação fisicamente realistas. Muitos dos trabalhos relatados na literatura usaram modelos de onda cinemática, resolvidos numericamente e envolvendo a equação de Kostiaikov.

Felo fato do modelo de onda cinemática ser uma simplificação do hidrodinâmico, onde a equação da aceleração se reduz ao conhecido escoamento permanente, identificado entre as declividades do fundo e da linha energética, SCHMITZ e SEUS (1992) afirmaram que, para o caso da irrigação por sulcos, estes modelos também envolvem soluções numéricas dispendiosas.

RAYEJ e WALLENDER (1988) concluíram em seu estudo que a solução do modelo de onda cinemática por intervalos de tempo, com funções de infiltração variando espacialmente e o perímetro molhado variando com o tempo, simula a irrigação por sulcos mais eficientemente do que os modelos de onda cinemática com solução espacial, pois ele estima mais eficientemente o avanço, a uniformidade e a infiltração média. Assim, são usados no projeto e avaliação dos sistemas de irrigação por sulcos, sobre condições de solo uniforme e não uniforme.

Tanto o método de onda cinemática quanto o de inércia zero supõem que os termos da aceleração na equação da Quantidade de Movimento são desprezíveis. As soluções cinemáticas ignoram o gradiente de profundidade da água $\partial h / \partial x$, fixando assim, a declividade do fundo do sulco igual a declividade da linha energética. Apesar de ambos os procedimentos darem bons resultados, segundo SCHMITZ e SEUS (1992), as soluções cinemáticas não se aplicam a canais bloqueados, ou com declividade pequena ou nula.

2.4.4 MODELOS DE BALANÇO VOLUMÉTRICO

A simulação matemática da hidráulica do sulco pode melhorar a performance dos sistemas de irrigação por sulcos, sem recorrer a uma experimentação de campo excessiva com compromissos associados a tempo e dinheiro.

Os primeiros modelos de irrigação superficial se basearam na Conservação da Massa (ISRAELSON, 1932; LEWIS e MILNE, 1938). O primeiro modelo de balanço volumétrico foi proposto por HALL (1956) para a irrigação por inundação e depois modificado para a irrigação por sulcos por DAVIS (1961), que o resolveu para intervalos de tempo constantes, ao invés de intervalos de espaço constantes.

Quase todos os modelos de irrigação por sulcos têm empregado uma metodologia de balanço volumétrico, no qual o princípio da Conservação da Massa, ou do volume (massa específica da água constante), é usado em conjunto com uma hipótese relativa a superfície média da área de armazenamento do sulco. Os modelos de irrigação superficial mais rigorosos incorporam também o princípio da Conservação da Quantidade de Movimento, ao invés da hipótese de armazenamento superficial (ELLIOTT et al., 1982).

A água é introduzida na extremidade mais elevada do sulco, uma parte é estocada na superfície (armazenamento superficial), e o restante infiltra e é armazenada no solo (subsuperfície).

Este critério, usado nos modelos de balanço volumétrico, estabelece que a qualquer instante, o volume total de água no campo deve ser igual a soma do armazenamento superficial e subsuperficial (desprezando-se a quantidade perdida por evaporação e transpiração, durante o período de aplicação da água).

$$Q_0 \cdot t = V_y + V_z \quad (11)$$

onde Q_0 = vazão constante de entrada por sulco, m^3/s ;

t = tempo de aplicação da água, min;

Para proceder ao cálculo do volume total de água, em sulcos, as lâminas superficial e infiltrada devem ser substituídas por áreas, sendo calculadas no Apêndice 1 (Geometria da seção transversal de escoamento superficial) e através do produto da lâmina infiltrada pelo perímetro molhado, respectivamente.

$$Q_0 \cdot t = x_a \cdot (A + A_z) \quad (12)$$

onde x_a = distância de avanço ao longo do sulco;

A = área média das seções transversais ao fluxo superficial, m^2 ;

A_z = área média das seções transversais ao fluxo infiltrado, m^2 .

Um caso especial da eq. (11) foi utilizado por LEVIEN e SOUZA (1987), usando fatores de perfil superficial e subsuperficial:

$$Q_0 \cdot t = A_0 \cdot r_y \cdot x_a + A_z \cdot r_z \cdot x_a \quad (13)$$

onde A_0 = área da seção transversal de escoamento na extremidade a montante, m^2 ;

A_z = área de água infiltrada na extremidade a montante, no tempo t , m^2 ;

r_y = fator de perfil superficial, adotado arbitrariamente como sendo $r_y=0,75$;

r_z = fator de perfil subsuperficial, adotado arbitrariamente como sendo $r_z=0,80$.

No modelo de LEVIEN e SOUZA (1987), as áreas médias foram calculadas, multiplicando-se as áreas calculadas na porção inicial do sulco (A_0 e A_z , respectivamente), por fatores de forma adequados (r_y e r_z), que nada mais são do que relações entre os volumes reais de água superficial ou infiltrada, e aqueles volumes determinados, admitindo-se que A_0 e A_z não variam, na distância de avanço considerada.

Se a taxa de infiltração e a forma do perfil superficial da água forem conhecidos em todos os intervalos de tempo, a formulação matemática baseada em princípios pré-estabelecidos pode levar a uma equação integral exata, contendo a função da frente de avanço da água como a única variável desconhecida. A taxa de infiltração pode ser aproximada por funções determinadas tanto analítica, quanto experimentalmente. Com respeito ao perfil superficial da água, é comum adotar que a profundidade média permanece aproximadamente constante, durante o avanço. Sobre estas condições, a equação da Continuidade pode ser resolvida, e a função de avanço determinada (SAKKAS e STRELKOFF, 1974).

As aproximações por balanço volumétrico assumem um certo perfil da superfície, assim como os perfis de escoamento subsuperficiais, introduzindo dessa forma, aspectos empíricos. Apesar dos modelos de balanço volumétrico poderem ser satisfatoriamente comparados com os valores observados, conforme SCHMITZ e SEUS (1992), deveriam ser evitados na aplicação de modelos calibrados para situações substancialmente diferentes, por causa de suas restrições de caráter empírico, para uma faixa de condições pequena.

Além disso, assim como nos demais modelos, a precisão de cada modelo de balanço volumétrico depende, essencialmente, da validade das hipóteses consideradas pelos modelos para simular situações reais. Desta forma, um modelo pode perfeitamente fornecer resultados satisfatórios para algumas situações, e comprometer em outras, dependendo da validade das hipóteses, em cada situação.

DAVIS (1961) modificou o modelo proposto por HALL (1956), descrito à princípio para a estimativa da taxa de avanço de infiltração por infiltração, para a fase de avanço de irrigação por sulcos, e o resolveu para intervalos de tempo constantes, ao invés de intervalos de distância especificados, com escoamento contínuo e constantes espacialmente não variáveis.

FOK e BISHOP (1965) desenvolveram equações matemáticas para a descrição do avanço da água, na irrigação superficial (sulcos ou inundação), baseadas no princípio da Continuidade. Essas equações expressaram o comprimento de avanço como função da vazão de entrada, do tempo de aplicação, da largura, da profundidade normal e de constantes empíricas.

WILKE e SMERDOM (1965), usaram técnicas de balanço volumétrico para simular o avanço da água, na irrigação por sulcos. Eles adotaram uma recessão horizontal nos sulcos e desprezaram o armazenamento superficial, o que poderia não ser satisfatório para pequenos intervalos de tempo, para solos que tenham taxas de infiltração muito baixas, ou para sulcos muito largos ou com altas vazões. Foi adotado também que o momento poderia ser calculado considerando-se uma profundidade média do armazenamento superficial como constante.

LAL e PANDYA (1970) desenvolveram um modelo matemático baseado no balanço volumétrico, para possibilitar a redução da vazão em intervalos iguais de tempo, eliminar as perdas por escoamento superficial à jusante, e manter mínimas as perdas por percolação por profundidade à jusante, para a fase de avanço da irrigação por sulcos.

WU (1972) utilizou um modelo linear para desenvolver um modelo matemático expressando o escoamento recessivo da irrigação por sulcos, ou por inundação, que foi útil na análise do comprimento molhado do sulco e do tempo de recessão. Ele se baseou na adoção que a vazão de escoamento é proporcional ao volume de água restante na superfície; a constante de proporcionalidade foi determinada fazendo uma série de testes no sulco sobre consideração, medindo a recessão e fixando as constantes, para os dados coletados.

FANGMEIR e RAMSEY (1978) desenvolveram um modelo

baseado no balanço volumétrico da água, para calcular a infiltração e as funções de entrada, medindo eficazmente as fases de avanço, recessão, entrada, saída e infiltração, na irrigação por sulcos. Compararam os resultados da infiltração pela equação de Kostiaikov e de Phillip, e constataram que, embora as constantes de Phillip tivessem sido mais difíceis de se obter, esta forneceu uma estimativa melhor da infiltração do que a equação de Kostiaikov. Eles apresentaram os resultados de experimentos realizados em laboratório, para a irrigação por sulcos.

Bautista e Wallender (1985), citados por WALLENDER (1986) e IZADI e WALLENDER (1985), sugeriram incluir a alta variabilidade da infiltração medida e a geometria do sulco na análise, avaliação e projeto dos sistemas de irrigação por sulcos.

WALLENDER (1986), usando uma equação de balanço volumétrico com intervalos de distâncias constantes, e baseada na equação de HALL (1956), determinou os tempos de avanço para a irrigação por sulcos, adaptando a variação das propriedades de entrada, ao longo da superfície do campo, com a infiltração variando espacialmente. A não-uniformidade da entrada no solo afetou os parâmetros de irrigação (eficiência e uniformidade, mais do que a variabilidade do tempo oportuno de entrada). Entretanto, a simulação das fases de escoamento, depleção e recessão não foram incluídas no modelo, por simplificação. A solução incremental do balanço volumétrico, usando a equação de HALL (1956), causou erros de aproximadamente 10% durante a fase de avanço. Isso devido ao grande erro numérico quando da aproximação dos volumes incrementais da sub-superfície, usando a regra trapezoidal de integração.

LEVIEN e SOUZA (1987) propuseram um modelo algébrico de balanço volumétrico que modificou o modelo de irrigação por inundação de STRELKOFF (1977), para o caso de irrigação por sulcos, com declividade e aberto à atmosfera.

Através de simplificações, eles usaram a equação de Kostiaikov para calcular a infiltração.

RAYEJ e WALLENDER (1987) desenvolveram um modelo numérico baseado na solução cumulativa do balanço volumétrico, ao invés da solução incremental. Determinaram os tempos de avanço para intervalos de distância especificados a priori (constantes ou variáveis), para permitir que as características de infiltração variassem ao longo do comprimento do sulco e assim, puderam simular satisfatoriamente todas as fases da irrigação por sulcos, sob condições de solos uniformes e não-uniformes. Entretanto, a simulação por balanço volumétrico utiliza somente a Conservação da Massa, ao invés de utilizar a Conservação da Quantidade de Movimento e adota a forma do perfil da superfície da água, quando calcula o armazenamento superficial. Como consequência à violação das leis de Conservação da Quantidade de Movimento, a eficiência da simulação pode ser afetada, porque os erros no perfil da superfície conflitam com as variações espaciais e temporais do perímetro molhado, que influem na infiltração. Na fase de recessão, a área do escoamento a jusante foi adotada como sendo proporcional à medida na saída do sulco. Entretanto, deveria ser geometricamente mais razoável adotar que a profundidade de escoamento na saída do sulco fosse proporcional à porção anterior. Para o uso desse modelo é necessário um longo programa computacional.

WILSON e ELLIOTT (1988) propuseram dois modelos simples para prever a taxa de avanço do escoamento, em sulcos: 1) O método de Muskingum, que foi uma versão modificada da técnica de escoamento em hidrologia e 2) O método Estado-Permanente, que se baseia na adoção da capacidade de armazenamento como sendo constante.

SINGH e HE (1988) apresentaram o modelo de Muskingum para todas as fases da irrigação por sulcos, baseado no balanço volumétrico e na relação empírica

armazenamento-vazão. O modelo pode ser adaptado a alguns tipos de solos, plantação e outros fatores envolvidos na irrigação por sulcos. Entretanto, ele contém doze coeficientes e pode ser difícil determiná-los.

YU e SINGH (1990) desenvolveram um modelo analítico para simular todas as fases da irrigação por sulcos. O modelo transformou o tipo de seção transversal real do sulco num tipo semi-circular equivalente e pode, então, ser aplicado a qualquer forma de seção transversal do sulco. Foram usados perfis parabólicos para descrever os perfis de escoamento superficial e sub-superficial e seus coeficientes foram determinados na região de escoamento gradualmente variado, ao invés da região de escoamento turbulento da frente de avanço. A infiltração foi simulada em três dimensões, ao invés de uma, ou duas dimensões.

A escolha dos métodos de LEVIEN e SOUZA (1987) e YU e SINGH (1990), para análise foi devido à semelhança de características entre os mesmos. Estas características foram definidas no desenvolvimento dos modelos, tais como: se baseiam no balanço volumétrico, se aplicam a irrigação por sulcos com seção transversal parabólica e perfis parabólicos descrevendo os perfis superficial e subsuperficial, analisam todas as fases da irrigação, sendo que foi considerado constante a vazão de entrada.

2.5 MODELOS DE EFICIÊNCIA, OTIMIZAÇÃO, E PESQUISAS DE CAMPO PARA A IRRIGAÇÃO POR SULCOS

WILLARDSON e BISHOP (1967) apresentaram uma análise da eficiência de aplicação da água numa irrigação superficial, baseada na fórmula de eficiência de aplicação da água de ISRAELSEN (1932) e desprezando a evaporação. Foram construídas curvas de avanço pré-determinadas pela vazão, infiltração, declividade, rugosidade e comprimento do canal. Eles mostraram que é relativamente fácil de se obter eficiências de aplicação da água acima de 60%, para uma grande faixa de vazões em sulcos, ou na irrigação por

inundação, na fase de avanço.

WU e BISHOP (1970) apresentaram uma relação gráfica simples para mostrar a infiltração num ponto, ao longo do canal de irrigação (ou sulco), em função do comprimento e do tempo, adotando que as três funções empíricas, avanço, recessão e infiltração acumulada eram conhecidas, ou obtidas em testes de campo.

ROTH et al. (1974)

publicaram dados de campo de sete canais de irrigação em superfície de solo descoberto, que foram, posteriormente, usados por vários pesquisadores na verificação dos modelos de irrigação por inundação. Foram fornecidos cálculos do tempo de avanço, infiltração, profundidade de escoamento, velocidade, vazão e rugosidade para vários intervalos de tempo e distância, sendo as vazões de entrada constantes, e declividade fixa. Foram obtidas também, estimativas do tempo de recessão. Os cálculos foram baseados no método do balanço volumétrico para todo o canal, em intervalos de tempo especificados.

FANGMEIER e RAMSEY (1978) conduziram uma série de testes em sulcos, na Universidade do Arizona. Eles postularam que, se as profundidades de escoamento num sulco permanecessem constantes, isso poderia resultar numa curva de infiltração monotônica uniforme; entretanto, se as profundidades de escoamento diminuíssem com o tempo e com a distância, ao longo do sulco, isso poderia resultar numa anormalidade na declividade da curva em papel monolog, devido a diminuição da área de contato com o solo. Eles plotaram o volume de entrada acumulado versus o tempo em papel monolog e afirmaram que a curva se desviou de uma linha reta. Entretanto, quando o volume de entrada acumulado foi dividido em comprimentos transversais característicos para o escoamento (tanto na largura como para o perímetro molhado na entrada), e sua entrada acumulada foi plotada versus o tempo, as curvas permaneceram retas. A conclusão

foi a de que cada largura à montante, ou cada perímetro molhado, poderiam ser usados para caracterizar a taxa de entrada no sulco.

ON FARM IRRIGATION COMMITTEE OF THE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION (1978) forneceu o significado para os termos de umidade do solo, termos de eficiência e distribuição da água da irrigação, visando a uma padronização para reduzir a falta de precisão, reduzindo os conflitos e a necessidade de redefinição de cada termo usado na prática da irrigação.

KARMELI (1978) desenvolveu um modelo para a irrigação por sulcos, que descreveu os padrões de distribuição e eficiências de aplicação da água, usando vazões variáveis. Foi utilizada a técnica de balanço volumétrico de WILKE e SMERDOM (1965) para simular o avanço da água na irrigação por sulcos, por causa da sua facilidade de aplicação e boa aproximação com os dados de campo.

PERI et al. (1979) desenvolveram e analisaram o conceito de "sistema de profundidade ótima" que pode ser usado para determinar as práticas da irrigação e, se necessário, o projeto de um sistema de irrigação, considerando dois sistemas de irrigação em particular: por aspersão e sistemas superficiais.

LEY e CLYMA (1981) conduziram inúmeras avaliações de campo em várias fazendas do Colorado, apresentaram uma análise das práticas de irrigação e uma definição dos problemas prioritários. Eles fizeram uma análise detalhada dos dados colhidos em campo, e compararam as condições atuais com os parâmetros de projeto, fazendo várias recomendações de campo com as variáveis comprimento de campo, declividade de campo, vazão no sulco, taxa de infiltração do sulco, rugosidade do sulco, perfil do canal e performance da irrigação. As análises feitas mostraram que as vazões no sulco excederam os valores de projeto em 85%

das avaliações, e foram menos adequadas e limitadas, reduzindo a performance do sistema.

BISHOP et al. (1981) pesquisaram as taxas de avanço numa irrigação intermitente por sulcos, as comparou com o escoamento contínuo, e concluíram que a irrigação intermitente tem o potencial de uma técnica de armazenamento de forças, aperfeiçoando a uniformidade de aplicação da água e a eficiência da irrigação por sulcos.

Reddy e Clyma (1981, 1982, 1983a, 1983b), citados por REDDY e APOLAYO (1991), baseando-se na técnica de programação geométrica generalizada, tiveram como objetivo encontrar o número total de constantes de campo, o comprimento do sulco, a vazão de entrada, a duração da aplicação da água e a profundidade, que produziriam o menor custo de projeto.

ELLIOTT e WALKER (1982) fizeram mais de cem avaliações de campo, no Colorado. Esses dados foram usados para estudar a confiabilidade de várias relações de avanço e infiltração, baseadas nas aproximações de onda cinemática e de balanço volumétrico. Foi utilizada a equação de Kostiaikov modificada para taxas muito grandes de infiltração, que forneceu uma simulação altamente eficaz, quando se obteve estimativas confiáveis para a taxa de avanço constante. A função para o avanço, empregada normalmente, foi calibrada usando regressão e o Método dos Dois Pontos, que mostrou, posteriormente, ser muito vantajoso.

VIEIRA (1983) comparou as soluções das equações de Saint-Venant com aquelas das aproximações por onda cinemática, difusão e gravidade, para uma certa faixa do número de Froude e do número de onda cinemática, em duas condições diferentes: (1) escoamento crítico; e (2) gradiente de profundidade nula. Para cada uma destas condições, foram definidas zonas para as quais estas soluções por onda cinemática, difusão ou gravidade podem ser

usadas, para resolver as equações hidrodinâmicas completas de Saint-Venant.

Reddell (1986a) e Smith e Duke (1984), citados por CLEMMENS (1991), discutiram a estimativa da infiltração durante o avanço, na irrigação por sulcos.

Reddell (1986b), citado por CLEMMENS (1991), forneceu um exemplo de controle da taxa de escoamento em sulcos, através de um controle por "feedback".

Holzapfel et al. (1986), citados por REDDY e APOLAYO (1991), aplicaram a técnica de programação linear para otimizar os parâmetros de projeto da irrigação superficial, e concluíram que o abastecimento de água e o tempo avaliado para a irrigação, são fatores importantes a serem considerados no projeto dos sistemas de irrigação superficial.

Smerdom et al. (1988), citado por CLEMMENS (1991), usaram as adoções simplificadas da Continuidade e da Quantidade de Movimento, para obter uma solução algébrica para a infiltração.

KATOPODES et al. (1990) se basearam na aproximação Newtoniana para a identificação dos parâmetros de rugosidade e infiltração, encontrados na irrigação superficial. O gradiente conjugado e as técnicas métricas variáveis foram usadas para a pesquisa do conjunto de parâmetros, que minimizam os erros entre as observações de campo e o modelo inércia zero linearizado.

KATOPODES e TANG (1990) demonstraram que os ajustes na vazão de entrada para manter a trajetória de avanço podiam ser feitos para uma taxa de avanço pré-determinada, mesmo quando os parâmetros de campo reais variam substancialmente das suas estimativas teóricas. Foram apresentados também os resultados do controle

auto-adaptável, que mostraram que a taxa de avanço prevista também pode ser ajustada e imitada no tempo real, se for permitida uma defasagem de tempo para ganhar informação e redefinir os ideais de controle desejados, na irrigação por inundação.

REDDY E APOLAYO (1991), considerando como objetivo principal o mínimo custo, formularam o problema do projeto do sistema de irrigação por sulcos (custo e variáveis do projeto), como um problema de otimização. Eles avaliaram as variáveis do sistema de irrigação por sulcos para várias mudanças nos valores das variáveis de entrada, tais como a vazão de escoamento para o abastecimento, a profundidade de projeto e o custo da água, mão de obra e construção da vala.

TROUT (1991) comparou conceitualmente e com dados de campo os modelos que adotam que o perímetro do sulco é fixo e aqueles onde a profundidade de escoamento aumenta com o volume. Os modelos de perfil constante resultam numa generalização simples das relações entre os parâmetros hidráulicos e os geométricos. Ele concluiu que ambos os modelos são mais sensíveis à relação de profundidade do escoamento e largura, do que do perfil do sulco.

PAINE (1992) desenvolveu um modelo que executa o método de passo padronizado para o cálculo dos perfis superficiais da água em canais abertos prismáticos, onde o perímetro molhado e a área de escoamento foram calculados a cada iteração. Esse algoritmo, apresentado na forma Newton-Raphson, foi adequado a regimes subcrítico, supercrítico, crítico, adverso e horizontal e foi desenvolvido para maximizar a velocidade de processamento, para a análise de drenagens rotineiras.

3. METODOLOGIA

A metodologia apresentada concerne o desenvolvimento teórico e computacional de dois modelos de balanço volumétrico, para irrigação por sulcos com drenagem livre, que procuram analisar todas as fases da irrigação, à saber o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e o modelo analítico de YU e SINGH (1990).

Segundo o levantamento bibliográfico efetuado, estes modelos foram selecionados por apresentarem as seguintes características em comum:

- são baseados no conceito de balanço volumétrico;
- são aplicáveis a irrigação por sulcos homogêneos, abertos e em declive, com drenagem livre;
- podem ser aplicados a sulcos com seção transversal parabólica;
- analisam todas as fases da irrigação;
- utilizam perfis parabólicos para descrever os perfis superficial e subsuperficial;
- adotam constante a vazão de entrada;
- consideram a declividade do fundo do sulco como sendo pequena, ou seja $S_f = S_o$.

Os modelos são analisados e testados com três diferentes resultados obtidos no campo. A aproximação dos modelos quando comparadas aos dados de campo e o erro relativo devido ao uso das equações, são nosso principal objetivo.

Os modelos aqui desenvolvidos podem ser utilizados com a finalidade de indicar melhores práticas de manejo visando ao aumento da eficiência do sistema.

3.1 MODELO COMPUTACIONAL

3.1.1 MODELO ALGÉBRICO DE LEVIEN-SOUZA (1987)

O modelo de balanço volumétrico, descrito por LEVIEN e SOUZA (1987), foi usado para simular todas as fases do processo de irrigação por sulcos abertos em declive. Para a fase de avanço, o modelo usa a equação de balanço volumétrico apresentada por SOUZA (1981). O modelo de STRELKÖFF (1977), idealizado para a irrigação por inundação, foi adaptado para as outras fases da irrigação por sulcos.

3.1.1.1 FASE DE AVANÇO

A equação do balanço volumétrico para um sulco pode ser expressa na forma (SOUZA, 1981, 1983):

$$Q_0 \cdot t = V_y + V_z \quad (14)$$

onde Q_0 = vazão de entrada no sulco, L^3/T ;

t = tempo gasto para a frente de avanço atingir a distância x , T ;

V_y = volume armazenado na superfície do solo, L^3 ;

V_z = volume infiltrado no solo, L^3 .

Com relação ao volume armazenado na superfície do solo, V_y (Fig. 10), qualquer que seja a forma do perfil superficial da água, faz-se a hipótese de que a área média da seção transversal, A_y , permanece constante. Assim, A_y pode ser definido como sendo

$$A_y = \frac{1}{x_a} \int_0^{x_a} A_y dx \quad (15)$$

e o volume superficial será

$$V_y = \int_0^{x_a} A_y dx = A_y \cdot x_a \quad (16)$$

onde x_a = distância horizontal de avanço, no sentido de escoamento do sulco, L.

Como A_y é constante, pode-se considerar que a lâmina d'água na entrada do sulco, y_0 , corresponde à lâmina normal de fluxo uniforme, y_n , para a vazão aplicada na entrada do sulco, Q_0 , isto é,

$$y_0 = y_n(Q_0) \quad (17)$$

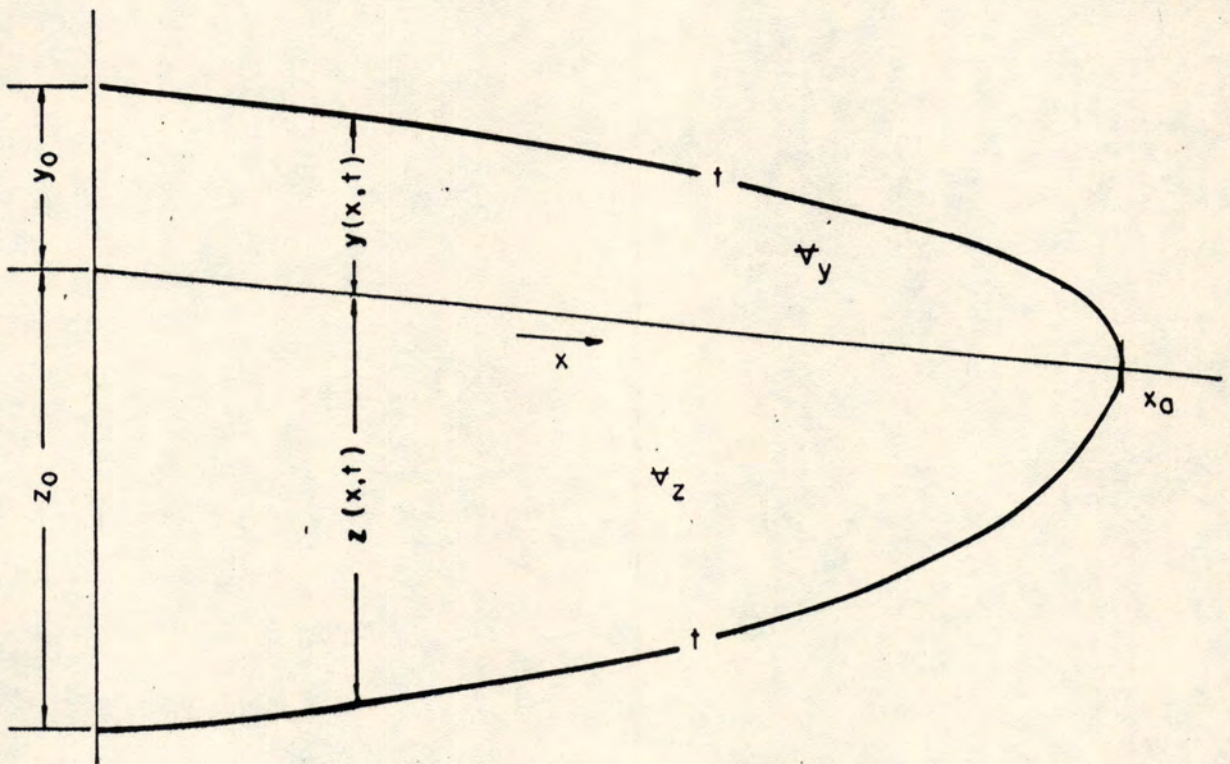


Figura 10- Lâminas superficial e infiltrada, durante a fase de avanço na irrigação por sulcos (SOUZA, 1983)

Conseqüentemente, a área da seção transversal de escoamento na entrada do sulco, A_0 (Fig. 11), é uma constante e função de y_n , ou seja,

$$A_0 = A(y_n) \quad (18)$$

Portanto, a área média da seção transversal, A_y , pode ser representada pelo seguinte produto:

$$A_y = A_o \cdot r_y \quad (19)$$

onde A_o = área da seção transversal de escoamento na entrada do sulco, L^2 ;

r_y = fator de forma do perfil superficial.

Das Equações (18) e (19) se obtém uma nova expressão para o volume superficial, V_y .

$$V_y = A_o \cdot r_y \cdot x_a \quad (20)$$

O volume infiltrado no solo, V_z (Fig. 11), pode ser descrito como sendo a integral da área infiltrada, A_{z0} , ao longo do sulco, ou seja,

$$V_z = \int_0^{x_a} A_{z0}(y,t) dx \quad (21)$$

onde A_{z0} = volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco, L^2 .

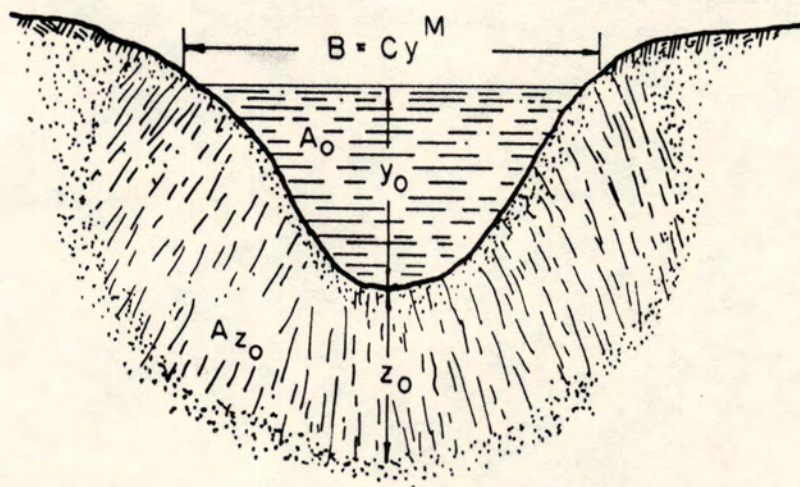


Figura 11- Elementos geométricos da seção transversal parabólica de um sulco de irrigação (SOUZA 1983)

Similarmente ao perfil superficial, pode-se expressar o volume infiltrado em termos da área média infiltrada, A_z , ou seja,

$$\begin{aligned} V_z &= A_z \cdot x_a \\ V_z &= A_{zo} \cdot r_z \cdot x_a \end{aligned} \quad (22)$$

onde r_z = fator de forma do perfil subsuperficial, adimensional.

Substituindo as Equações (20) e (22) na Equação (14), obtém-se uma equação para o balanço volumétrico ou equação da Conservação da Massa em sulcos, em sua forma integrada:

$$Q \cdot t = A_o \cdot r_y \cdot x_a + A_{zo} \cdot r_z \cdot x_a \quad (23)$$

A Equação (23), proposta para o cálculo do avanço da água, x_a , em sulcos, pode ser reescrita como

$$x_a = \frac{Q_o \cdot t}{A_o \cdot r_y + A_{zo} \cdot r_z} \quad (24)$$

Neste estudo, a forma da seção transversal dos sulcos foi considerada parabólica e a área da seção transversal de escoamento na entrada do sulco, A_o , pode ser computada conforme procedimento apresentado detalhadamente no Apêndice 1 (Geometria da seção transversal de escoamento superficial), pelas equações

$$A_o = \frac{B \cdot y_{no}}{M + 1} \quad (25)$$

sendo que

$$B = C \cdot y_{no}^M \quad (26)$$

onde B = largura da superfície livre da água; na seção transversal do sulco, L ;

C e M = constantes, determinadas empiricamente.

A estimativa do volume de água existente na superfície do solo é geralmente calculada em função da lâmina existente na entrada do sulco. Considerando-se um regime uniforme neste ponto da parcela sob irrigação, a lâmina superficial na cabeceira do sulco, y_{no} , é adotada normal ($y_{no} = y_n$), para uma determinada vazão, declividade, rugosidade hidráulica e geometria da seção transversal ao fluxo, podendo portanto, ser computada pela fórmula de Gauckler-Manning,

$$y_{no} = \left[\frac{Q_0 \cdot n}{C_u \cdot S_0^{1/2}} \cdot \frac{(CM + 1)^{5/3}}{C} \right]^{3/(3M + 5)} \quad (27)$$

onde n = coeficiente de rugosidade de Manning, $T/L^{1/3}$;

S_0 = declividade do fundo do sulco, L/L ;

C_u = coeficiente dependente do sistema de unidades usado ($C_u = 1,0 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$; $C_u = 1,486 \text{ ft}^{1/2}/\text{s}$), $L^{1/2}/T$.

A área infiltrada acumulada, A_{zo} , pode ser calculada como sendo:

$$A_{zo} = P_m \cdot Z(t) \quad (28)$$

onde P_m = perímetro molhado, L ;

$Z(t)$ = lâmina infiltrada acumulada expressa pela equação de Kostiakov, L .

Quando a lâmina d'água, y , for muito pequena em relação a largura da superfície livre da água, na seção transversal do sulco, B , então para fins de facilitar os cálculos, o perímetro molhado pode ser aproximado por B , isto é

$$P_m \approx B = C \cdot y^M \quad (29)$$

E a Equação (28) pode ser reescrita como

$$Azo = B \cdot Z(t) \quad (30)$$

As equações mais utilizadas para o cálculo da lâmina infiltrada acumulada, Z , em função do tempo de oportunidade, t , têm sido a de Kostiaikov (1932) e a de Kostiaikov modificada. Neste estudo, foi utilizada a primeira, sobre a forma integrada em função do tempo, que nos dará a profundidade de água que terá infiltrado no solo, no decorrer do tempo,

$$Z(t) = K \cdot t^a \quad (31)$$

onde K e a = constantes empíricas, para uma dada umidade do solo.

3.1.1.2 FASE DE RECESSÃO

1) Cálculo de " t_r ", tempo do início da recessão

STRELKOFF (1977) considerou, para o escoamento em faixas de irrigação que, no instante do corte do fornecimento de água para o sulco, t_{co} , o perfil superficial é aproximado por uma linha reta. JENSEN (1981), Fig. 12, assim como LEVIEN e SOUZA (1987), adotaram que o perfil superficial no sulco tem uma superfície plana, demarcada por ABCD, na Fig. 13.

A lâmina superficial no início do sulco, y_0 , é uma lâmina normal, no instante em que o fornecimento de água é interrompido. A vazão escoada superficialmente no final do sulco, Q_1 , é menor do que a vazão de entrada no sulco, Q_0 , por causa da vazão infiltrada no sulco, Q_{inf} . Dessa forma, pode-se considerar para fins de cálculos, que durante a fase de recessão:

(1) a lâmina d'água no final do sulco, y_1 , é constante e normal, para que a vazão no final do sulco, função do tempo t_r , $Q_1(t_r)$, marque o final da fase de depleção e o início da recessão.

(2) a somatória da vazão escoada superficialmente e as

vazões totais de infiltração, continua sendo equivalente a vazão de entrada no sulco, Q_0 , isto é

$$Q_1 + Q_{inf} = Q_0 \quad (32)$$

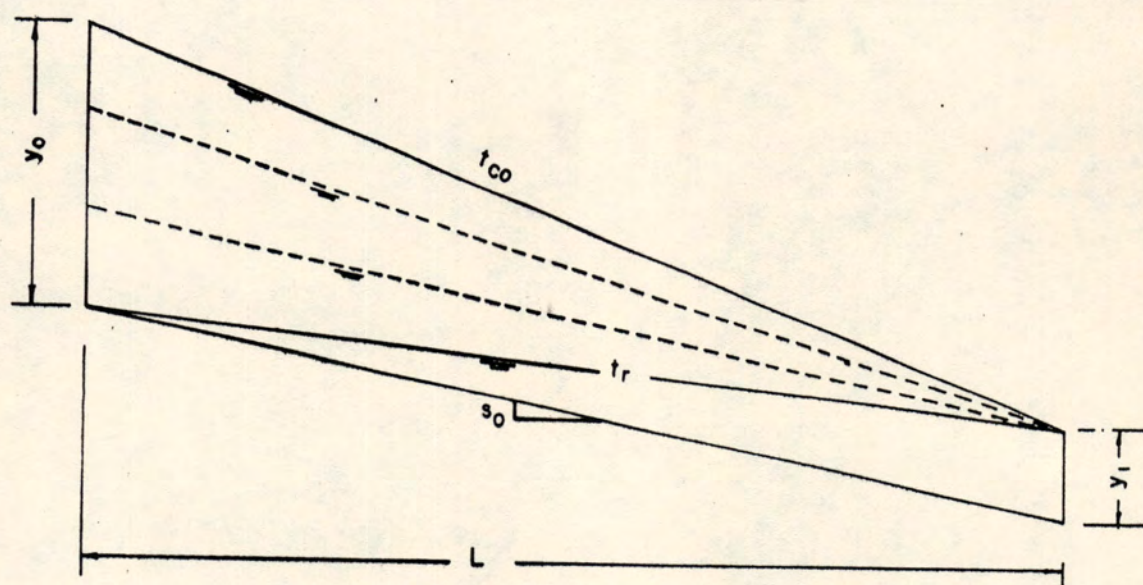


Figura 12- Perfis superficiais esquemáticos - Fase de depleção (JENSEN, 1980)

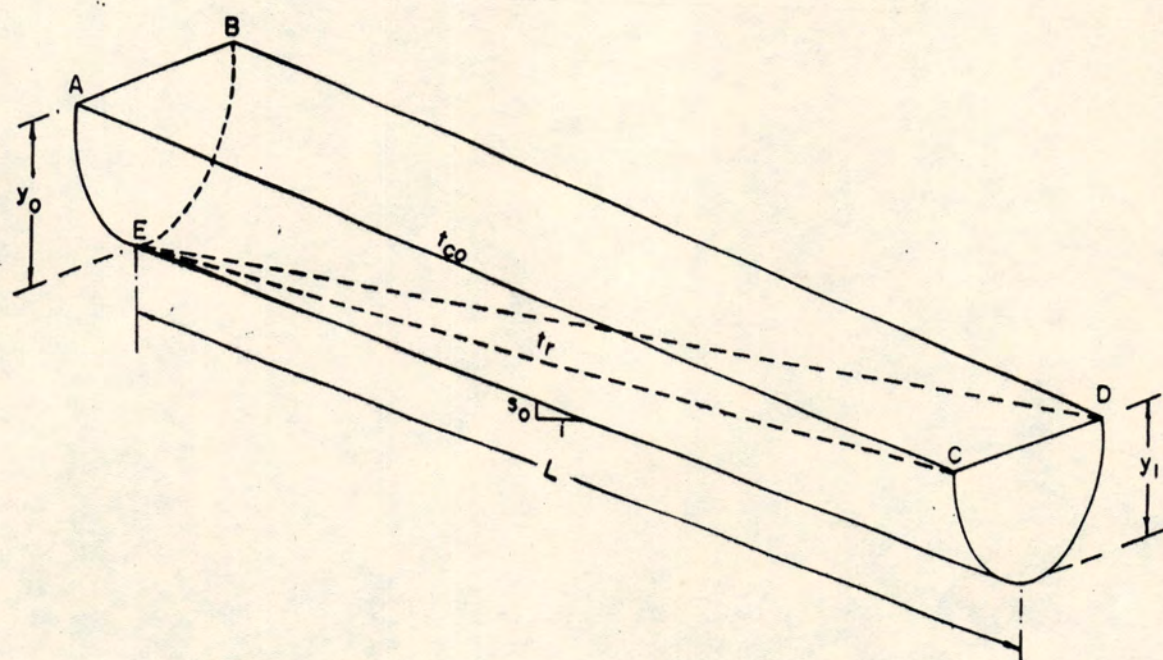


Figura 13- Volume superficial esquemático - Fase de depleção (LEVIEN e SOUZA, 1987)

(3) os perfis superficiais no tempo t_r , assim como no tempo t_{co} , são limitados por superfícies planas, Fig. 13.

Nos processos contínuos, a lâmina d'água na cabeceira do sulco, y_0 , decresce, à medida que o volume de água superficial diminui, para suprir a infiltração e o escoamento superficial.

Essas hipóteses estabelecem os meios necessários para estimar o tempo no qual a recessão começa, t_r , e a lâmina d'água na cabeceira do sulco se reduz a zero.

A duração entre o tempo de corte do fornecimento de água para o sulco, t_{co} , e o tempo de recessão, t_r , é o tempo requerido para remover o volume ABCDE da Fig. 13. Este volume, V , é calculado como segue:

$$V = \int_0^L A_y(y) dx \quad (33)$$

onde $A_y(y)$ = área da seção transversal, função da lâmina y , L^2 .

$$A_y = \frac{C}{M+1} \cdot y^{M+1} \quad (34)$$

e

$$y = y(x) \quad (35)$$

Foi adotado que a lâmina d'água, y , varia linear e inversamente com x , de acôrdo com a seguinte expressão:

$$y = S_y \cdot (L - x) \quad (36)$$

onde

$$S_y = \frac{y_0}{L} = \text{constante} \quad (37)$$

portanto,

$$dy = - S_y dx ; \quad dx = - \frac{1}{S_y} dy \quad (38)$$

e para $x = 0$, $y = S_y \cdot L$; para $x = L$, $y = 0$;

Então substituindo-se as Equações (34) e (38) na Equação (33), resulta

$$V = - \frac{C}{(M+1)} \cdot \frac{1}{S_y} \int_{y_0}^0 y^{M+1} dy \quad (39)$$

ou ainda, trocando o sinal,

$$V = \frac{C}{(M+1)} \cdot \frac{1}{S_y} \int_0^{y_0} y^{M+1} dy \quad (40)$$

Integrando a Equação (40) e utilizando a Equação (37) fica:

$$V = \frac{C}{(M+1)} \cdot \frac{L}{y_0} \cdot \frac{y_0^{M+2}}{(M+2)} \quad \text{ou}$$

$$V = \frac{C}{(M+1)(M+2)} \cdot y_0^{M+1} \cdot L \quad (41)$$

Desta forma, o volume superficial, V , calculado pela Equação (41), (volume ABCDE da Fig. 13), é considerado como igual ao volume a ser drenado e infiltrado entre o tempo de corte do fornecimento de água, t_{co} , e o tempo de recessão, t_r . Como o volume drenado e infiltrado durante $(t_r - t_{co})$ é,

$$V = Q_0 \cdot (t_r - t_{co}) \quad (42)$$

temos, substituindo a Equação (42) na Equação (41),

$$t_r - t_{co} = \frac{C}{(M+1)(M+2)} \cdot y_0^{M+1} \cdot \frac{L}{Q_0} \quad (43)$$

Usando-se as Equações (25) e (26), a Equação (43) pode ser reescrita como sendo,

$$t_r = t_{co} + \frac{A_o}{(M + 2)} \cdot \frac{L}{Q_o} \quad (44)$$

onde t_{co} = tempo de corte do fornecimento de água para o sulco, T.

ii) Cálculo da curva de recessão

STRELKOFF (1977) considerou que, no início da fase de recessão, a taxa de mudança da lâmina superficial com a distância, S_y , é uniforme sobre o comprimento do sulco, isto é

$$S_y = \frac{y_1(t_r)}{L} \quad \text{ou}$$

$$S_y = \frac{1}{L} \cdot y_{n1} \quad (45)$$

e que, de acordo com a Equação (32),

$$Q_1(t_r) = Q_o - I(t_M) \cdot B(y_o) \cdot L \quad (46)$$

onde S_y = declividade da linha energética, L/L;

$I(t_M)$ = taxa de infiltração média, função de t_M , L/T.

Nas Equações (45) e (46), o argumento t_r indica que as funções variam com o tempo, e este é o valor de tempo t_r que é o requerido. Para efeito de cálculo, a taxa de infiltração média, $I(t_M)$, é calculada como sendo a média aritmética das taxas de infiltração no início e no final do sulco, ou seja,

$$I(t_M) = \frac{I(t_r) + I(t_r - t_L)}{2} \quad (47)$$

onde $I(t_r)$ = taxa de infiltração, função de t_r , L/T;

$I(t_r - t_L)$ = taxa de infiltração no final do sulco, no tempo t_r , L/T.

Essa denominação, $I(t_r - t_L)$, se dá pelo fato da infiltração somente começar em $t = t_L$, o tempo no qual a

frente de avanço atinge o final do sulco.

A equação usada para a função de infiltração, Z , dependente do tempo de infiltração t , é dada pela equação de Kostiaikov, Equação (31).

A equação correspondente para a taxa de infiltração, I , volume por unidade de área por unidade de tempo, é:

$$I(tr) = \frac{dZ}{dt} \quad \text{ou}$$

$$I(tr) = a \cdot k \cdot tr^{a-1} \quad (48)$$

De acordo com STRELKOFF (1977), citado por JENSEN (1980), a simples adoção de que S_y permanece constante enquanto prossegue a recessão, Fig. 14, fornece um decréscimo gradual realista na lâmina superficial normal e na vazão de saída com o tempo, no final do sulco.

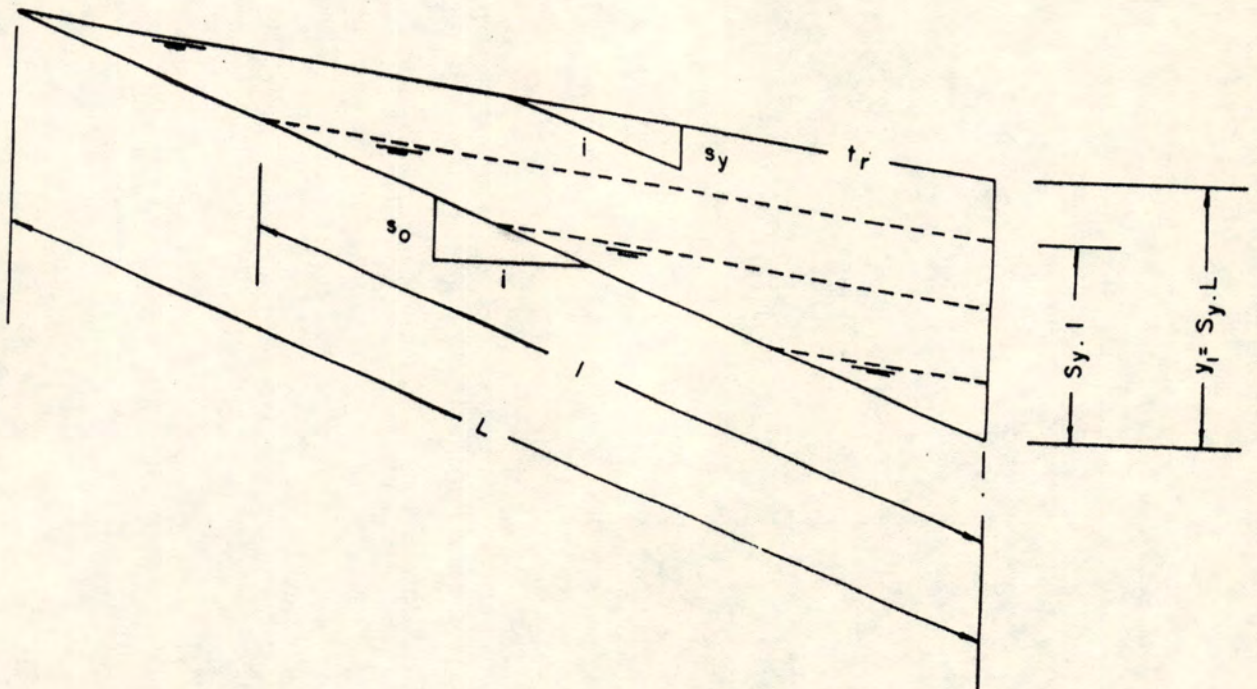


Figura 14- Perfis superficiais esquemáticos - em sulco com extremidade final livre (JENSEN, 1980)

Provavelmente, a circunstância física mais importante exigida, para a validade das adoções feitas, é que a declividade do fundo do canal seja grande o suficiente para que a superfície da água nunca se aproxime da horizontal, ou seja

$$S_0 - S_y \gg 0 \quad (49)$$

O volume superficial, V_s (volume ABCD da Fig. 15), que permanece sobre o solo, é calculado da seguinte maneira:

$$V_s = \int_{L-l}^L A_y(y) dx \quad (50)$$

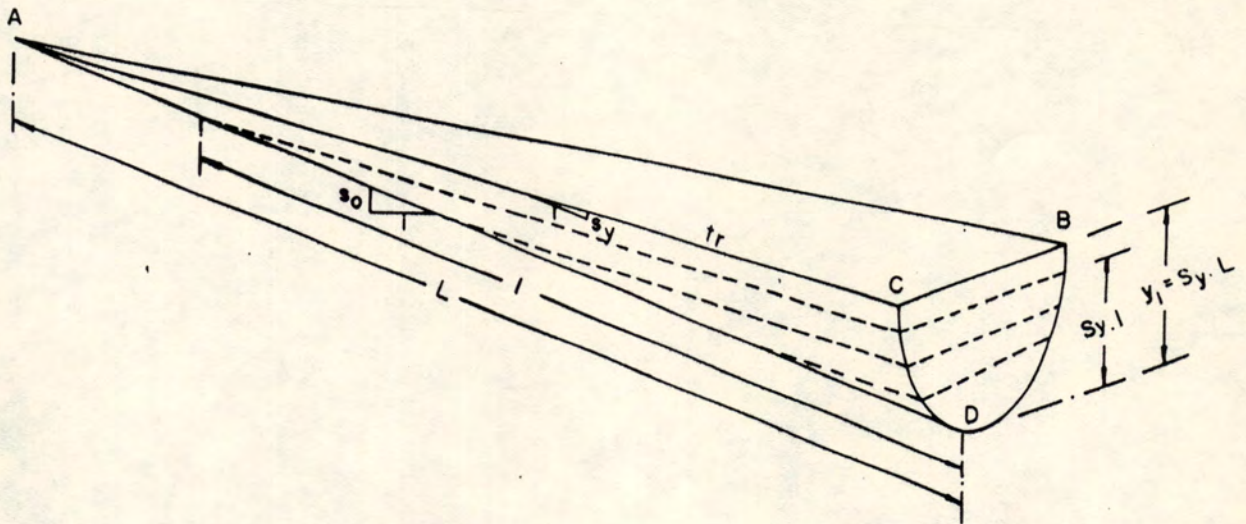


Figura 15- Volume superficial esquemático - Fase de recessão (LEVIEN e SOUZA, 1987)

Foi adotado que a lâmina d'água, y , varia linear e diretamente com x , de acordo com a seguinte expressão:

$$y = S_y \cdot (x - (L - l)) \quad (51)$$

onde S_y = declividade da linha energética, definida pela Equação (45), L/L ;

l = comprimento da porção inundada do sulco, L .

portanto,

$$dy = S_y dx ; \quad dx = \frac{1}{S_y} dy \quad (52)$$

e para $x = L - l$, $y = 0$; para $x = L$, $y = S_y \cdot l$;

Então, utilizando as Equações (34), (50) e (52), fica

$$V_s = \frac{C}{(M+1)} \cdot \frac{1}{S_y} \int_0^{S_y \cdot l} y^{M+1} dy \quad (53)$$

Integrando, a equação para o volume superficial fica

$$V_s = \frac{C}{(M+1) \cdot (M+2)} \cdot \frac{S_y^{M+2}}{S_y} \cdot l^{M+2} \quad \text{ou}$$

$$V_s = \frac{C}{(M+1) \cdot (M+2)} \cdot S_y^{M+1} \cdot l^{M+2} \quad (54)$$

O volume de água restante na superfície do solo, Fig. 15, pode ser obtida pela integração da área da seção transversal do sulco, sobre o comprimento molhado.

Em termos da taxa de infiltração média, I , sobre a porção inundada do sulco, a taxa de variação do volume superficial V_s , com o tempo, é dada pela equação diferencial em l (o comprimento da porção inundada do sulco), de acordo com a Equação (46), como

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{C}{(M+1) \cdot (M+2)} \cdot S_y^{M+1} \cdot l^{M+2} \right] = -[C \cdot I \cdot S_y^M \cdot l^{M+1} +$$

$$+ \frac{C}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot l)^{(M+5/3)} \quad (55)$$

O primeiro termo do lado direito da Equação (55) é a taxa de infiltração, onde a largura média de infiltração

é adotada como sendo $B(y_1) = C \cdot y_1^M$.

O segundo termo do lado direito é a taxa de escoamento superficial no final do sulco, considerando-se que a lâmina no final, $y_1(t) = S_y \cdot l(t)$, agora variável com o tempo, é a lâmina normal.

Simplificando a Equação (55),

$$\left(\frac{C}{(M+1)} \cdot S_y^{M+1} \cdot l^{M+1} \right) \frac{dl}{dt} = -C \cdot I \cdot S_y^M \cdot l^{M+1} - \frac{C}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot l)^{M+5/3} \quad (56)$$

Dividindo a Eq. (56) por $\left(\frac{C}{(M+1)} \cdot S_y^{M+1} \cdot l^{M+1} \right)$ resulta na seguinte equação diferencial não linear ordinária:

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{(M+1) \cdot I}{S_y} \cdot (1 + G \cdot l^{2/3}) \quad (57)$$

$$\text{onde } G = \frac{C_u \cdot S_o^{1/2} \cdot S_y^{5/3}}{(M+1)^{5/3} \cdot n \cdot I \cdot M} \quad (58)$$

sendo que G é uma constante.

Segundo JENSEN (1980), para muitos solos, com altos tempos de infiltração, a taxa de infiltração média, I , se aproxima de uma constante, assim, em muitos casos, esta adoção será razoável.

Para evitar resolver a Equação (57) numericamente, a taxa de infiltração média, I , é então, adotada como sendo constante. Como consequência, a Equação (57) toma uma forma de variáveis separadas,

$$- \frac{S_y}{(M+1) \cdot I} \cdot \frac{dl}{(1 + G \cdot l^{2/3})} = dt \quad (59)$$

Integrando, fica

$$- \frac{S_y}{(M+1) \cdot I} \cdot \int_L^l \frac{dl}{1 + G \cdot l^{2/3}} = \int_{t_r}^t dt \quad (60)$$

Introduzindo uma nova variável, ζ , para facilidade da resolução da integral,

$$\zeta = G^{3/2} \cdot l \quad (61)$$

e, portanto,

$$d\zeta = G^{3/2} \cdot dl ; \quad dl = \frac{1}{G^{3/2}} d\zeta \quad (62)$$

e para $l = 1$, $\zeta = G^{3/2} \cdot 1$; e, $l = L$, $\zeta = G^{3/2} \cdot L$;

Então, utilizando as Equações (60), (61) e (62), temos

$$- \frac{S_y}{(M+1) \cdot I \cdot G^{3/2}} \cdot \int_{G^{3/2} \cdot L}^{G^{3/2} \cdot 1} \frac{d\zeta}{1 + \zeta^{2/3}} = \int_{t_r}^t dt \quad (63)$$

e, trocando o sinal,

$$\frac{S_y}{(M+1) \cdot I \cdot G^{3/2}} \cdot \int_{G^{3/2} \cdot 1}^{G^{3/2} \cdot L} \frac{d\zeta}{1 + \zeta^{2/3}} = \int_{t_r}^t dt \quad (64)$$

Integrando,

$$\begin{aligned} t_i &= t_r + \frac{S_y}{(M+1) \cdot I \cdot M \cdot G^{3/2}} \cdot \left(\left[3 \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{1/3} - \right. \right. \\ &- 3 \cdot \arctg \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{1/3} \left. \right] - \left[3 \cdot (G^{3/2} \cdot 1)^{1/3} - \right. \\ &- \left. \left. 3 \cdot \arctg (G^{3/2} \cdot 1)^{1/3} \right] \right) \quad (65) \end{aligned}$$

Esta expressão permite que o cálculo da curva de

recessão, no tempo t_i , seja fixado em termos do comprimento da porção inundada do sulco, l . Todos os outros termos são constantes. Os detalhes da integração da Equação (64) são apresentados no Apêndice 2 (Cálculo da integral

$$\int \frac{d\zeta}{1 + \zeta^{2/3}}).$$

iii) Cálculo do escoamento superficial

De acordo com STRELKOFF (1977), no cálculo da eficiência de aplicação da água, é de interesse conhecer o volume total de escoamento superficial. Este valor poderia, certamente, ser obtido pela determinação do volume total infiltrado no solo, através das curvas de avanço e recessão e da equação de infiltração, e então, subtraí-lo do volume total aplicado ao sulco.

Porém, existem meios alternativos para a determinação do escoamento superficial, que podem ser usados como uma comparação parcial na precisão das hipóteses físicas consideradas. Além disso, tais técnicas, que incluem a integração da vazão de escoamento superficial com o tempo, produzem também o valor da vazão no final do sulco, Q_1 , que indica a razão na qual o escoamento superficial é acumulado.

No método apresentado por LEVIEN e SOUZA (1987), o cálculo do escoamento superficial é dividido em duas partes. Primeiro é calculado o volume de água que escoou entre os tempos de avanço da água no sulco, t_L e o tempo de recessão t_r , e, em seguida, é calculado o escoamento superficial que ocorre após o tempo de recessão, t_r .

iv) Cálculo do escoamento superficial que ocorre antes da recessão

No tempo t_r , adotou-se que a superfície da água tem a forma mostrada na Fig. 13 e a profundidade $y_1 = S_y \cdot L$ no final do sulco. Baseado nisto, o volume armazenado na superfície do solo, no tempo t_r , $V_y(t_r)$, é dado por uma equação similar a Equação (54), isto é

$$V_y(t_r) = \frac{C}{(M+1) \cdot (M+2)} \cdot S_y^{M+1} \cdot L^{M+2} \quad (66)$$

Considerando t_r como sendo substancialmente maior do que t_L , o volume infiltrado no tempo t_r , $V_z(t_r)$, pode ser dado como segue:

$$V_z(t_r) = \frac{Z(t_r) + Z(t_r - t_L)}{2} \cdot B(y_0) \cdot L \quad (67)$$

Se o volume total aplicado ao sulco é V_0 , então

$$V_0 = Q_0 \cdot t_{co} \quad (68)$$

e o volume superficial no tempo t_r , é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{ro}(t_r) = V_0 - V_y(t_r) - V_z(t_r) \quad (69)$$

STRELKOFF (1977) afirmou que pode ser obtida uma maior eficácia na Equação (67), quando t_r é muito maior que t_L ; A Equação (69) só é válida se $t_r \gg t_L$.

Substituindo as Equações (66), (67) e (68) na Equação (69), fica

$$V_{ro}(t_r) = Q_0 \cdot t_{co} - \frac{C}{(M+1) \cdot (M+2)} \cdot S_y^{M+1} \cdot L^{M+2} - \frac{Z(t_r) + Z(t_r - t_L)}{2} \cdot B(y_0) \cdot L \quad (70)$$

equação esta que permite calcular o volume perdido por escoamento superficial antes da recessão.

v) Cálculo do escoamento superficial durante a recessão

De acôrdo com a Equação (55), a taxa de aumento do volume escoado superficialmente, V_{ro} , durante a recessão é:

$$\frac{dV_{ro}}{dt} = \frac{C}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot l)^{M+5/3} \quad (71)$$

Para evitar problemas na resolução da Equação (71), em face ao aparecimento do expoente $(M + 5/3)$ no termo $(S_y \cdot l)$, e como $(S_y \cdot l)^{M+5/3} = (S_y \cdot l)^{5/3} \cdot (S_y \cdot l)^M$, adota-se que $(S_y \cdot l)^M \cong (S_y \cdot L)^M$, que é constante e igual a y_1^M .

Então, a Equação (71) é reescrita como segue:

$$\frac{dV_{ro}}{dt} = \frac{C \cdot y_1^M}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot l)^{5/3}$$

$$\frac{dV_{ro}}{dt} = \frac{B(y_1)}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot S_y^{5/3} \cdot l^{5/3} \quad (72)$$

Substituindo-se as equações (58) e (61) na equação (72), e fazendo $\frac{dV_{ro}}{dt} = Q_1$; tem-se

$$Q_1 = B(y_1) \cdot G \cdot I \cdot l^{5/3} \quad (73)$$

$$Q_1 = B(y_1) \cdot \frac{\zeta^{2/3}}{l^{2/3}} \cdot I \cdot l^{5/3} \quad (74)$$

$$Q_1 = B(y_1) \cdot \zeta^{2/3} \cdot I \cdot l \quad (75)$$

Mas, pela equação (61) $\rightarrow l = \frac{\zeta}{G^{3/2}}$, então

$$Q_1 = B(y_1) \cdot \zeta^{2/3} \cdot \frac{\zeta}{G^{3/2}} \cdot I \quad (76)$$

$$\frac{dV_{ro}}{dt} = \frac{B(y_1) \cdot I(lM)}{G^{3/2}} \cdot \zeta^{5/3} \quad (77)$$

A Equação (57), em termos de ζ , é a seguinte:

$$\frac{d\zeta}{dt} = - G^{3/2} \cdot \frac{(M+1) \cdot I}{S_y} \cdot (1 + \zeta^{2/3}) \quad (78)$$

$$\frac{dV_{ro}}{d\zeta} = - \frac{B(\gamma_{n1}) \cdot S_y}{(M+1) \cdot G^3} \cdot \frac{\zeta^{5/3}}{(1-\zeta)^{2/3}} \quad (79)$$

Integrando em função do período de tempo de recessão, fica

$$\begin{aligned} \int_{V_{ro}(t_r)}^{V_{ro}(t)} dV_{ro} &= - \frac{B(\gamma_{n1}) \cdot S_y}{(M+1) \cdot G^3} \cdot \int_{G^{3/2} \cdot L}^{G^{3/2} \cdot l} \frac{\zeta^{5/3}}{1+\zeta^{2/3}} d\zeta = \\ &= \frac{B(\gamma_{n1}) \cdot S_y}{(M+1) \cdot G^3} \cdot \int_{G^{3/2} \cdot l}^{G^{3/2} \cdot L} \frac{\zeta^{5/3}}{1+\zeta^{2/3}} d\zeta \quad (80) \end{aligned}$$

Os detalhes de integração da Equação (80) são apresentados no Apêndice 3 (Cálculo da integral

$$\int \frac{\zeta^{5/3}}{1+\zeta^{2/3}} d\zeta).$$

$$\begin{aligned} V_{ro}(t) - V_{ro}(t_r) &= \frac{B(\gamma_{n1}) \cdot S_y}{(M+1) \cdot G^3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^2 - \right. \\ &- \frac{3}{4} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{4/3} + \frac{3}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{2/3} - \frac{3}{4} \cdot \ln [1 + \\ &+ (G^{3/2} \cdot L)^{2/3}] \left. \right) - \left(\frac{1}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot l)^2 - \frac{3}{4} \cdot (G^{3/2} \cdot l)^{4/3} + \right. \\ &+ \frac{3}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot l)^{2/3} - \frac{3}{4} \cdot \ln [1 + (G^{3/2} \cdot l)^{2/3}] \left. \right) \quad (81) \end{aligned}$$

O volume total de escoamento superficial, no tempo t_e , em que a irrigação ocorre, V_{re} é

$$\begin{aligned}
 V_{ro}(t_e) = V_{ro}(t_r) &+ \frac{BC_{yn1}}{(M+1) \cdot G^3} \cdot S_y \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^2 - \right. \\
 &- \frac{3}{4} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{4/3} + \frac{3}{2} \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{2/3} - \frac{3}{2} \cdot \ln [1 + \\
 &+ (G^{3/2} \cdot L)^{2/3}] \left. \right) \quad (82)
 \end{aligned}$$

onde a Equação (80) foi usada para encontrar o volume de escoamento superficial que ocorre antes da recessão, seja na fase de armazenamento ou na fase de depleção.

3.1.1.3 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DO MODELO DE LEVIEN E SOUZA (1987), PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR

O programa desenvolvido em linguagem PASCAL versão 6.0, que foi processado em microcomputador marca IBM, modelo 486-DX2, está apresentado no Apêndice 4 (Programa para processamento em computador digital - Modelo de LEVIEN e SOUZA, 1987). Apresenta-se ainda na Fig. 16, um fluxograma do programa desenvolvido, relativamente simplificado.

O programa necessita dos seguintes parâmetros físicos do sulco e do solo:

- comprimento do sulco (L);
- declividade do fundo do sulco (So);
- geometria da seção transversal do sulco (C e M);
- rugosidade da parede do sulco (n);
- características de infiltração do solo (K e a);
- fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial (ry e rz).

e dos parâmetros de irrigação:

- vazão de entrada (Qo);
- tempo de fornecimento de água ao sulco (tco).

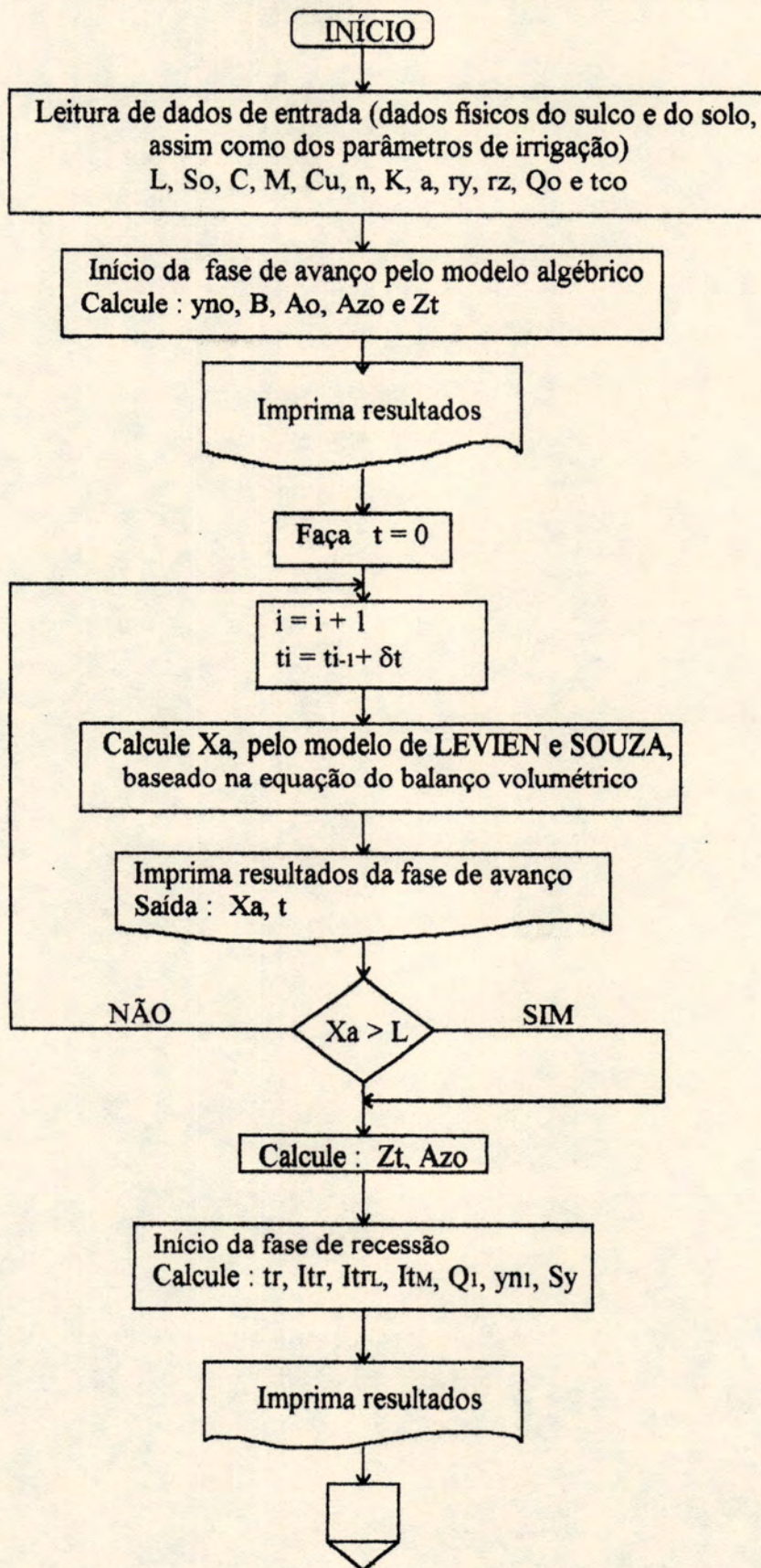
Os dados necessários para o processamento devem ser fornecidos na forma dimensional, em unidades tanto do Sistema Internacional como do Sistema Inglês, desde que o

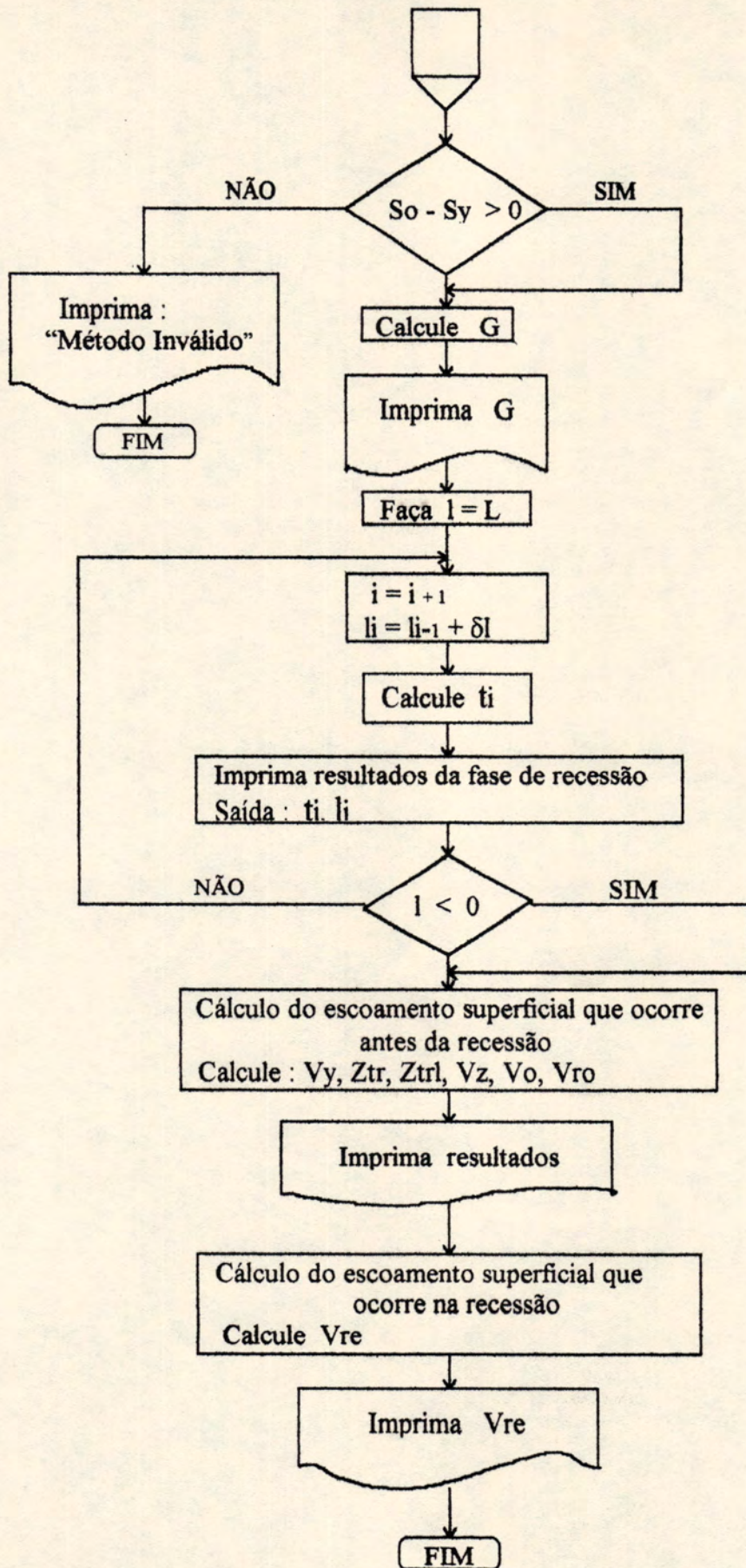
coeficiente dependente do sistema de unidades usado, "Cu", seja modificado, na entrada de dados do programa.

Em resumo, o programa apresenta as seguintes características principais:

- A forma da seção transversal dos sulcos deve ser descrita por uma equação parabólica, cujo coeficiente e expoente sejam determinados empiricamente a priori.
- Os dados de avanço determinados pelos dois modelos são ajustados à uma função monomial do tipo: $s(t) = f \cdot t^h$.
- O processo de infiltração de água no solo para todas as fases é descrito por uma única equação, a de Kostiaikov: $Z = K \cdot t^a$.
- O processamento fornece os tempos de avanço e recessão correspondentes a cada incremento de distância especificado e, como informações adicionais, o volume de escoamento superficial e o volume infiltrado.
- Os resultados da simulação - Modelo de LEVIEN e SOUZA (1987), estão apresentados no Apêndice B.

Figura 16- Fluxograma do programa desenvolvido para processamento em microcomputador - Modelo de LEVIEN e SOUZA (1987)





3.1.2 MODELO ANALÍTICO PARA A IRRIGAÇÃO POR SULCOS DE YU E SINGH (1990)

Foi desenvolvido um modelo analítico, baseado no balanço volumétrico, para simular todas as fases da irrigação por sulcos. O modelo transforma qualquer perfil da seção transversal real do sulco, em um perfil semi-circular de vazão equivalente, podendo ser aplicado, portanto, a qualquer forma de seção transversal do sulco.

O modelo utiliza perfis parabólicos para descrever os perfis superficiais e subsuperficiais e seus coeficientes são determinados sobre as condições de uma região de escoamento gradualmente variado, ao invés do escoamento francamente turbulento que ocorre na frente de avanço.

A fase de recessão é simulada através de uma modificação do modelo de STRELKOFF (1977) e a infiltração é simulada em três dimensões, ao invés de uma ou duas dimensões, como acontece na maioria dos modelos.

3.1.2.1 DERIVAÇÃO DO MODELO

Para a derivação do modelo foi adotado o seguinte:

- (1) A vazão de entrada é constante;
- (2) O sulco é homogêneo, (isto é, sua declividade, perfil da seção transversal, e rugosidade não variam com a posição);
- (3) A declividade do fundo do sulco é pequena, tal que $\text{sen}(\alpha) = \text{tg}(\alpha) = S_0$.

3.1.2.2 SEÇÃO TRANSVERSAL PADRONIZADA DO SULCO

As seções transversais idealizadas para os sulcos podem ser retangular, triangular, parabólica ou trapezoidal. Entretanto, uma seção transversal real do sulco está, normalmente, numa forma que se enquadra entre estas seções transversais. Além disso, o perfil da seção transversal do sulco varia, em cada período de irrigação. Por exemplo, um

sulco triangular pode se modificar gradualmente para o tipo parabólico.

Objetivando a adaptação deste modelo a qualquer perfil da seção transversal, um perfil da seção transversal real qualquer foi transformado num perfil padrão, que pode ser adotado como sendo uma seção transversal semi-circular.

As equações básicas para esse modelo são a equação da Continuidade e a equação de Manning, definida como

$$Q = \frac{60 \cdot S_0^{1/2}}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \quad (83)$$

onde Q = vazão de escoamento, L^3/T ;

S_0 = declividade do fundo do sulco, L/L ;

n = coeficiente de rugosidade de Manning, $T/L^{1/3}$;

A = área de escoamento, L^2 ;

R_h = raio hidráulico, L ;

O termo $A \cdot (R_h)^{2/3}$ na Equação (83) é determinado pelo perfil da seção transversal e da área de escoamento. Assim, de forma a manter a vazão constante, na transformação da seção transversal, o valor de $A \cdot (R_h)^{2/3}$ deve ser mantido constante, assim como os valores de S_0 e n .

Deveria-se notar que a área de escoamento e o perímetro molhado variam no decorrer do processo de irrigação (ou seja, nas fases de avanço, armazenamento e recessão). Entretanto, a área da seção transversal do sulco é normalmente pequena, e a área de escoamento normalmente ocupa mais do que 70% da área da seção transversal total do sulco. Assim, é simples e eficaz a transformação de uma seção transversal média real, num perfil semi-circular e o cálculo da área de escoamento equivalente e do raio hidráulico para a seção transversal transformada. A taxa de escoamento superficial e a taxa de infiltração, na seção transversal do sulco transformada não é significativamente diferente daquela da seção transversal de escoamento, transformada instantaneamente.

Para qualquer perfil do sulco, temos uma seção transversal semi-circular equivalente,

$$R = \frac{(2 \cdot Af)^{5/8}}{\pi^{3/8} \cdot Pf^{1/4}} \quad (84)$$

onde R = raio de um sulco semi-circular padronizado, L;
 Af = área média da seção transversal do sulco, L²;
 Pf = perímetro médio da seção transversal do sulco, L;

Para uma seção transversal trapezoidal, com declividade lateral mH:1V, o semi círculo correspondente será

$$R = \frac{[2 \cdot do \cdot (bo + m \cdot do)]^{5/8}}{\pi^{3/8} \cdot [bo + 2 \cdot do \cdot (1 + m^2)^{1/2}]^{1/4}} \quad (85)$$

onde do = profundidade, L;
 bo = largura máxima, L;
 m = declividade lateral, L.

Para uma seção transversal triangular, o raio R correspondente pode ser obtido fazendo-se bo = 0, na Equação (85),

$$R = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/8} \cdot \frac{do \cdot m^{5/8}}{(1 + m^2)^{1/8}} \quad (86)$$

Para uma seção transversal irregular, a seção transversal pode ser medida de tal forma que "N" segmentos tendo uma largura de $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$, com $i = 1, 2, \dots, N$, sejam dados em pares ordenados. Neste caso, pode-se calcular a área da seção transversal e o perímetro molhado como:

$$Af = \sum_{i=1}^N 0.5 \cdot (B_i + B_{i+1}) \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad (87)$$

$$Pf = \sum_{i=1}^N [(y_{i+1} - y_i)^2 + (B_{i+1} - B_i)^2]^{1/2} \quad (88)$$

O raio equivalente pode ser obtido pela Equação (84).

Com base nos experimentos de infiltração em duas dimensões de FOK e CHIANG (1984) e pela verificação dos modelos de infiltração em sulcos de SINGH et al. (1987), pode-se justificar a afirmação de que a transformação da seção transversal não somente mantém a vazão quase constante, como também o volume de água infiltrado quase o mesmo do que em qualquer seção transversal real.

FOK e CHIANG (1984) mostraram com seus experimentos que a taxa de infiltração na zona da superfície do solo é quase a mesma em todas as direções, e que depois de pouco tempo, o perfil da água infiltrada, próximo à seção transversal semi-circular transformada, poderia ser melhor do que para outras transformações do perfil.

3.1.2.3 FASE DE AVANÇO

Foi considerado um sulco inclinado num pequeno ângulo com a horizontal, com uma seção transversal semi-circular padronizada, de raio R . O comprimento do sulco é L , se estendendo com início em $x=0$. No tempo $t=0$, é introduzida uma vazão na entrada do sulco.

A função de avanço foi denominada como $x_a=x_a(t)$. No tempo t , a frente de avanço atinge $x = S$. A equação da Continuidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q_0 \cdot t = \int_0^S A_s(x,t) dx + \int_0^S A_i(x,t) dx \quad (89)$$

onde Q_0 = vazão de entrada constante ou vazão de entrada média no sulco, L^3/T ;

$A_s(x,t)$ = função de área do escoamento superficial, L^2 ;

$A_i(x,t)$ = função de área da água subsuperficial, sendo que $(0 \ll x \ll S, t \gg 0)$, L^2 .

Uma outra expressão simples da equação da Continuidade é:

$$Q_0 \cdot t = A_{sbarra}(S,t) \cdot S + A_{ibarra}(S,t) \cdot S \quad (90)$$

onde S = posição da frente de avanço, L.
 $A_{sbarra}(S,t)$ = área média superficial, correspondendo a posição S da frente de avanço, no tempo t , L^2 ;
 $A_{ibarra}(S,t)$ = área média subsuperficial, correspondendo a posição S da frente de avanço, no tempo t , L^2 ;

Um caso especial da Equação (90) foi usada por LEVIEN e SOUZA (1987), que utilizaram os fatores de perfil superficiais e sub-superficiais como

$$Q_0 \cdot t = A_o \cdot r_y \cdot S + A_i \cdot r_z \cdot S \quad (91)$$

onde A_o = área da seção transversal de escoamento na entrada do sulco, L^2 ;
 A_i = área de água infiltrada na entrada do sulco, no tempo t , L^2 ;
 r_y = fator de forma do perfil superficial, fornecido arbitrariamente por LEVIEN e SOUZA (1987) como sendo $r_y = 0.75$;
 r_z = fator de forma do perfil sub-superficial, fornecido arbitrariamente por LEVIEN e SOUZA (1987) como sendo $r_z = 0.80$.

A área para a vazão de entrada, A_o , e para uma seção transversal semi-circular, pode ser calculada como sendo:

$$A_o = R^2 \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2}}{(R - h_o)} \right) - (R - h_o) \cdot [R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2} \quad (92)$$

onde h_o = profundidade normal para a taxa de entrada na seção $x=0$, L.

O perímetro molhado na entrada do sulco, P_o , pode ser calculado como

$$P_o = 2 \cdot R \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2}}{(R - h_o)} \right) \quad (93)$$

Substituindo-se as Equações (92) e (93) na Equação (83), fica

$$Q_o = \frac{60 \cdot S_o^{1/2}}{n} \cdot \left(R^2 \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2}}{(R - h_o)} \right) - (R - h_o) \cdot [R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2} \right)^{5/3} : \left(2 \cdot R \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_o)^2]^{1/2}}{(R - h_o)} \right) \right)^{2/3} \quad (94)$$

Pela equação de Manning, para o escoamento normal na entrada do sulco,

$$F(h_o) = \left| Q_o - \frac{60 \cdot S_o^{1/2} \cdot A_o^{5/3}}{n \cdot P_o^{2/3}} \right| ; 0 \ll h_o \ll R \quad (95)$$

A profundidade de infiltração acumulada, na entrada do sulco pode ser calculada pela equação de infiltração de Kostikov modificada:

$$Z(t) = K \cdot t^a + C_i \cdot t \quad (96)$$

onde $Z(t)$ = lâmina infiltrada acumulada, função de t , L;

K = coeficiente da equação de infiltração de Kostikov modificada, L/T^a ;

a = expoente da equação de infiltração de Kostikov modificada;

C_i = constante de infiltração básica na equação de Kostikov modificada, L/T .

Já que a profundidade da água normalmente eleva-se mais rapidamente do que a profundidade normal, foi adotado que a profundidade infiltrada ao longo do perímetro

molhado, na entrada do sulco é uniforme. Assim, a área de água infiltrada na entrada do sulco pode ser calculada como:

$$A_i = 2.R.(K.t^a + C_i.t). \arctg \left\{ \frac{[R^2 - (R - h_0)^2]^{1/2}}{(R - h_0)} \right\} \quad (97)$$

Foi usada uma forma parabólica para descrever a função da área infiltrada (denominada curva de escoamento subsuperficial) na Equação (89),

$$A_i(x,t) = A_i . (C_0 + C_1.x + C_2.x^2) \quad (98)$$

onde C_n , $n = 0,1,2$, são coeficientes que são função somente do tempo.

Podem ser empregadas as seguintes condições limite:

$$A_i(0,t) = A_i \quad (99)$$

$$\frac{\delta A_i(0,t)}{\delta x} = 0 \quad (100)$$

Apesar da Equação (100) ser uma aproximação, ela pode desviar um pouco da realidade, pois a taxa de avanço superficial é normalmente muito mais rápida do que a taxa de infiltração. Conseqüentemente, o tempo de infiltração na vizinhança da entrada do sulco é quase o mesmo.

Por outro lado, o escoamento próximo a frente de avanço é rapidamente variado, assim como a taxa de infiltração e a área, próximas a frente de avanço. Desse modo, o perfil subsuperficial da água não pode ser estimado com eficácia suficiente, por causa das condições na frente de avanço. Entretanto, o escoamento gradualmente variado ocorre numa distância curta (tal como 2m), atrás da frente de avanço.

Similarmente ao que foi feito por DISKIN (1961), no cálculo da profundidade crítica numa estrutura erosiva, pode-se fazer uma estimativa melhor do perfil de escoamento, pelas condições que ocorrem atrás da frente de avanço. A

velocidade de escoamento na seção $x=S-2$ pode ser aproximada pela equação de Manning:

$$v_2 = \frac{60 \cdot S_0^{1/2}}{n} \cdot \left(\frac{A_2}{P_2} \right)^{2/3} \quad (101)$$

onde A_2 = área de escoamento superficial, na seção $x=S-2$, L^2 ,

P_2 = perímetro molhado do escoamento superficial, na seção $x=S-2$, L.

A área e o perímetro do escoamento superficial, para a seção $x=S-2$ podem ser determinados pelas Equações (113) e (114), respectivamente.

Já que a profundidade da água na frente de avanço varia de zero até h_2 (L), que é a profundidade da água na seção $x=S-2$, podemos estimar o tempo de infiltração médio na seção $x=S-2$, t_2 , como sendo

$$t_2 = \frac{2}{0.5 \cdot v_2}$$

$$t_2 = \frac{n}{15 \cdot S_0^{1/2}} \cdot \left(\frac{P_2}{A_2} \right)^{2/3} \quad (102)$$

A área de água infiltrada na seção $x = S-2$, A_{i2} , pode ser estimada como

$$A_{i2} = P_2 \cdot (K \cdot t_2^3 + C_i \cdot t_2) \quad (103)$$

A aplicação das Equações (99), (100) e (103) para resolver a Equação (98) usa coeficientes C_n , com $n = 0,1,2$, assim:

$$C_0 = 1 \quad (104a)$$

$$C_1 = 0 \quad (104b)$$

$$C_2 = - \frac{(A_1 - A_{i2})}{A_1 \cdot (S - 2)^2} \quad (104c)$$

e o perfil subsuperficial fica :

$$A_i(x, t) = A_1 \cdot \left[1 - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot x^2}{A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] \quad (105)$$

O volume total de água infiltrada no tempo t , é

$$\begin{aligned} V_{ia} &= \int_0^S A_i(x, t) dx = \int_0^S A_1 \cdot \left[1 - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot x^2}{A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] dx = \\ &= A_1 \cdot \left[x - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot x^3}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \right]_0^S = A_1 \cdot \left[S - \right. \\ &\left. - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot S^3}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] = A_1 \cdot S \cdot \left[1 - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot S^2}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] \end{aligned} \quad (106)$$

Similarmente, o perfil da área de escoamento superficial (denominada curva de escoamento superficial), é também adotada como sendo de forma parabólica.

$$A_s(x, t) = A_0 \cdot (e_0 + e_1 \cdot x + e_2 \cdot x^2) \quad (107)$$

onde e_i , $i=0,1,2$, são coeficientes que são função somente do tempo.

Como descrito anteriormente, as condições limite à montante podem ser escritas como

$$A_s(0, t) = A_0 \quad (108)$$

$$\frac{\partial A_s(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (109)$$

A terceira condição limite pode ser estimada na seção $x=S-2$. Para o escoamento uniforme, a taxa de infiltração média para uma distância de avanço S , no tempo t , I , pode ser obtida pela diferenciação da equação de Kostiaikov modificada, integrando-a sobre o período de tempo t , e então sua média fica sendo

$$I = \frac{1}{t} \cdot \int_c^t (K \cdot a \cdot t^{a-1} + C_i) dt = \frac{1}{t} \cdot [K \cdot a \cdot \frac{t^a}{a} + C_i \cdot t] = K \cdot t^{a-1} + C_i \quad (110)$$

Para o escoamento gradualmente variado, a Equação (110) pode ser empregada, pela multiplicação de um coeficiente uniforme f . Assim, a taxa de escoamento na seção $x=S-2$, Q_2 , pode ser estimada como

$$Q_2 = Q_0 \cdot 0.5 \cdot f \cdot I \cdot (P_0 + P_2) \cdot (S - 2) \quad (111)$$

Por outro lado, a taxa de escoamento na seção $x=S-2$, Q_2 , pode ser calculado pela equação de Manning como

$$Q_2 = \frac{60 \cdot S_0^{1/2} \cdot A_2}{n} \cdot \left(\frac{A_2}{P_2}\right)^{2/3} \quad (112)$$

A área de escoamento superficial na seção $x=S-2$, A_2 , pode ser calculada como

$$A_2 = R^2 \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_2)^2]^{1/2}}{(R - h_2)} \right) - (R - h_2) \cdot [R^2 - (R - h_2)^2]^{1/2} \quad (113)$$

O perímetro molhado do escoamento superficial na seção $x=S-2$, P_2 , pode ser calculado como

$$P_2 = 2 \cdot R \cdot \arctg \left(\frac{[R^2 - (R - h_2)^2]^{1/2}}{(R - h_2)} \right) \quad (114)$$

As Equações (111) e (112) ficam

$$Q_0 = 0.5 \cdot f \cdot (K \cdot t^{a-1} + C_i) \cdot (P_0 + P_2) \cdot (S - 2) + \frac{60 \cdot S_0^{1/2} \cdot A_2^{5/3}}{n \cdot P_2^{2/3}} ; \quad 0 \ll h_2 \ll h_0 \quad (115)$$

O valor da profundidade de escoamento na seção 2m antes da frente de avanço, h_2 , pode ser obtido resolvendo-se a Equação (115). Assim, os valores de A_2 e P_2 podem ser calculados pelas Equações (113) e (114), respectivamente. Naturalmente, isto envolve a resolução simultânea das Equações (113)-(115).

A aplicação das Equações (108), (109) e (113) para resolver a Equação (107) usa os seguintes valores de coeficientes na Equação (107):

$$e_0 = 1 \quad (116a)$$

$$e_1 = 0 \quad (116b)$$

$$e_2 = - \frac{(A_0 - A_2)}{A_0 \cdot (S - 2)^2} \quad (116c)$$

A função de área do escoamento superficial, A_s , fica,

$$A_s(x,t) = A_0 \cdot \left[1 - \frac{(A_0 - A_2) \cdot x^2}{A_0 \cdot (S - 2)^2} \right] \quad (117)$$

O volume de água superficial no tempo t , V_{sa} , correspondente a posição S da frente de avanço, é

$$V_{sa} = \int_0^S A_s(x,t) dx = A_0 \cdot S \cdot \left[1 - \frac{(A_0 - A_2) \cdot S^2}{3 \cdot A_0 \cdot (S - 2)^2} \right] \quad (118)$$

Substituindo as Equações (106) e (118) na Equação (89), a solução da função de avanço se torna:

$$Q_0 \cdot t = A_0 \cdot S \cdot \left[1 - \frac{(A_0 - A_2) \cdot S^2}{3 \cdot A_0 \cdot (S - 2)^2} \right] + A_1 \cdot S \cdot \left[1 - \frac{(A_1 - A_{12}) \cdot S^2}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] \quad (119)$$

Em comparação a equação de LEVIEN e SOUZA (1987), o fator de perfil superficial no modelo proposto é

$$r_y = 1 - \frac{(A_0 - A_2) \cdot S^2}{3 \cdot A_0 \cdot (S - 2)^2} \quad (120)$$

e o fator de perfil subsuperficial é

$$r_z = 1 - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot S^2}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \quad (121)$$

É evidente que tanto o fator de perfil superficial, r_y , quanto o subsuperficial, r_z , são funções explícitas da taxa de entrada, da rugosidade superficial, e da declividade do fundo do canal, assim como das características da infiltração.

A Equação (119) é uma função implícita de t para uma dada distância de avanço S . Pode-se obter a solução de t por iteração, usando a seguinte equação:

$$t = \frac{A_0 \cdot S}{Q_0} \cdot \left[1 - \frac{(A_0 - A_2) \cdot S^2}{3 \cdot A_0 \cdot (S - 2)^2} \right] + \frac{A_1 \cdot S}{Q_0} \cdot \left[1 - \frac{(A_1 - A_{i2}) \cdot S^2}{3 \cdot A_1 \cdot (S - 2)^2} \right] \quad (122)$$

3.1.2.4 FASE DE ARMAZENAMENTO

Fazendo T_a ser o tempo total de avanço e T_s o tempo total de entrada, então, se $T_s \gg T_a$, o ciclo de irrigação contém a fase de armazenamento. Adotando-se como desprezível as variações do armazenamento superficial durante esta fase, a taxa de escoamento superficial na saída do sulco, Q_{of} , pode ser estimada como sendo

$$Q_{of} = Q_0 - I \cdot P_{barra} \cdot L \quad (123)$$

onde L = comprimento do sulco, L ;

I = taxa de infiltração média sobre todo o comprimento do sulco, L/T .

Esta taxa de infiltração média, I , pode se estimada como

$$I = 0.5.K.a.[t^{a-1} + (t - T_a)^{a-1}] + C_i; \quad T_a \ll t \ll T_s \quad (124)$$

E o perímetro molhado médio do escoamento superficial, P_{barra} , é estimado como segue:

$$P_{barra} = 0.5 \cdot (P_o + P_e) \quad (125)$$

onde P_{barra} = perímetro molhado médio do escoamento superficial, L;

P_e = perímetro molhado do escoamento superficial na entrada do sulco, L.

O perímetro molhado do escoamento superficial na entrada do sulco, P_e , é estimado pela seguinte equação

$$P_e = 2 \cdot R \cdot \arctg \frac{[R^2 - (R - h_e)^2]^{1/2}}{(R - h_e)} \quad (126)$$

onde h_e = profundidade de escoamento na saída do sulco, L.

Por outro lado, a taxa de escoamento superficial na saída do sulco, Q_{of} , pode ser calculada pela equação de Manning,

$$Q_{of} = \frac{60 \cdot S_o^{1/2} \cdot A_e^{5/3}}{n \cdot P_e^{2/3}} \quad (127)$$

onde A_e = área de escoamento superficial na entrada do sulco, L^2 .

$$A_e = R^2 \cdot \arctg \frac{[R^2 - (R - h_e)^2]^{1/2}}{(R - h_e)} - (R - h_e) \cdot [R^2 - (R - h_e)^2]^{1/2} \quad (128)$$

Pelas Equações (123) e (127) se pode obter o

valor da profundidade de escoamento na saída do sulco, h_e , por iteração. Assim, a taxa de escoamento superficial na saída do sulco, Q_{of} , pode ser obtida da Equação (127).

3.1.2.5 FASE DE RECESSÃO VERTICAL

Quando a taxa de entrada é cortada no tempo T_s , a fase de recessão vertical se inicia. Adotando-se que a profundidade de escoamento na entrada do sulco é constante e é normal, e que o volume de água a ser esgotado é $0.5 \cdot A_o \cdot L$ (STRELKOFF, 1977), a equação da Continuidade pode ser expressa como:

$$Q_{of}(T_s)(T_v - T_s) + I_{lbarra} \cdot P_{lbarra} \cdot L \cdot (T_v - T_s) = 0.5 \cdot A_o \cdot L \quad (129)$$

onde $Q_{of}(T_s)$ = taxa de escoamento superficial, no tempo T_s , L^3/T ;

T_v = Tempo de irrigação acumulado no final da fase de recessão vertical, T ;

I_{lbarra} = taxa de infiltração média no tempo T_v , L/T ;

P_{lbarra} = perímetro molhado médio no tempo T_v , L .

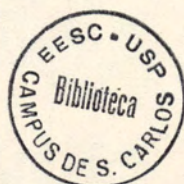
A taxa de infiltração média no tempo T_v , I_{lbarra} , pode ser estimada como

$$I_{lbarra} = 0.25 \cdot K \cdot a \cdot [T_v^{a-1} + T_s^{a-1} + (T_v - T_s)^a + (T_s - T_a)^{a-1}] + C_i \quad (130)$$

e o perímetro molhado médio no tempo T_v , P_{lbarra} , pode ser estimado por

$$P_{lbarra} = 0.5 \cdot [0.5 \cdot P_o + P_e(T_s)] \quad (131)$$

onde $P_e(T_s)$ = perímetro molhado na entrada do sulco, no tempo T_s , L .



O perímetro molhado na entrada do sulco no tempo T_s , $P_e(T_s)$, pode ser obtido pela Equação (126) e o tempo de irrigação acumulado no final da fase de recessão vertical, T_{vc} , pode ser calculado por

$$T_{vc} = T_s + \frac{0.5 \cdot A_o \cdot L}{O_o f(T_s) + I_{\text{barra}} \cdot P_{\text{barra}} \cdot L} \quad (132)$$

A Equação (132) é uma função implícita do tempo T_v , e pode ser resolvida pelo método iterativo.

3.1.2.6 FASE DE RECESSÃO HORIZONTAL

A fase de recessão horizontal se inicia quando a profundidade de escoamento na entrada do sulco se reduz a zero. Durante esta fase, é adotado que o perfil superficial é linear; que o escoamento na saída do sulco é normal (STRELKOFF, 1977) e que a profundidade do escoamento diminui proporcionalmente ao comprimento da última posição restante na saída do sulco, podendo ser expressa por

$$h_t = \frac{h_e(T_s)}{L} \cdot (L - x_r) \quad (133)$$

- onde x_r = posição de recessão, L;
 h_t = profundidade de escoamento na saída do sulco, no tempo t_r , L;
 $h_e(T_s)$ = profundidade de escoamento na saída do sulco, no tempo T_s , L.

O volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r , V_{tr} , é

$$V_{tr} = 0.5 \cdot A_t \cdot (L - x_r) \quad (134)$$

onde

$$A_t = R^2 \cdot \arctg\left(\frac{[R^2 - (R - h_t)^2]^{1/2}}{(R - h_t)} \right) - (R - h_t) \cdot [R^2 - (R - h_t)^2]^{1/2} \quad (135)$$

A taxa de escoamento superficial no tempo t_r , Q_t , pode ser calculada pela equação de Manning,

$$Q_t = \frac{60 \cdot S_o^{1/2} \cdot A_t^{5/3}}{n \cdot P_t^{2/3}} \quad (136)$$

onde P_t = perímetro molhado na saída do sulco, no tempo t_r ,
L.

$$P_t = 2 \cdot R \cdot \arctg \frac{[R^2 - (R - h_t)^2]^{1/2}}{(R - h_t)} \quad (137)$$

A taxa de infiltração média nesta fase é normalmente pequena e pode ser estimada por:

$$I_{barra} = 0.5 \cdot K \cdot a \cdot [T_v^{a-1} + (t_r - T_a)^{a-1}] + C_i \quad (138)$$

A equação da Continuidade para um tempo incremental Δt , vindo de t_r , pode ser escrita como

$$V(t_r) - V(t_r + \Delta t) = \frac{60 \cdot S_o^{1/2} \cdot A_t^{5/3}}{n \cdot P_t^{2/3}} \cdot \Delta t + \frac{P_t \cdot I_{barra} \cdot (L - x_r)}{2} \cdot \Delta t \quad (139)$$

O volume de água na superfície no início do tempo de recessão, V_{tv} , é

$$V_{tv} = 0.5 \cdot A_e(T_s) \cdot L \quad (140)$$

onde $A_e(T_s)$ = área de escoamento na saída do sulco no tempo T_s , L^2 .

A área de escoamento na saída do sulco, no tempo T_s , $A_e(T_s)$, pode ser calculada pela Equação (128). Assim, para uma dada posição restante x_r , $x_r = i \cdot \Delta x$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ($n = \text{INT}(L/\Delta x)$, $\text{INT}(\cdot)$ é a função que cerca um dado valor para o número inteiro próximo, e Δx é o incremento de distância dado), h_t pode ser calculado pela Equação (133).

Então, $V(t_r + \Delta t)$, Q_t , P_t e I_{barra} podem ser

calculados pelas Equações (134), (136), (137) e (138), respectivamente. Dessa forma, o incremento de tempo, Δt , no tempo t_r , pode ser obtido pela Equação (139) como sendo

$$\Delta t = \frac{V(t_r^i) - V(t_r^i + \Delta t)}{Q_i + 0.5 \cdot F_i \cdot Ibarra \cdot (L - x_r)} \quad (141)$$

e o novo tempo de recessão fica

$$t_r^{i+1} = t_r^i + \Delta t \quad (142)$$

onde i = número de incrementos de tempo calculados.

Repetindo este procedimento de cálculo até que $x_r=L$, pode-se simular todo o ciclo da irrigação.

3.1.2.7 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DO MODELO DE YU E SINGH (1990), PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR

O programa desenvolvido em linguagem PASCAL versão 6.0, que foi processado em microcomputador marca IBM, modelo 486-DX2, está apresentado no Apêndice B (Programa para processamento em microcomputador - Modelo de YU e SINGH, 1990). Apresenta-se, ainda, na Fig. 17, um fluxograma do programa desenvolvido, relativamente simplificado.

Basicamente, este programa necessita dos mesmos dados de entrada que o programa do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987), descritos no item 3.1.1.3, parâmetros físicos do sulco e do solo e parâmetros de irrigação, além do coeficiente dependente do sistema de unidades usado, C_u . Com exceção dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial (r_y e r_z) que, neste modelo são calculados por equações dependentes da vazão de entrada, da rugosidade superficial e da declividade do fundo do canal, assim como das características de infiltração do solo.

Houve necessidade de se acrescentar aos dados de entrada do modelo de LEVIEN e SOUZA (1987), um coeficiente de correção do escoamento não-uniforme, f , fixado pelo

modelo de YU e SINGH (1990) como sendo $f = 0,35$ e uma constante de infiltração básica da equação de Kostiaikov modificada, C_i .

O programa de YU e SINGH (1990) apresenta as mesmas características do programa de LEVIEN e SOUZA (1987), com exceção à equação de infiltração utilizada para a descrição do processo de infiltração de água no solo, para todas as fases, que é a de Kostiaikov modificada: $Z = K \cdot t^a + C_i \cdot t$.

Devido a complexidade e do grande número de iterações impostas pelo modelo, e visando a redução radical do tempo de processamento deste, tornando-o viável, houve necessidade da implantação de uma técnica de pesquisa em uma variável, para funções não-lineares, a "Pesquisa de Fibonacci".

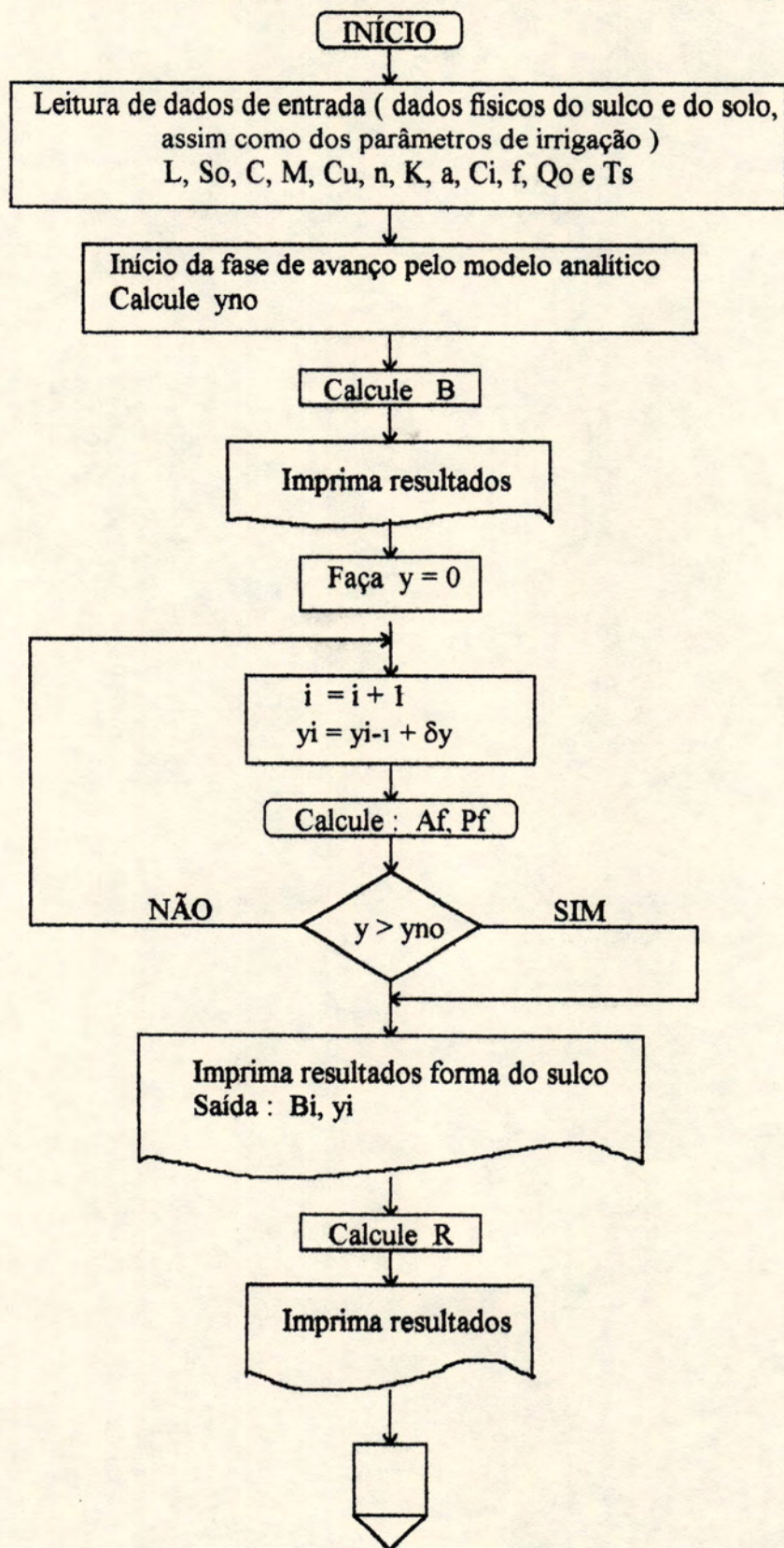
A principal característica deste método de otimização é que ele especifica um intervalo em que o valor ótimo se situa e procura reduzir sucessivamente o intervalo. Para tanto, a função em questão deve ser unimodal, isto é, deve existir somente um valor estacionário no intervalo de interesse. Além disso, supomos que o valor estacionário x^* fosse um mínimo.

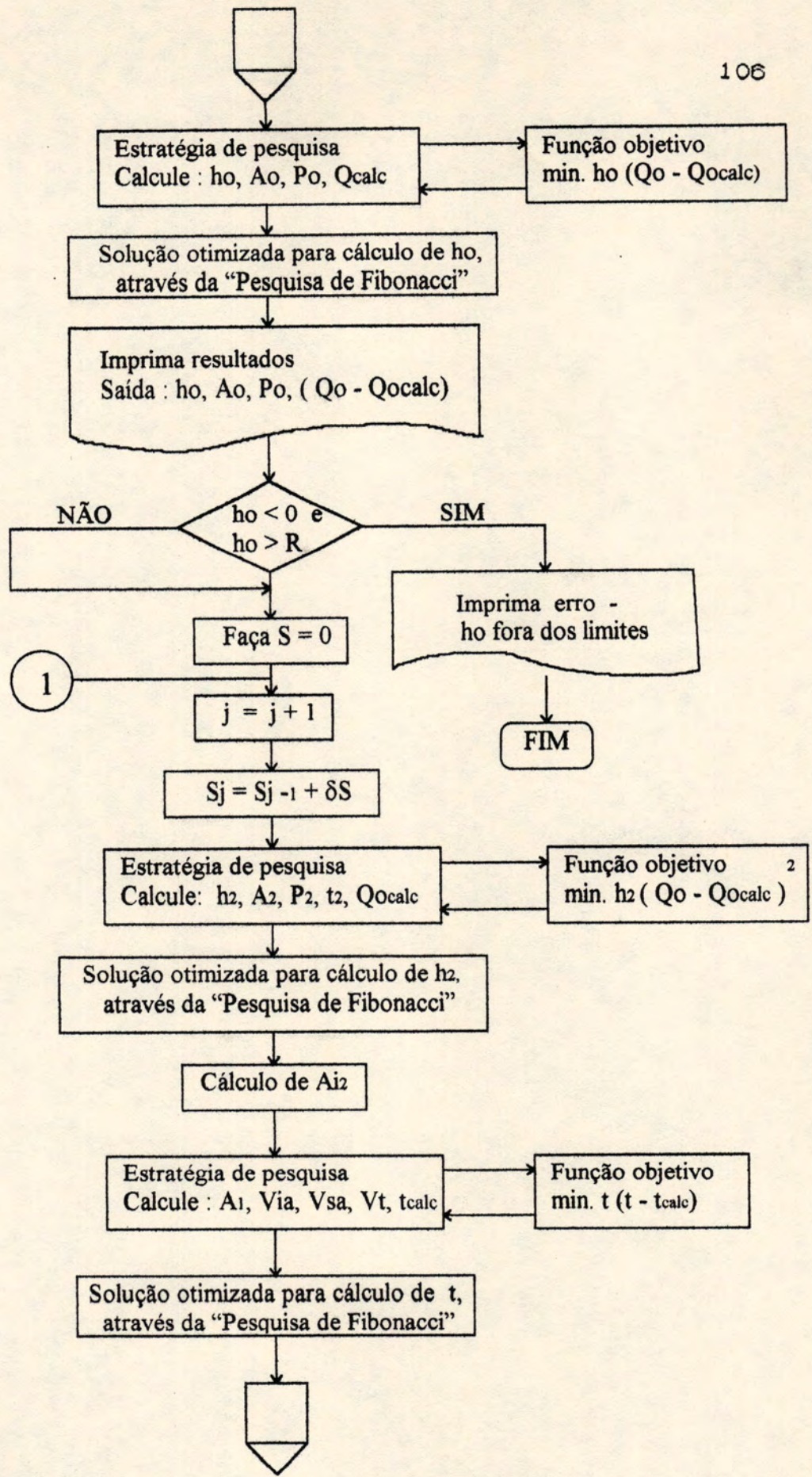
Esta estratégia de busca concorda com a necessidade do menor número de avaliações de função possíveis.

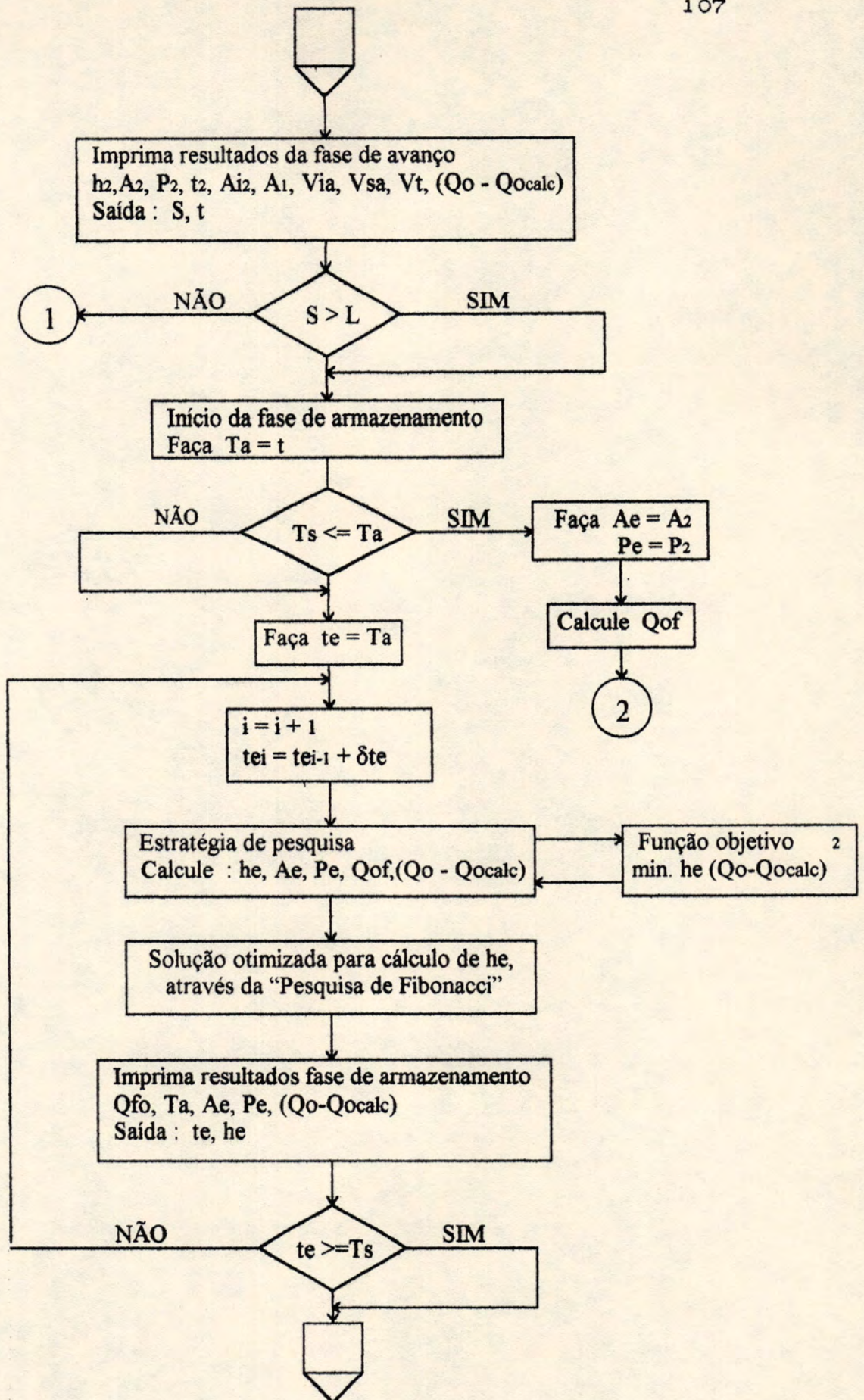
O fluxograma para a pesquisa de Fibonacci é mostrado pela Fig. 18.

Os resultados da simulação - Modelo de YU e SINGH (1990) estão apresentados no Apêndice 7.

Figura 17- Fluxograma do programa desenvolvido para processamento em microcomputador - Modelo de YU e SINGH (1990)







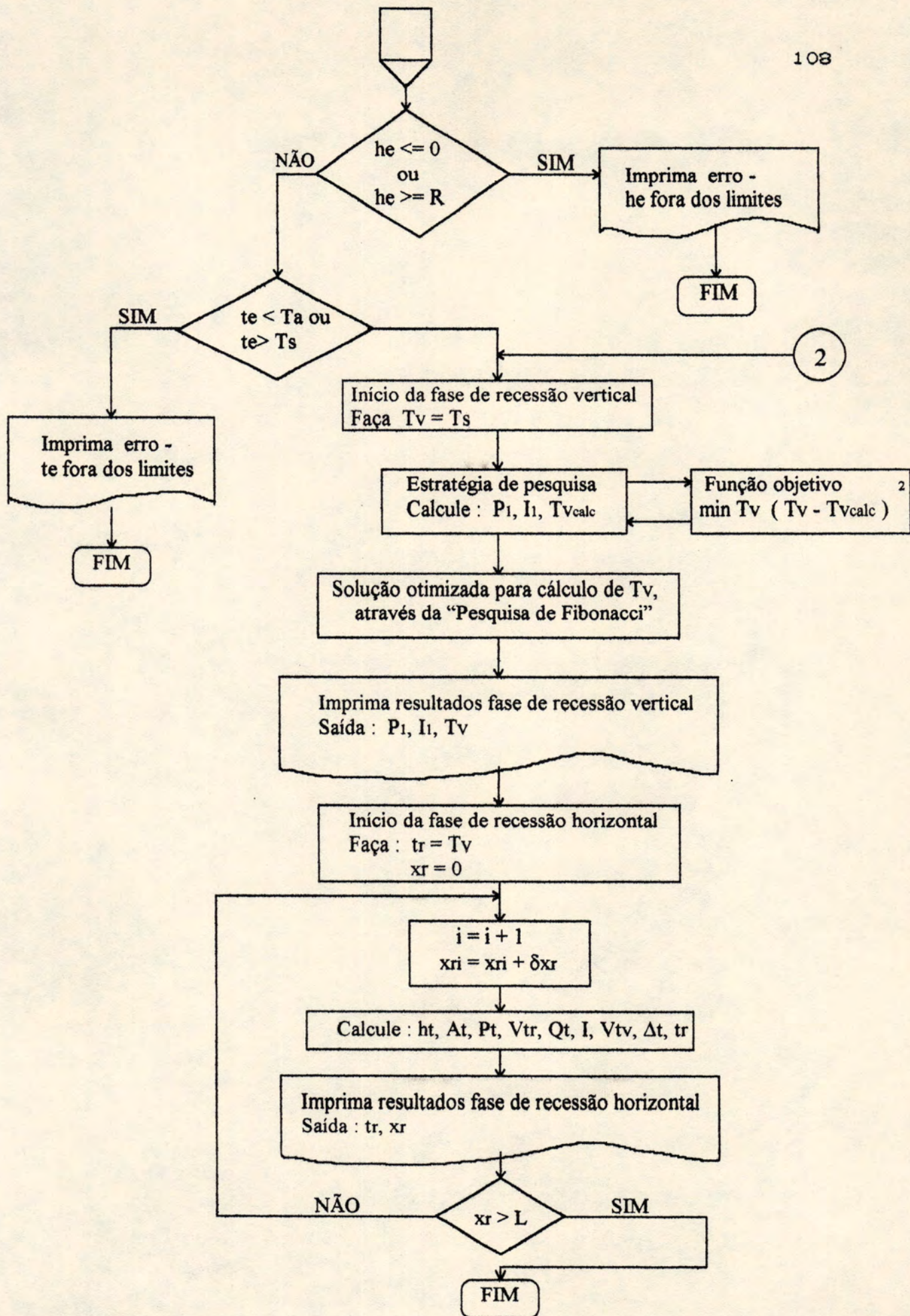
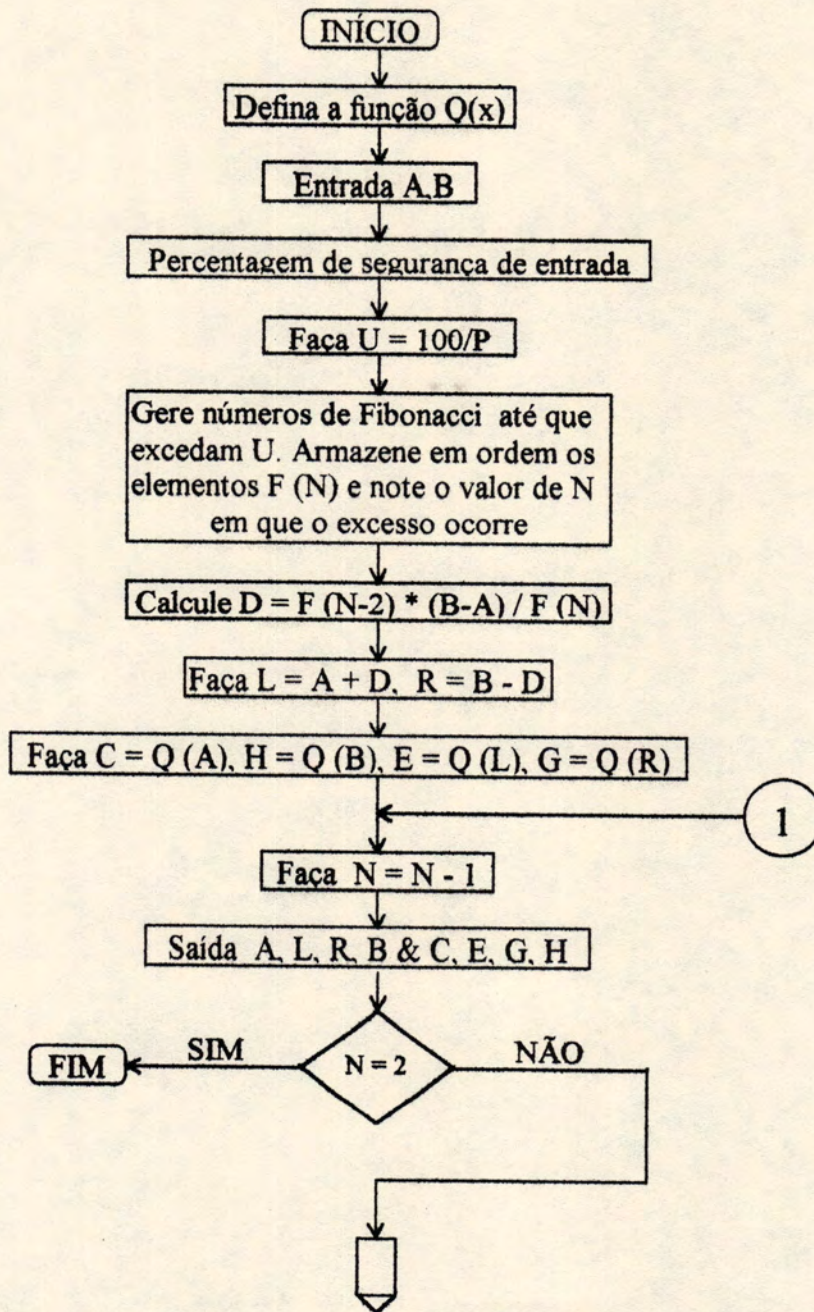
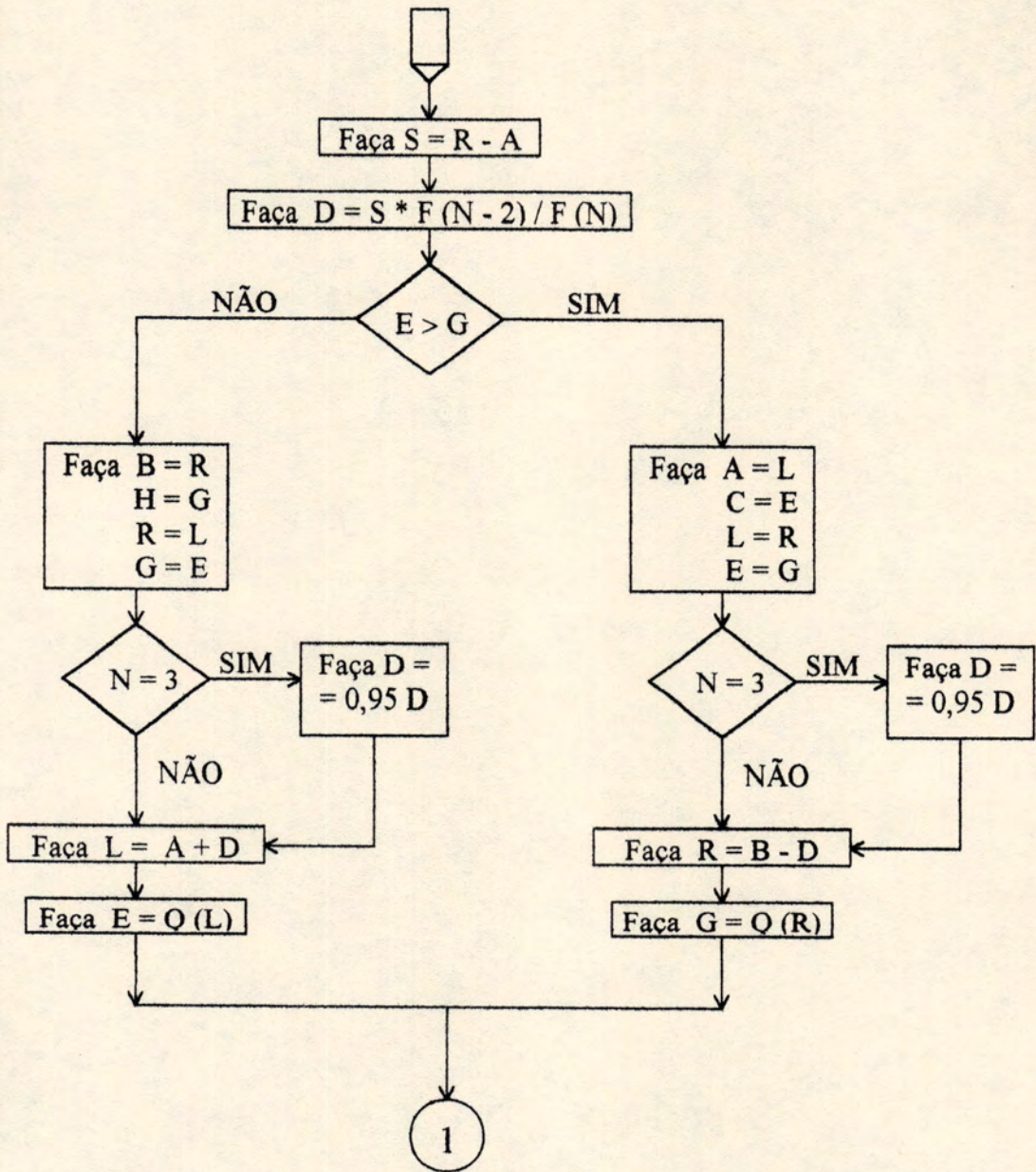


Figura 18 - Fluxograma para a pesquisa de Fibonacci





4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados e testados com três diferentes resultados obtidos em campo, dois modelos matemáticos, à saber o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e o modelo analítico de YU e SINGH (1990).

Estes resultados compreendem diversos tipos de sulcos, com diferentes características físicas e do solo, porém dando-se preferência a mesma forma, parabólica, para tornar viável a avaliação do desempenho e comparação dos modelos.

Os dados utilizados no primeiro exemplo foram obtidos por RAMSEY (1976) em sulcos construídos em um campo de precisão¹ localizado no Laboratório de Irrigação e Drenagem da Universidade do Arizona (EUA). O segundo e o terceiro exemplos, denominados respectivamente como "Dados do Colorado" e "Dados de Stieben Farm", utilizam informações geradas em avaliações de campo, pela equipe de pesquisadores da Universidade do Estado do Colorado (EUA).

Dentre os vários aspectos de uma irrigação por sulcos a serem considerados na avaliação da performance dos modelos, o avanço e recessão são os mais importantes. Serão analisados também outros parâmetros necessários ao projeto e avaliação de sistemas de irrigação por sulcos, como o volume de escoamento superficial, o volume infiltrado e as eficiências de aplicação da água e de armazenamento.

(1) O termo precisão está empregado neste trabalho com o mesmo sentido proposto por ROTH et al. (1974), para indicar um grau de controle, relativamente à condição da superfície de escoamento, consideravelmente superior ao encontrado em uma parcela típica de irrigação.

Os modelos matemáticos selecionados para estudo têm as seguintes características em comum:

- são baseados no conceito de balanço volumétrico;
- são aplicáveis a irrigação por sulcos homogêneos, abertos e em declive, com drenagem livre;
- podem ser aplicados a sulcos com seção transversal parabólica;
- analisam todas as fases da irrigação, à saber avanço, armazenamento, depleção e recessão, se houverem;
- utilizam perfis parabólicos para descrever os perfis superficial e subsuperficial;
- adotam como sendo constante a vazão de entrada;
- consideram a declividade do fundo do sulco como sendo pequena, ou seja $S_f = S_o$.

Os modelos diferem na forma de análise, algébrica ou analítica, sendo que para a resolução das equações apresentadas por YU e SINGH (1990) houve a necessidade de se recorrer a um processo iterativo, ou mesmo a otimização. Diferem também na formulação básica utilizada para o cálculo da infiltração acumulada.

O modelo de LEVIEN e SOUZA (1987) utiliza a função empírica de Kostiaikov - Lewis, enquanto que o modelo de YU e SINGH (1990) utiliza a função de Kostiaikov modificada para descrever o processo de infiltração. E ainda, este último determina os coeficientes dos perfis superficial e subsuperficial sobre as condições de uma região de escoamento gradualmente variado, ao invés do escoamento francamente turbulento que ocorre na frente de avanço.

4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS PARA SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

A avaliação dos sistemas de irrigação é fundamental para se averiguar se os mesmos estão com um desempenho satisfatório. A análise dos dados de campo permite a definição quantitativa da performance do sistema de irrigação.

As figuras 19, 20 e 21 representam a relação entre a quantidade de água aplicada e a distribuição da umidade do solo. Os diferentes perfis de distribuição da água infiltrada conforme o manejo utilizado, mostram se a irrigação é adequada ou não.

Se o fornecimento de água for cortado, após um curto período depois do término da fase de avanço, e a quantidade de água aplicada em algum ponto do campo for insuficiente, tem-se uma irrigação deficiente (Fig. 19). Se a quantidade de água aplicada for suficiente para suprir a zona radicular das plantas, ou seja, quando as áreas irrigadas receberem apenas a quantidade de água necessária, tem-se uma irrigação adequada (Fig. 20). E, finalmente, e mais frequentemente, ocorre o caso da irrigação excessiva, em que a quantidade de água aplicada excede a necessária (Fig. 21).

Strelkoff (1977), citado por SOUZA (1981) e por LEVIEN (1985), definiu dois parâmetros necessários para a avaliação da performance de uma irrigação: a eficiência de aplicação da água, E_a , e a eficiência de armazenamento, E_s .

A eficiência de aplicação da água é a relação entre o volume de água útil, V_u , e o volume total de água aplicado, V_o , ou seja:

$$E_a = \frac{V_u}{V_o} \quad (143)$$

Considerando que a definição da área da seção transversal infiltrada necessária, A_{zr} , é

$$A_{zr} = Z_r \cdot E \quad (144)$$

onde Z_r = lâmina infiltrada necessária (L);

E = espaçamento entre sulcos (L).

então, o volume de água útil será a integral sobre o campo destas áreas infiltradas, A_z , que são menores ou iguais a área infiltrada necessária. Assim sendo, se a área infiltrada mínima no perfil é maior ou igual a A_{zr} , então o

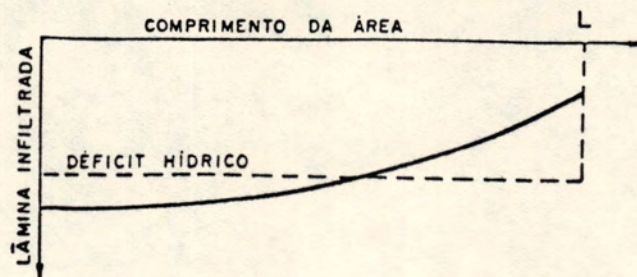


Figura 19- Distribuição da água infiltrada - Irrigação deficiente (WALKER e SKOGERBOE, 1984)

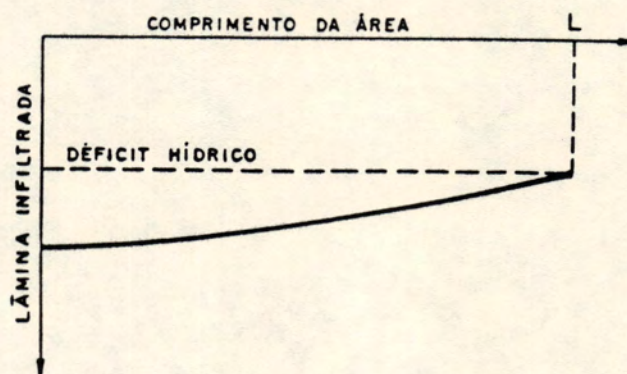


Figura 20- Distribuição da água infiltrada - Irrigação adequada (WALKER e SKOGERBOE, 1984)

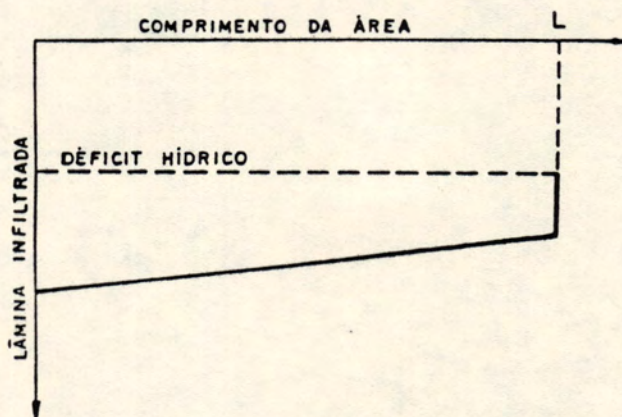


Figura 21- Distribuição da água infiltrada - Irrigação excessiva (WALKER e SKOGERBOE, 1984)

volume de água útil é calculado simplesmente como:

$$V_u = A_{zr} \cdot L \quad (145)$$

A eficiência de armazenamento, E_s , é a relação entre o volume útil e o volume necessário, ou seja,

$$E_s = \frac{V_u}{A_{zr} \cdot L} \quad (146)$$

O erro relativo médio, E_r , foi calculado para cada dado computado pelos modelos, em comparação aos dados observados em campo, ou seja

$$E_r = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|t_c - t_{ob}|}{t_{ob}} \quad (147)$$

onde t_c = tempos calculados (T);

t_{ob} = tempos observados (T);

N = número de observações (adimensional).

E, finalmente, o erro absoluto médio, E_{ab} , foi calculado similarmente ao E_r , usando-se a expressão

$$E_{ab} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_c - t_{ob}| \quad (148)$$

4.1.1 EXEMPLO Nº 01: DADOS DE RAMSEY

Para considerar o caso geral, foram utilizados os dados obtidos por RAMSEY (1976), em um campo de precisão. A forma do sulco é uma equação descrita por $B = 2,095 \cdot y^{0,4539}$, onde B é a largura da superfície livre da água, na seção transversal do sulco e y é a lâmina d'água.

As características principais do sulco e da irrigação identificada por F-2, no trabalho citado, que foram utilizadas como parâmetros de entrada para os modelos analisados, estão anotadas no Quadro 4.1.1.

QUADRO 4.1.1 - PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA IRRIGAÇÃO F-2
(RAMSEY, 1976, PG 43, 57)

$$\begin{aligned}
 L &= 330 \text{ ft} \\
 S_o &= 0,001032 \\
 n &= 0,022 \\
 Q_o &= 0,047 \text{ ft}^3/\text{s} \text{ (2,82 ft}^3/\text{min)} \\
 C_u &= 1,486 \text{ ft}^{1/2}/\text{s} \text{ (89,16 ft}^{1/2}/\text{min)} \\
 K &= 4,0972 \cdot 10^{-9} \text{ ft/s}^a \text{ (0,0317367 ft/min}^a) \\
 a &= 0,50 \\
 C_i &= 0 \\
 f &= 0,35 \\
 t_s &= 208 \text{ min} \\
 r_y &= 0,75 \\
 r_z &= 0,80
 \end{aligned}$$

Os valores n , K e a foram determinados pelo processo descrito por SOUZA (1981) e por STRELKOFF e SOUZA (1984). Os valores de r_y e r_z foram estabelecidos pelo autor.

TABELA 01 - Dados de avanço e recessão de RAMSEY (1976)

Distância	Avanço	Recessão
(ft)	(min)	(min)
0	0	215
30	1,05	225
60	2,35	230
90	3,6	230
120	5	230
150	6,5	231
180	8,05	232
210	9,65	233
240	11,55	234
270	13,6	233
300	15,65	233
330	17,95	234

As TABELAS 02 e 03 apresentam os dados de avanço e recessão computados pelos modelos algébrico de LEVIEN e SOUZA, (1987) e analítico de YU e SINGH (1990), respectivamente, com parâmetros de entrada de RAMSEY (1976).

TABELA 02- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 01 - RAMSEY, 1976)

Distância	Avanço	Recessão	Distância	Avanço	Recessão
(ft)	(min)	(min)	(ft)	(min)	(min)
0	0	212,5864	170	8,2484	219,0506
5	0,0479	212,7441	175	8,5649	219,2901
10	0,2324	212,9033	180	8,8854	219,5339
15	0,4209	213,0639	185	9,2099	219,7822
20	0,6134	213,226	190	9,5384	220,0352
25	0,8099	213,3896	195	9,8709	220,2931
30	1,0104	213,5548	200	10,2074	220,5563
35	1,2149	213,7217	205	10,5479	220,8249
40	1,4234	213,8902	210	10,8924	221,0993
45	1,6359	214,0604	215	11,2409	221,3799
50	1,8524	214,2324	220	11,5934	221,667
55	2,0729	214,4062	225	11,9499	221,961
60	2,2974	214,5818	230	12,3104	222,2625
65	2,5259	214,7593	235	12,6749	222,5718
70	2,7584	214,9388	240	13,0434	222,8896
75	2,9949	215,1202	245	13,4159	223,2166
80	3,2354	215,3038	250	13,7924	223,5534
85	3,4799	215,4894	255	14,1729	223,9009
90	3,7284	215,6773	260	14,5574	224,26
95	3,9809	215,8674	265	14,9459	224,6319
100	4,2374	216,0599	270	15,3384	225,0179
105	4,4979	216,2548	275	15,7349	225,4194
110	4,7624	216,4521	280	16,1354	225,8384
115	5,0309	216,652	285	16,5399	226,277
120	5,3034	216,8546	290	16,9484	226,7381
125	5,5799	217,06	295	17,3609	227,2249
130	5,8604	217,2682	300	17,7774	227,7422
135	6,1449	217,4793	305	18,1979	228,2957
140	6,4334	217,6936	310	18,6224	228,894
145	6,7259	217,911	315	19,0509	229,5493
150	7,0224	218,1317	320	19,4834	230,2818
155	7,3229	218,3559	325	19,9199	231,1296
160	7,6274	218,5837	330	20,3604	232,2049
165	7,9359	218,8152			

TABELA 03- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 01 - RAMSEY, 1976)

Distância (ft)	Avanço (min)	Recessão (min)	Distância (ft)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	214,3363	170	6,9298	224,8369
5	0,1759	214,5907	175	7,1401	225,2327
10	0,3588	214,8475	180	7,3516	225,6365
15	0,5498	215,1066	185	7,5644	226,0487
20	0,7468	215,3682	190	7,7784	226,4699
25	0,9492	215,6324	195	7,9936	226,9006
30	1,1562	215,8991	200	8,2106	227,3413
35	1,3678	216,1684	205	8,4291	227,7929
40	1,5835	216,4405	210	8,649	228,2559
45	1,803	216,7154	215	8,8707	228,7313
50	2,0264	216,9931	220	9,0941	229,22
55	2,2337	217,2738	225	9,3195	229,7229
60	2,4373	217,5576	230	9,5463	230,2413
65	2,6407	217,8445	235	9,7752	230,7766
70	2,8441	218,1347	240	10,006	231,3302
75	3,0472	218,4282	245	10,2388	231,904
80	3,2501	218,7252	250	10,4735	232,5001
85	3,4528	219,0258	255	10,7103	233,1207
90	3,6557	219,3301	260	10,9492	233,769
95	3,8581	219,6381	265	11,1902	234,4483
100	4,0607	219,9502	270	11,4331	235,1631
105	4,2633	220,2663	275	11,6783	235,9185
110	4,466	220,5867	280	11,9254	236,7214
115	4,6689	220,9116	285	12,175	237,5805
120	4,8717	221,2411	290	12,4265	238,5076
125	5,0751	221,5753	295	12,6801	239,5189
130	5,2788	221,9146	300	12,9361	240,638
135	5,4829	222,259	305	13,1941	241,9017
140	5,6875	222,6089	310	13,4543	243,3724
145	5,8926	222,9644	315	13,7168	245,1719
150	6,0982	223,3258	320	13,9815	247,6023
155	6,3048	223,6935	325	14,2481	251,94
160	6,5121	224,0677	330	14,517	255,2111
165	6,7205	224,4487			

A figura 22 apresenta as curvas de avanço e recessão calculadas pelos modelos algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e analítico de YU e SINGH (1990), bem como os dados observados em sulcos de um campo de precisão (Dados de Ramsey, 1976).

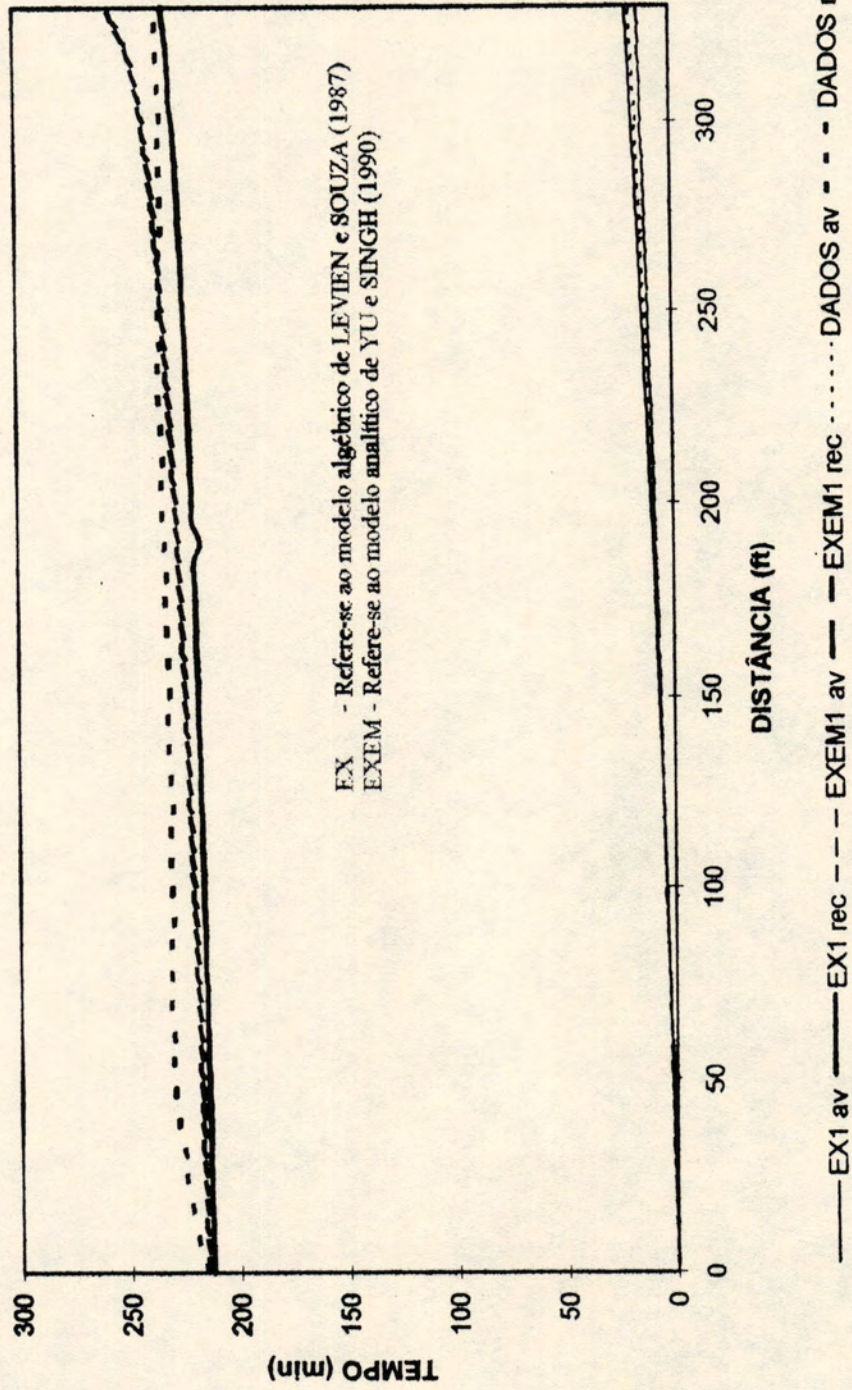


FIGURA 22 - Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em sulcos (Exemplo 01- Dados de Ramsey)

Conforme pode ser observado na Fig. 22, as curvas de avanço e recessão obtidas pela aplicação dos dois modelos em estudo, à saber, algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e analítico de YU e SINGH (1990), apresentam boa aproximação quando comparadas com as curvas de avanço e recessão obtidas pelos dados observados em sulcos de um campo de precisão (Exemplo nº 01 - Dados de Ramsey, 1976).

O modelo algébrico superestimou os valores observados em campo, de maneira que ao final do avanço (330 ft), essa diferença foi de 14,2%. Já o modelo analítico subestimou os valores observados em campo em 19,1%, ao final do avanço.

O modelo algébrico subestimou o início da curva de recessão em aproximadamente 1,1% e o final em cerca de 0,7%, sendo que o modelo analítico subestimou em aproximadamente 0,3% o início da curva de recessão e superestimou o final desta em cerca de 7,6%.

Portanto, as estimativas mais precisas ao final do avanço e da recessão, foram obtidas pelo modelo algébrico, sendo que o modelo analítico estimou mais precisamente o início da curva de recessão.

Para fins práticos, todos os modelos analisados poderiam ser utilizados para proceder a uma estimativa de avanço e recessão, nas condições apresentadas.

O modelo algébrico estima o volume total de escoamento superficial, V_{ro} , e o volume infiltrado, V_z , com bastante precisão. Os valores de Ramsey de V_{ro} e V_z são 434 ft^3 e 152 ft^3 , respectivamente; o modelo analítico estima $V_{ro} = 393 \text{ ft}^3$ e $V_z = 194 \text{ ft}^3$, enquanto que o modelo algébrico estima $V_{ro} = 453 \text{ ft}^3$ e $V_z = 134 \text{ ft}^3$. Ou seja, o V_{ro} é superestimado em aproximadamente 4% e V_z é subestimado em cerca de 12%, para o modelo algébrico, enquanto no modelo analítico, o V_{ro} é subestimado em cerca de 9% e V_z é superestimado em 27%, aproximadamente.

Considerando um espaçamento entre os sulcos de 3,3 ft e uma lâmina de aplicação de água de 0,35 ft, o modelo algébrico prediz uma eficiência de aplicação de água de cerca de 23% e uma eficiência de armazenamento de

aproximadamente 35%. Já o modelo analítico prediz $E_a = 33\%$ e $E_s = 51\%$, aproximadamente.

O erro relativo devido ao uso das equações, bem como devido as hipóteses assumidas nos dois modelos analisados, mostra-se pequeno, tanto para a curva de avanço quanto para a de recessão. Para a curva de avanço, a média dos erros relativos dos dados computados pelos modelos analisados, em comparação com os dados observados em campo foi de aproximadamente 9% e para a curva de recessão, os erros relativos foram de 4,34% para o modelo algébrico e 3,39% para o modelo analítico.

O erro absoluto para os dois modelos em estudo também mostrou-se pequeno, sendo que para a curva de avanço, os erros absolutos médios dos modelos algébrico e analítico foram de 1,20 e 1,71 min, respectivamente; para a curva de recessão, foram de aproximadamente 2,10 e 10,93 min.

A TABELA 10 mostra resumidamente os erros relativos médios, E_r , e os erros absolutos médios, E_{ab} , calculados para cada dado observado em campo, em comparação com os dados computados pelos modelos.

4.1.2 EXEMPLO Nº 02: DADOS DO COLORADO

O segundo exemplo utiliza dados obtidos por pesquisadores da Universidade do Estado do Colorado (USA), em avaliações de campo. O mesmo foi utilizado por SOUZA (1981) para testar seu modelo hidrodinâmico, sendo que houve necessidade de se estimar alguns dos parâmetros de entrada, como as constantes C e M da equação da largura da superfície livre da água, $B = C \cdot y^M$, o coeficiente n de Manning, e as constantes a e K da equação de infiltração de Kostiaikov.

Os valores de r_y e r_z foram estabelecidos pelo autor.

As principais características do sulco e da irrigação para o Exemplo nº 2: Dados do Colorado, estão incluídas no Quadro 4.1.2.

QUADRO 4.1.2 - PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA IRRIGAÇÃO DO
EXEMPLO Nº 2: DADOS DO COLORADO

L	= 175 m
S _o	= 0,0036
n	= 0,020
C	= 0,61
M	= 0,22
Q _o	= 8,1 . 10 ⁻⁴ m ³ /s (0,0486 m ³ /min)
C _u	= 1,0 m ^{1/2} /s (60,0 m ^{1/2} /min)
K	= 8,0790 . 10 ⁻⁴ m/s ^a (7,6796 . 10 ⁻³ m/min ^a)
a	= 0,55
C _i	= 0
f	= 0,35
t _s	= 202 min
r _y	= 0,75
r _z	= 0,80

As curvas de avanço e recessão, assim como os resultados obtidos em campo e os computados pelos modelos em estudo, são apresentados na Figura 23 e nas TABELAS 04, 05 e 06, respectivamente. Pode-se verificar que as curvas de recessão da Fig. 23, computadas tanto pelo modelo algébrico como pelo modelo analítico, quando comparadas com os dados de campo (Exemplo nº 02- Dados do Colorado), têm aproximação satisfatória, com excessão do avanço da água computado pelo modelo analítico, que subestimou os valores observados, de maneira que ao final do avanço (175,0 m), a diferença entre o valor observado e o estimado foi de cerca de 62,0%. O modelo algébrico forneceu estimativas satisfatórias para o final do avanço, superestimando os valores observados em aproximadamente 15,4%.

O início da curva de recessão foi superestimado pelos dois modelos analisados, algébrico e analítico. As diferenças percentuais em relação ao valor observado foram de, respectivamente 3,3 e 2,7%.

As estimativas ao final da curva de recessão também foram superestimadas pelos modelos algébrico e analítico, em cerca de 1,1 e 6,3%, respectivamente.

Os valores de V_{ro} e V_z , computados pelo modelo algébrico foram respectivamente, $3,9 \text{ m}^3$ e $5,9 \text{ m}^3$, enquanto que para o modelo analítico os valores foram $V_{ro} = 7,8 \text{ m}^3$ e $V_z = 2,0 \text{ m}^3$.

Considerando uma lâmina de aplicação de água de 10 cm e um espaçamento entre sulcos, E , de 1,118 m, o modelo algébrico prediz uma eficiência de aplicação de água de cerca de 60% e uma eficiência de armazenamento de aproximadamente 30%, enquanto que o modelo analítico calcula $E_a = 20\%$ e $E_s = 10\%$, somente.

Para a curva de avanço, o erro relativo devido ao uso das equações, bem como das hipóteses assumidas, foi de 11,22% para o modelo algébrico e 58,35% para o modelo analítico, sendo que para a curva de recessão, o erro relativo observado nos dois modelos algébrico e analítico foi bem pequeno, sendo de 0,76% e 1,89%, respectivamente.

TABELA 04- Dados de avanço e recessão do Colorado

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	202
25	4,7	209
50	10,2	212,3
75	17,3	215
100	26,2	216,5
125	38	219
150	50,4	221
175	61,5	222

TABELA 05- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 02 - Dados do Colorado)

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	208,812
5	0,7175	209,1346
10	1,19	209,4612
15	1,7575	209,7918
20	2,42	210,1266
25	3,1775	210,4659
30	4,03	210,8096
35	4,9775	211,1581
40	6,02	211,5115
45	7,1575	211,8701
50	8,39	212,2339
55	9,7175	212,6033
60	11,14	212,9786
65	12,6575	213,3599
70	14,27	213,7476
75	15,9775	214,142
80	17,78	214,5435
85	19,6775	214,9524
90	21,67	215,3692
95	23,7575	215,7944
100	25,94	216,2284
105	28,2175	216,6719
110	30,59	217,1255
115	33,0575	217,5899
120	35,62	218,066
125	38,2775	218,5548
130	41,03	219,0574
135	43,8775	219,5752
140	46,82	220,1097
145	49,8575	220,663
150	52,99	221,2374
155	56,2175	221,8363
160	59,54	222,4639
165	62,9575	223,1267
170	66,47	223,835
175	70,0775	224,6147

TABELA 06- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 02 - Dados do Colorado)

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	207,4854
5	0,3892	207,8736
10	0,8071	208,2687
15	1,2489	208,671
20	1,7086	209,081
25	2,1833	209,4991
30	2,6716	209,9256
35	3,1725	210,3611
40	3,6856	210,8062
45	4,2107	211,2613
50	4,7474	211,7273
55	5,2961	212,2047
60	5,8568	212,6945
65	6,4301	213,1975
70	7,0163	213,7148
75	7,6158	214,2475
80	8,2292	214,797
85	8,8573	215,3648
90	9,5009	215,9526
95	10,1604	216,5626
100	10,8368	217,1971
105	11,5305	217,859
110	12,2424	218,5517
115	12,9732	219,2795
120	13,7232	220,0476
125	14,493	220,8627
130	15,2835	221,7333
135	16,0946	222,6708
140	16,9266	223,6912
145	17,7805	224,8175
150	18,6555	226,0852
155	19,5526	227,5546
160	20,4716	229,3426
165	21,4124	231,7375
170	22,3755	235,945
175	23,3607	240

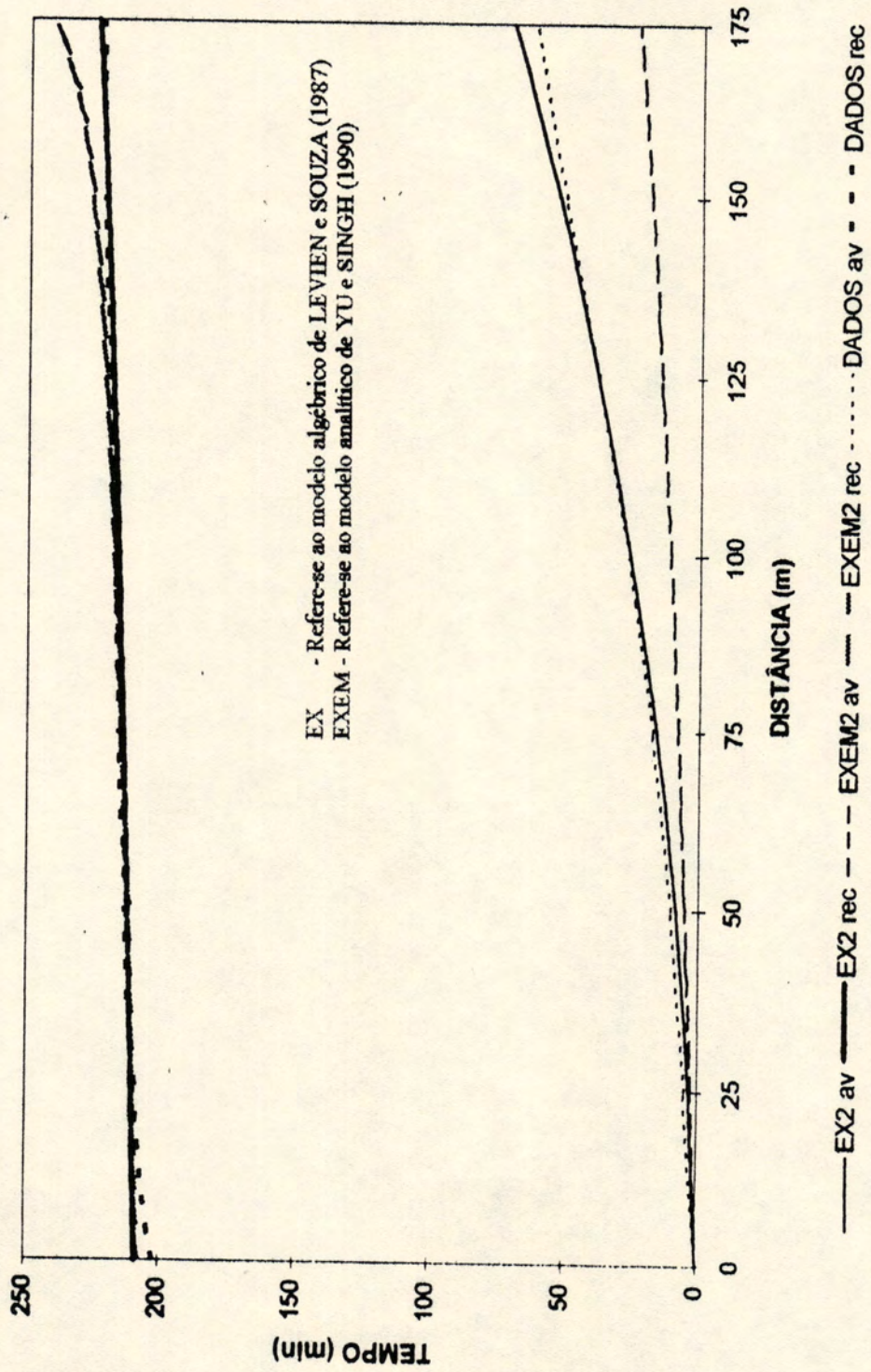


FIGURA 23 - Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em campo (Exemplo 02 - Dados do Colorado)

Os erros absolutos médios encontrados para os modelos algébrico e analítico foram respectivamente de, para a curva de avanço, 4.28 e 19.06 min e para a curva de recessão, 4.71 e 11.74 min, aproximadamente.

Os erros relativos médios e erros absolutos médios, E_r e E_{ab} , foram calculados para cada dado observado em campo, em comparação com os dados computados pelos modelos, como mostra resumidamente a TABELA 10.

É importante salientar que o desempenho dos modelos baseados na equação de balanço volumétrico depende muito da validade das hipóteses assumidas relativamente a cada condição e, provavelmente, a ordem de representatividade deve ser modificada.

As diferenças entre os dados observados e os obtidos através dos modelos analisados neste trabalho, dependem acentuadamente da precisão e representatividade dos dados requeridos pelos modelos. Conforme BASSETT e FITZSIMMONS (1976), "os resultados de modelos matemáticos desenvolvidos com bases teóricas consistentes, refletem precisamente a validade dos parâmetros necessários ao seu processamento".

4.1.3 EXEMPLO Nº 03: DADOS DE STIEBEN FARM

Alguns dos parâmetros de entrada dos modelos foram estimados por SOUZA (1981) a partir das informações de campo, tais como o coeficiente n de Manning, as constantes C e M , na equação da largura da superfície livre da água, $B = 1.9087 \cdot y^{0.5445}$, e as constantes K e a da equação de infiltração de Kostiakov.

As constantes C e M foram determinadas por regressão linear, a partir dos valores da lâmina e da largura da superfície livre da água, obtidos nas várias estações ao longo do sulco.

O valor do coeficiente de rugosidade superficial de Manning foi assumido de acordo com as recomendações de Bernardo (1982) e do SCS-USDA (1974), citados por LEVIEN (1965), sendo o teste realizado numa plantação de beterraba

açucareira.

Foi utilizado o método das entradas e saídas para a determinação dos coeficientes K e a da equação de infiltração de Kostiakov, que foram processados pela metodologia de avaliação dos sistemas de irrigação descrita por CRIDDLE et al (1956). Os dados foram agrupados e determinada a regressão linear.

Os valores de r_y e r_z foram estabelecidos pelo autor.

No Quadro 4.1.3 se encontram os parâmetros de entrada para o Exemplo nº 03.

**QUADRO 4.1.3 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO EXEMPLO Nº 03:
DADOS DE STIEBEN FARM**

L	=	350 m
S_0	=	0,0098
n	=	0,15
Q_0	=	$5,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,03456 m^3/min)
C_u	=	$1,0 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (60,0 $\text{m}^{1/2}/\text{min}$)
K	=	$2,0192 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\text{s}^2$ ($7,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}/\text{min}^2$)
a	=	0,8767
C_i	=	0
f	=	0,35
t_s	=	696 min
r_y	=	0,75
r_z	=	0,80

As curvas de avanço e recessão, assim como os dados obtidos em campo e os computados pelos modelos algébrico e o analítico estão apresentadas na Figura 24 e nas TABELAS 07, 08 e 09, respectivamente.

Conforme observa-se na Fig. 24, os dois modelos analisados, à saber, o algébrico de Levien e Souza (1987) e o analítico de Yu e Singh (1990) forneceram estimativas satisfatórias do avanço e recessão da água, no sulco. Os valores observados no final do avanço foram subestimados em 12,2% no modelo algébrico e 8,7% no modelo analítico.

O início da curva de recessão foi superestimada pelos dois modelos, algébrico e analítico em aproximadamente 5%, assim como as estimativas ao final desta, que foram superestimadas pelos modelos em cerca de 24,4% e 31,1%, respectivamente.

O volume total de escoamento superficial, V_{ro} , e o volume infiltrado, V_z , foram computados pelo modelo algébrico como sendo de 21,46 e 2,72 m^3 e pelo modelo analítico como $V_{ro} = 22,50 m^2$ e $V_z = 1,55 m^2$. Ou seja, o modelo analítico superestimou V_{ro} em aproximadamente 4%, e subestimou o V_z em cerca de 43%, usando o modelo algébrico como padrão.

O modelo algébrico prediz uma eficiência de aplicação de cerca de 11% e uma eficiência de armazenamento de aproximadamente 39%, enquanto que o modelo analítico prediz eficiências de aplicação e de armazenamento de cerca de 7 e 22%, respectivamente, considerando uma lâmina de aplicação de água de 0,002 m e um espaçamento entre sulcos de 1,00 m.

TABELA 07- Dados de avanço e recessão de Stieben Farm

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	698
25	5	703
50	10	705
75	16	708
100	21	712
125	27	716
150	33	718
175	40	720,5
200	48	722,5
225	55	723,5
250	61	724,5
275	70	725,5
300	77	727
325	85	729
350	94	731

TABELA 08- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 03 - Dados de Stieben Farm)

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)	Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	733,9093	180	39,9697	790,121
5	1,0322	735,1988	185	41,1542	792,0976
10	2,0767	736,4997	190	42,3427	794,1085
15	3,1252	737,812	195	43,5352	796,1552
20	4,1777	739,1362	200	44,7317	798,2393
25	5,2342	740,4724	205	45,9322	800,3628
30	6,2947	741,821	210	47,1367	802,5276
35	7,3592	743,1823	215	48,3452	804,7358
40	8,4277	744,5566	220	49,5577	806,9898
45	9,5002	745,9441	225	50,7742	809,2921
50	10,5767	747,3453	230	51,9947	811,6456
55	11,6572	748,7605	235	53,2192	814,0533
60	12,7417	750,19	240	54,4477	816,5186
65	13,8302	751,6342	245	55,6802	819,0453
70	14,9227	753,0935	250	56,9167	821,6375
75	16,0192	754,5684	255	58,1572	824,2999
80	17,1197	756,0592	260	59,4017	827,0378
85	18,2242	757,5664	265	60,6502	829,8569
90	19,3327	759,0905	270	61,9027	832,764
95	20,4452	760,632	275	63,1592	835,7667
100	21,5617	762,1914	280	64,4197	838,8739
105	22,6822	763,7692	285	65,6842	842,0957
110	23,8067	765,366	290	66,9527	845,4442
115	24,9352	766,9824	295	68,2252	848,9337
120	26,0677	768,619	300	69,5017	852,5812
125	27,2042	770,2765	305	70,7822	856,4077
130	28,3447	771,9556	310	72,0667	860,439
135	29,4892	773,6571	315	73,3552	864,7081
140	30,6377	775,3816	320	74,6477	869,2579
145	31,7902	777,1301	325	75,9442	874,1461
150	32,9467	778,9035	330	77,2447	879,4544
155	34,1072	780,7025	335	78,5492	885,3051
160	35,2717	782,5283	340	79,8577	891,8997
165	36,4402	784,3819	345	81,1702	899,6298
170	37,6127	786,2644	350	82,4867	909
175	38,7892	788,177			

TABELA 09- Dados de avanço e recessão computados pelo modelo analítico da irrigação por sulcos (parâmetros de entrada do Exemplo nº 03 - Dados de Stieben Farm)

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)	Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0	0	737,2413	180	43,11014	795,4859
5	1,164976	738,571	185	44,33837	797,567
10	2,332247	739,9123	190	45,56825	799,6887
15	3,501989	741,2654	195	46,79977	801,8531
20	4,67338	742,6305	200	48,03212	804,0627
25	5,847242	744,008	205	49,26694	806,3202
30	7,022751	745,3982	210	50,50258	808,6283
35	8,200731	746,8014	215	51,7407	810,9904
40	9,380358	748,218	220	52,97964	813,4099
45	10,56246	749,6484	225	54,22022	815,8907
50	11,74538	751,0928	230	55,46246	818,4371
55	12,93078	752,5518	235	56,70634	821,054
60	14,11782	754,0257	240	57,95187	823,7469
65	15,30651	755,5151	245	59,19904	826,5218
70	16,49684	757,0202	250	60,44704	829,3858
75	17,68883	758,5417	255	61,69752	832,3468
80	18,88328	760,08	260	62,94881	835,4139
85	20,07856	761,6357	265	64,20175	838,5978
90	21,27631	763,2094	270	65,45634	841,911
95	22,47571	764,8016	275	66,71258	845,3682
100	23,67593	766,4129	280	67,97047	848,9868
105	24,87863	768,0441	285	69,23	852,7883
110	26,08214	769,6957	290	70,49036	856,7986
115	27,28813	771,3687	295	71,75318	861,0506
120	28,49577	773,0637	300	73,01684	865,5859
125	29,70505	774,7815	305	74,28213	870,4592
130	30,91516	776,5231	310	75,54908	875,7439
135	32,12774	778,2894	315	76,81768	881,5433
140	33,34114	780,0813	320	78,08709	888,0093
145	34,55701	781,9	325	79,35898	895,3807
150	35,77371	783,7466	330	80,50464	885,6124
155	36,99288	785,6223	335	81,75462	888,8497
160	38,21287	787,5283	340	83,0046	892,087
165	39,43451	789,4662	345	84,25459	895,3243
170	40,65862	791,4373	350	85,50457	898,5616
175	41,88356	793,4433			

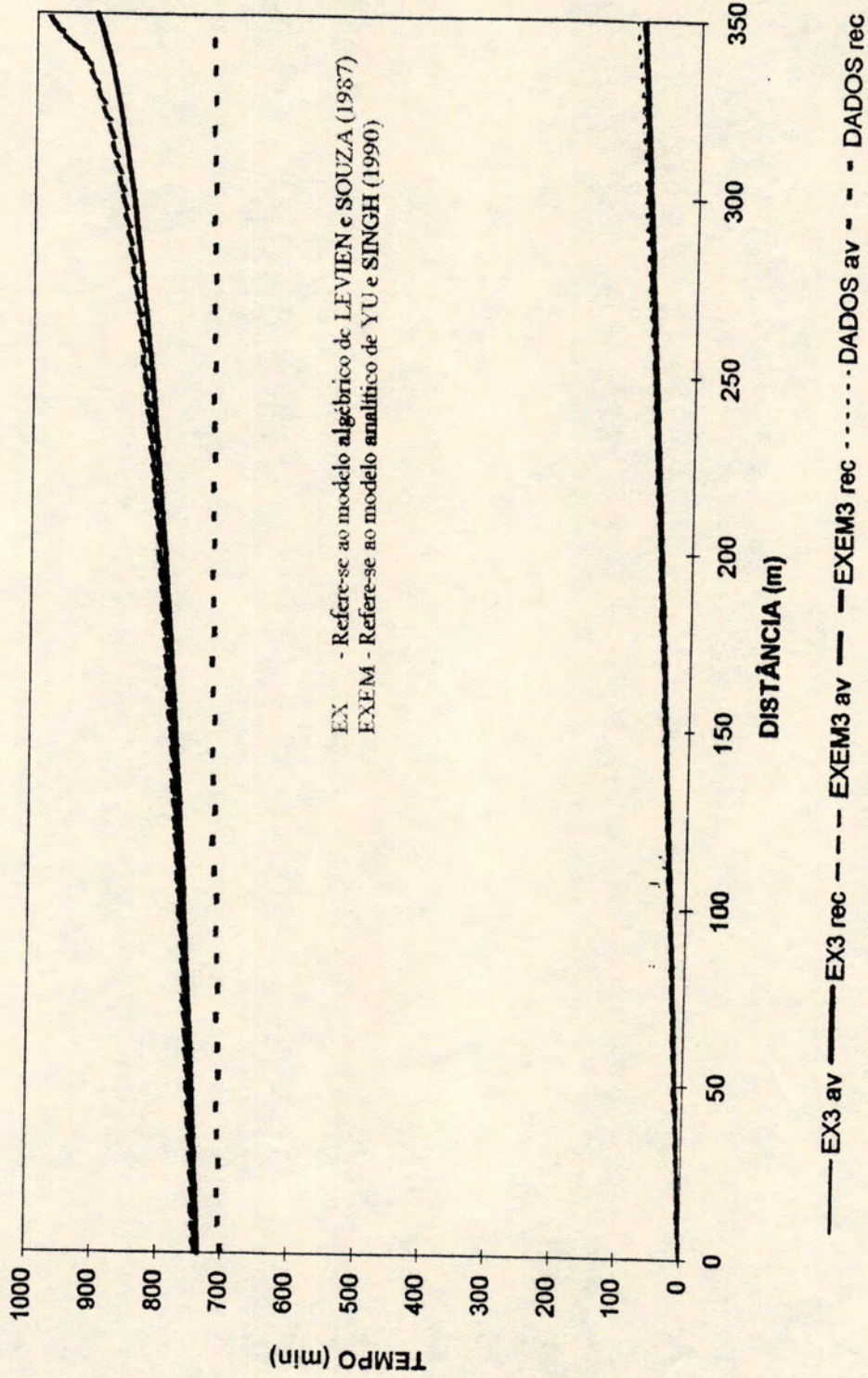


FIGURA 24 - Curvas de avanço e recessão computadas pelos modelos algébrico e analítico, comparadas aos dados observados em campo (Exemplo 03 - Dados de Stieben Farm)

Os erros relativos encontrados para a curva de avanço foram de cerca de 5,77% para o modelo algébrico e 7,75% para o analítico, sendo que para a curva de recessão, os erros relativos foram de 11,2% e 12,73%, respectivamente.

Para a curva de avanço, os erros absolutos médios encontrados foram de cerca de 5,75 min para o modelo algébrico e 4,13 min para o analítico. Já para a curva de recessão, os valores encontrados para os erros absolutos médios foram de 106,95 e 143,12 min, respectivamente.

A TABELA 10 mostra os erros relativos médios, E_r , e os erros absolutos médios, E_{abs} , calculados para cada dado observado em campo, em comparação com os dados computados pelos modelos.

TABELA 10- Erros relativos médios e erros absolutos médios de cada simulação dos Exemplos 01, 02 e 03.

DADOS	Er (%)		Eabs (min)	
	Avanço	Recessão	Avanço	Recessão
EX1	9,06	4,34	1,2052	2,1043
EXEM1	9,9	3,39	1,7165	10,9374
EX2	11,22	0,76	4,2887	4,7133
EXEM2	58,35	1,89	19,0696	11,7427
EX3	5,77	11,2	5,7566	106,9546
EXEM3	7,75	12,73	4,1301	143,1206

A principal característica dos modelos é o deslocamento gradativo da frente recessiva, o que geralmente não se verifica na prática, onde a recessão manifesta-se variavelmente, seguindo, no entanto, uma tendência definida. Para efeitos comparativos, essa tendência é que deve ser considerada.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir do estudo realizado permitem elaborar as seguintes conclusões:

- Tanto o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987), quanto o modelo analítico de YU e SINGH (1990) poderão ser utilizados para simular todas as fases da irrigação por sulcos;
- Os modelos analisados neste trabalho servem tanto para a simulação da irrigação por sulcos em declive com drenagem livre, como para irrigação por faixas em declive com drenagem livre, assumindo-se simplesmente que na equação da largura da superfície livre da água, $B = C \cdot y^M$, o valor de M é zero e de C igual a unidade;
- Para fins práticos, todos os modelos analisados poderiam ser utilizados para proceder a uma estimativa de avanço e recessão, nas condições apresentadas;
- O desempenho dos modelos analisados, baseados no balanço volumétrico, depende acentuadamente da representatividade dos parâmetros utilizados para o processamento;
- Em comparação com observações de campo, os dois modelos analisados tiveram um bom desempenho, sendo que o modelo algébrico obteve curvas de avanço e recessão com melhor aproximação do que o modelo analítico;

- A simplicidade computacional do modelo algébrico torna-o muito atrativo para processamento em calculadoras simples, sem grandes recursos operacionais. Essa simplicidade de aplicação contrasta com o modelo analítico, que se mostrou mais complexo e que somente pode ser processado em microcomputadores, além de necessitar de uma rotina de otimização para viabilizar o modelo, que utiliza muitas iterações em seu desenvolvimento;

- Apesar da introdução de uma técnica de pesquisa, ou seja, de uma rotina de otimização ao programa desenvolvido para o modelo analítico, o modelo algébrico utiliza tempos de processamento e reservas de memória muito inferiores a esse, o que constitui uma outra vantagem significativa;

- Considerando os exemplos analisados, nota-se que:

- Para a curva de avanço, o erro relativo médio, ficou entre 5,77 e 11,22 % para o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e entre 7,75 e 58,35 % para o modelo analítico de YU e SINGH (1990); o erro absoluto médio ficou entre 1,2 e 5,8 minutos para o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e entre 1,7 e 19,1 minutos para o modelo analítico de YU e SINGH (1990).

- Para a curva de recessão, o erro relativo médio ficou entre 0,76 e 11,2 % para o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e entre 3,39 e 12,73 % para o modelo analítico de YU E SINGH (1990); o erro relativo médio ficou entre 2,1 e 107 minutos para o modelo algébrico de LEVIEN e SOUZA (1987) e entre 4,7 e 143,1 minutos para o modelo analítico de YU e SINGH (1990).

- O erro relativo médio e o erro absoluto médio, mostram-se aceitáveis, tanto para a curva de avanço, quanto para a de recessão, refletindo assim, a validade das hipóteses utilizadas para o desenvolvimento dos modelos em estudo;

- Os modelos são recursos valiosos e eficientes para racionalizar o dimensionamento, a operação e o manejo dos

sistemas de irrigação superficial, visando a obtenção de níveis satisfatórios de eficiência de aplicação e de armazenamento da água.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCES IN INFILTRATION. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration. American Society of Agricultural Engineers, 1983.

AZEVEDO, M.A.S.B. Estudo das características de avanço e infiltração da água em sulcos, num solo aluvial eutrófico, para os escoamentos contínuo e intermitente. Minas Gerais, 1989. 105p. Dissertação(Mestrado)-Universidade Federal de Viçosa.

BAJPAI, A.C.; MUSTOE, L.R.; WALKER, D. Matemática avançada para engenharia. Edit. Hemus Livraria Editora Ltda, 1980.

BARTELLS, L.F. Infiltration of water into soil irrigated pastures. Department of Agriculture, Melbourne, Victoria, Australia, p.66-79, 1968.

BASSETT, D.L. Mathematical model of water advance in border irrigation. Transactions of the ASAE, v.15, n.5, p.992-995, 1972.

BASSETT, D.L.; FITZSIMMONS, D.W. Simulating overland flow in border irrigation. Transactions of the ASAE, v.19, n.14, p.666-671, 1976.

BAUTISTA, E.; WALLENDER, W.W. Spatial variability of infiltration in furrows. Transactions of the ASAE, v.28, n.6, p.1846-1851, 1985, 1985.

- Hidrodinamic furrow irrigation model with specified space steps. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.118, n.3, p.450-465, maio/jun. 1992.
- Numerical calculation of infiltration in furrow irrigation simulation models. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.119, n.2, p.286-293, mar/abr. 1993a.
- Identification of furrow intake parameters from advance times and rates. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.119, n.2, p.295-311, mar/abr. 1993b.
- BISHOP, A.A. Relation of intake rate to length of run in surface irrigation. Transactions of the ASAE, Part III, v.127, 1962.
- BISHOP, A.A.; WALKER, W.R.; ALLEN, N.L.; POOLE, G.J. Furrow advance rates under surge flow systems. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.107, n.IR3, p.257-264, set. 1981.
- BODMAN, G.B.; COLMAN, E.A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. Soil science society american journal. Proceedings 7, p.116-122, 1943.
- BONDURANT, J.A. Developing a furrow infiltrometer. Agricultural engineer, v.38, n.8, p.602-604, 1957.
- CHEN, C.L. A solution of the irrigation advance problem. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.92, n.IR2, p.97-101, 1966.
- Surface irrigation using kinematic-wave method. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.96, n.IR1, p.39-46, mar. 1970.

————— Derivation of infiltration equation using systems approach. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, v.118, n.6, p.996-999, nov/dez. 1992.

CHILDS, J.L.; WALLENDER, W.W.; HOPMANS, J.W. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, v.119, n.1, p.74-90, jan/fev. 1993.

CHOW, V.T. *Open-channel hydraulics*. s.l., Mc Graw-Hill Kogakusha, ltd., 1959.

CLEMMENS, A.J. Verification of the zero-inertia model for border irrigation. *Transactions of the ASAE*, v.22, n.6, p.1306-1309, dez. 1979.

————— Direct solution to surface irrigation advance inverse problem. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, v.117, n.4, p.578-594, jul/ago. 1991.

CLEMMENS, A.J.; FANGMEIER, D.D. Discussion of border irrigation hydraulics and zero-inertia, by T. Strelkoff and N. D. Katopodes. *Journal of the irrigation and drainage division*, ASCE, v.104, n.IR3, p.337, 1978.

COLLINS, D.L.; BASSETT, D.L. Terminal profile of water flowing over a porous bed having constant infiltration. *Transactions of the ASAE*, v.7, n.4, p.475-477, 1964.

COLLIS-GEORGE, N. A pragmatic method to determine the parameters that characterize ponded infiltration. *Aust. Journal of soil research*, v.18, n.1, p.111-117, 1980.

COLLIS-GEORGE, N.; FREEBAIRN, D.M. A laboratory and field study of border check irrigation. *Journal of soil research*, v.17, n.1, p.75-87, 1979.

- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. Methods for evaluating irrigation systems. Agricultural Handbook, n.62, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1956.
- DAVIS, J.R. Estimating rate of advance for irrigation furrows. Transactions of the ASAE, v.4, n.1, p.52-54, 57, 1961.
- ELLIOTT, R.L.; WALKER, W.R. Field Evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transactions of the ASAE, v.25, n.6, p.396-400, 1982.
- ELLIOTT, R.L.; WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.108, n.1R3, p.179-195, set. 1982.
- Furrow irrigation advance rates: A dimensionless approach. Transactions of the ASAE, v. 26, n.6, p.1722-1725, 1983a.
- Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. Transactions of the ASAE, v.26, n.6, p.1726-1731, 1983b.
- ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses. São Paulo, 1991.
- EVANS, R.G.; SMITH, C.J.; MITCHELL, P.D.; NEWTON, P.J. Furrow infiltration on nontilled beds with cracking soils. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.5, p.714-733, set/out, 1990.
- FANGMEIER, D.D.; RAMSEY, M.K. Intake characteristics of irrigation furrows. Transactions of the ASAE, v.21, n.4, p.696-700, 705, ago. 1978.

- FONKEN, D.W.; CARMODY, T.; LAURSEN, E.M.; FANGMEIER, D.D. Mathematical model of border irrigation. Journal of the Irrigation and drainage division, ASCE, v.106, n.IR3, p.203-220, set. 1980.
- FOK, Y.S. 2-D Infiltration equations for furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.110, n.2, p.208-217, jun. 1984.
- FOK, Y.S.; BISHOP, A.A. Analysis of water advance in surface irrigation. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v. 91, n.IR1, p.99-116, mar. 1965.
- FOK, Y.S.; CHIANG, S.H. 2-D infiltration equations for furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.110, n.2, p.208-217, jun. 1984.
- FRITZSCHE, H. Programação não-linear - Análise e métodos. Edit. Edgard Blücher Ltda. 1978.
- GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils. Journal of agricultural science, v.4, n.1, p.1-14, 1911.
- GUIA RURAL. Água: manual de irrigação. São Paulo, fev. 1991. Edição especial.
- HALL, W.A. Estimating irrigation border flow. Agricultural engineering, v.37, p.263-265, 1956.
- HART, W.E.; BASSETT, D.L.; STRELKOFF, T. Surface irrigation hydraulics- Kinematics. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.94, n.IR4, p.419-440, dez. 1968.
- HENDERSON, F.M. Open channel flow. London, The Macmillan Company, New York Collier-Macmillan Limited, 1966.

- HOLZAPFEL, E.; Marino, M.; Chavez, J. Surface irrigation optimization models. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.112, n.1, p.1-19, 1986.
- HORTON, R.E. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil science society of american proceedings, v.5, p.399-417, 1940.
- ISRAELSON, O.W. Irrigation principles and practices. John Wiley, New York, 1932.
- IZADI, B.; WALLENDER, W.W. Furrow hydraulics characteristics and infiltration. Transactions of the ASAE, v.28, n.6, p.1901-1908, nov/dez, 1985.
- JAIN, S.K.; SINGH, V.P. A numerical kinematic wave model for border irrigation. Irrigation science, v.10, n.4, p.253-263, set, 1989.
- JAYNES, D.B. Simple model of border irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.112, n.2, p.172-184, mai, 1986.
- JENSEN, M.E. Design and operation of farm irrigation systems. American Society of Agricultural Engineers, 1980.
- JOBLING, G.A; TURNER, A.K. Physical model study of border strip irrigation. Journal of irrigation and drainage division, ASCE, v.99, n.IR4, p.493, 1973.
- KARMELI, D. Distribution patterns and losses for furrow irrigation. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v. 104, n.IR1, p.59-68, mar, 1978.
- KATOPODES, N.D. Observability of surface irrigation advance. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.5, p.656-675, set/out, 1990.

- KATOPODES, N.D.; STRELKOFF, T. Hydrodynamics of border irrigation- Complete model. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.103, n.IR3, p.309-324, 1977a.
- Dimensionless solutions of border- Irrigation advance. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.103, n.IR4, p.401-417, dez. 1977b.
- KATOPODES, N.D.; TANG, J.H.; CLEMMENS, A.J. Estimation of surface irrigation parameters. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.5, p.676-695, set/out. 1990.
- Self-adaptive control of surface irrigation advance. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.5, p.697-713, set/out. 1990.
- KINCAID, D.C. Hidrodynamics of border irrigation. Colorado, 1970. Tese(Doutorado)-Colorado State University, Ft Collins.
- KINCAID, D.C.; HEERMANN, D.F.; KRUSE, G. Hydrodynamics of border irrigation advance. Transactions of the ASAE, v.15, n.4, p.674-680, 1972.
- KINNMARK, I.P.E. The shallow water wave equations: Formulation, analysis and application. New York, C.A. Brebbia and S.A. Orszag, 1986.
- KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying et from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. Sixth Com. International Soc. Soil Science. Russian, part A, p.17-21 (in Russian), 1932.
- KRUGER, W.E.; BASSETT, D.L. Unsteady flow of water over a porous bed having constant infiltration. Transactions of the ASAE, v.8, n.1, p.60-62, 1965.

- LAL, R.; PANDYA, A.C. Furrow irrigation with decreasing inflow rate. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.96, n.1R4, p.451-460, dez. 1970.
- LEVIEN, S.L.A.; SOUZA, F. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.113, n.3, p.367-377, ago. 1987.
- LEY, T.W.; CLYMA, W. Furrow irrigation practices in northern Colorado. Transactions of the ASAE, v.24, n.3, p.610-616, 623, 1981.
- LEWIS, M.R. The rate of infiltration of water in irrigation practice. Transactions of the American Geophysical Union, 16th Annual Meeting, p.34-37, 1937.
- LEWIS, M.R.; MILNE, W.E. Analysis of border irrigation. Agricultural engineering, v.19, p.267-272, jun. 1938.
- LIGHTHILL, M.J.; WHITHAM, G.B. On kinematic waves. I-Flood movement in long rivers. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, v.229, p.281-316, 1955.
- LUENBERG, D.G. Linear and non-linear programming. Edit. Addison-Wesley Publishing Company, 2ª edição, 1984.
- MAHESHWARI, B.L. et. al. An optimization technique for estimating infiltration characteristics in border irrigation. Agricultural water management, v.13, p.13-24, 1988.
- MAILHOL, J.C.; GONZALEZ, J.M. Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.119, n.5, p.768-783, set/out. 1993.
- MARR, J.C. Furrow irrigation - Manual 37. California, California Agricultural, 1967.

- MCWHORTER, D.B. Vertical flow of air and water with a flux boundary condition. Transactions of the ASAE, v.19, n.2, p.259-261, 265; 1976.
- MEHANNI, A.H.; BLEASDALE, G.E. Reclamation of salt-affected soils in the Goulburn Valley of Victoria. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb., v.23, n.3, p.412-418, 1983.
- MERRIAM, J.L. Surface irrigation methods. Agricultural Water Conservation Conference, Dawis, California. Proceedings Dawis, University of California/Cooperative Extension Service, p.62-62, 1976.
- MILLER, D.E.; RASMUSSEN, W.W. Measurement of furrow infiltration made easy. Soil science society american journal, v.42, n.5, p.838-839, 1978.
- MUSCK, J.T.; GLETTEN, W.H.; DUSEK, D.A. Evaluation of graded furrow irrigation with lenght of run on a clay loam soil. Transactions of the ASAE, v.16, n.6, p.1075-1080, 1084, 1973.
- NANCE, A.; LAMBERT, J.R. A modified inflow-outflow method of measuring infiltration in furrow irrigation. Transactions of the ASAE, v.13, n.6, p.792-794, 798, 1970.
- ON-FARM IRRIGATION COMMITTEE OF THE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION. Describing irrigation efficiency and uniformity, Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.104, n.IR1, p.35-41, mar. 1978.
- OVERTON, D.E. Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. ARS p.41-99, U.S. Dept of Agricultural, Agricultural Research Service, Washington, D.C, 1964.
- OWEIS, T.Y.; WALKER, W.R. Zero-inertia model for surge flow furrow irrigation. Irrigation Science, v.11, n.3, p.131-136, jul. 1990.

- PAINE, J.N. Open-channel flow algorithm in Newton-Raphson form. Journal of the irrigation and drainage engineering, ASCE, v.118, n.2, p.306-319, mar/abr. 1992.
- PERI, G.; HART, W.E.; NORUM, D.I. Optimal irrigation depths- A method of analysis. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.105, n.1R4, p.341-355, dez. 1979.
- PHILLIP, J.R. An infiltration equation with physical significance. Soil science, v.77, n.2, p.153-157, 1954.
- RAM, R.S.; SINGH, V.P.; PRASAD, S.N. A quasi-steady state integral model for border irrigation. Irrigation Science, v.7, n.2, p.113-141, jun. 1986.
- RAMSEY, M.K. Intake characteristics and flow resistance in irrigation furrows. Arizona, 1976. Dissertação(Mestrado)-University of Arizona.
- RAYEJ, M.; WALLENDER, W.W. Furrow irrigation simulation time reduction. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.111, n.2, p.134-146, jun. 1985.
- Furrow model with specified space intervals. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.113, n.4, p.536-548, nov. 1987.
- Time solution of kinematic-wave model with stochastic infiltration. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.114, n.4, p.605-621, nov. 1988.
- REDDELL, D.L. Evaluation of furrow surface storage and the Kostiaikov infiltration parameters using irrigation advance data. American Society of the Agricultural Engineers, ASAE, Paper n.86-2574, St Joseph, Michigan, 1986a.

- Advance rate feedback irrigation system (ARFIS). American Society of Agricultural Engineers, ASAE, Paper n.86-2578, St Joseph, Michigan, 1986b.
- REDDY, J.M.; APOLAYO H.M. Sensitivity of furrow irrigation system cost and design variables. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.117, n.2, p.201-219, mar/abr. 1991.
- REDDY, J.M.; CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation systems. Transactions of the ASAE, v.24, n.3, p.617-623, 1981.
- Optimizing surface irrigation system design parameters: simplified analysis. Transactions of the ASAE, v.25, n.4, p.966-974, 1982.
- Optimizing furrow irrigation runoff recovery systems. Transactions of the ASAE, v.26, n.4, p.1050-1056, 1063, 1983a.
- Choosing optimal design depth for surface irrigation systems. Agricultural Water Management, v.6, n.4, p.335-349, 1983b.
- RENAULT, D.; WALLENDER, W.W. Alive (advance linear velocity): surface irrigation rate balance theory. Transactions of the ASAE, v.118, n.1, p.138-155; jan/fev. 1992.
- RENGASAMY, P.; MEHANNI, A.H. Application of the threshold concept to irrigation with saline water. Soil use management, v.4, n.4, p.123-127, 1988.
- REZENDE, F.C.; SCALOPPI, E.J. Avaliação de métodos para determinação das características de infiltração em sulcos. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.20, n.2, p.227-233, fev. 1985.

RITTER, A. Die fortpflanzung der wasserwellen. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, v.36, n.33, p.947-954, ago. 1982.

ROTH, R.L.; FONKEN, D.W.; FANGMEIER, D.D.; ATCHISON, K.T. Data for border irrigation models. Transactions of the ASAE, v.17, n.1, p.157-161, fev. 1974.

SAKKAS, J.G.; STRELKOFF, T. Dam-break flood in a prismatic dry channel. Journal of the hidraulic division, ASCE, v.99, n.12, dez. 1973.

————— Hydrodynamics of surface irrigation - Advance phase. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.100, n.IR1, p.31-46, mar. 1974.

SALT RIVER PROJECT. Major facts in brief. Phoenix, Arizona, 33p, 1960.

SCALOPPI, E.J. Sistemas de irrigação por superfície. Inf. Agropecuária, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.12-26, jul. 1986.

SCALOPPI, E.J.; COLOMBO, A. Tendências atuais em tecnologia de irrigação. ANAIS, ABID, v.II, p.943-971, out. 1988.

SCHMITZ, G.H.; SEUS, G.J. Analytical solution of simplified surge flow equations. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.113, n.4, p.605-610, nov. 1987.

————— Analytical model of level basin irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.15, n.1, p.76-95, 1969.

————— Mathematical zero-inertia modeling of surface irrigation: Advance in borders. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.5, p.603-615, set/out. 1990.

- Mathematical zero-inertia modeling of surface irrigation: Advance in furrows. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.118, n.1, p.1-18, jan/fev. 1992.
- SCHNEIDER, A.D.; NEW, L.L.; MUSICK, J.T. Reducing tailwater runoff for efficient irrigation water use. Transactions of the ASAE, v.19, n.6, p.1093-1097, 1976.
- SCHREIDER, D.L.; BASSETT, D.L. Hydraulic description of recession of shallow flow over a porous bed. Transactions of the ASAE, v.10, n.1, p.54-61, 1967.
- SCHWANKL, L.J.; WALLENDER, W.W. Furrow modeling with variable hydraulics characteristics. Proceedings of the Specialty Conference Sponsored by the Irrigation and Drainage Division, ASCE, p.753-760, 1987.
- Zero inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics. Transactions of the ASAE, v.31, n.5, p.1470-1475, set/out. 1988.
- SHERMAN, B.; SINGH, V.P. A kinematic model for surface irrigation. Water resources research, v.14, n.2, p.357-364, 1978.
- A Kinematic model for surface irrigation: an extension. Water resources research, v.18, n.3, p.659-667, 1982.
- SHOCKLEY, D.G. et. al. A method for determining intake characteristics of irrigation furrows. Agricultural Research Service Report, p.41-31, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1959.
- SINGH, V.P.; CHAUHAN, H.S. Shape factors in irrigation water advance equation. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.98, n.IR3, p.443-458, set. 1972.

SINGH, V.P.; HE, Y.C. Muskingum model for furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.114, n.1, p. 89-103, fev. 1988.

SINGH, V.P.; RAM R.S. A kinematic model for surface irrigation: verification by experimental data. Water resources research, v.19, n.6, p.1599, 1983.

————— Solution of the kinematic-wave equations for border irrigation. Agricultural water management, v.9, p.127-136, 1984.

SINGH, V.P.; YU, F.X. A mathematical model for border irrigation I. Advance and storage phases. Irrigation science, v.8, n.3, p.151-174, jul. 1987.

————— A mathematical model for border irrigation II. Vertical and horizontal recession phases. Irrigation science, v.8, n.3, p.175-190, jul. 1987.

————— A mathematical model for border irrigation III. Evaluation of models. Irrigation science, v.8, n.3, p.191-213, jul. 1987.

————— Derivation of infiltration equation using systems approach. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.6, p.837-858, nov/dez. 1990.

SINGH, V.P.; HE, Y.C.; YU, F.X. 1-D, 2-D and 3-D infiltration for irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering., ASCE, v.113, n.2, p.266-278, mai. 1987.

SINGH, V.P.; SCARLATOS, P.D.; RAUDALES, S.A. Muskingum model for border irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.114, n.2, p.266-280, mai. 1988.

- SINGH, V.P.; SCARLATOS, P.D.; PRASAD, S.N. An improved Lewis-Milne equation for the advance phase of border irrigation. *Irrigation science*, v.11, n.1, p.01-06, jan. 1990.
- SMERDON, E.T. et al. Infiltration from irrigation advance data I: theory. *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, v.114, n.1, p.4-17, 1988.
- SMITH, R.E. Border irrigation advance and ephemeral flood waves. *Journal of the irrigation and drainage division*, ASCE, v.102, n.IR3, p.325-342, 1972.
- Border irrigation advance and ephemeral flood waves. *Journal of the irrigation and drainage division*, ASCE, v.98, n.IR2, p.289-307, jun. 1972.
- SMITH, D.L.; DUKE, H.R. Prediction of irrigation advance rates in real time. *American society of agricultural engineers*, ASAE, paper n.84-2590, St Joseph, Michigan, 1984.
- SOMERS, L.M. The prediction of lateral water movement during furrow irrigation. Australia, 1987. Monografia(Curso de Especialização)-University of New England.
- SOUZA, F. Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation. California, 1961. 172p. Tese(Doutorado)-University of California.
- Modelo matemático da irrigação por sulcos. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.19, n.9, p.1135-1143, set. 1984.
- STRELKOFF, T. Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the hydraulics division*, ASCE, v.96, n.HY1, p.223-252, jan. 1970.

- Algebraic computation of flow in border irrigation. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.103, n.IR3, p.357-377, set. 1977.
- Dimensionless formulation of furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.111, n.4, p.380-393, dez. 1985.
- STRELKOFF, T.; CLEMMENS, A.J. Dimensionless stream advance in sloping borders. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.107, n.IR4, p.361-362, dez. 1981.
- STRELKOFF, T.; KATOPODES, N.D. End depth under zero-inertia conditions. Journal of the hydraulics division, ASCE, v.103, n.HY7, p.699-711, jul. 1977a.
- Border-irrigation hydraulics with zero inertia. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.103, n.IR3, p.325-342, set. 1977b.
- STRELKOFF, T.; SOUZA, F. Modeling effect of depth on furrow infiltration. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.110, n.4, p.375-387, dez. 1984.
- S.C.S. FURROW IRRIGATION. SCS National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C. p.57-61, 1979.
- TISDALL, J.M.; ADEM, H.H. An example of custom prescribed tillage in south-eastern Australia. Journal of the agricultural engineering research, v.40, n.1, p.23-32, 1988.
- THORNE, D.W. The desert shall blossom as a rose. Tenth Annual Faculty Res. Lect., Faculty Assoc., Utah State Agr. Coll., Logan, Utah, 1951.

- TROUT, T.J. Furrow geometric parameters. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.117, n.5, p.613-633, set/out. 1991.
- TROUT, T.J.; MACKAY, B.E. Furrow inflow and infiltration variability. Transactions of the ASAE, v.31, n.2, p.531-537, mar/abr 1988a.
- Inflow-outflow infiltration measurement accuracy. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.114, n.2, p.256-265, mai. 1988b.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Dicionário de termos técnicos de irrigação e drenagem. ABID. Minas Gerais, 1978.
- VIEIRA, J.H.D. Conditions governing the use of approximations for the Saint-Venant equations for shallow surface water flow. Journal of hydrology, v.60, p.43-58, 1983.
- VOGEL, T.; HOPMANS, J.W. Two-dimensional analysis of furrow infiltration. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.118, n.5, p.791-806, set/out. 1992.
- WALKER, W.R.; BUSMAN, J.D. Real-time estimation of furrow infiltration. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.3, p.299-318, mai/jun. 1990.
- WALKER, W.R.; HUMPHERYS, A.S. Kinematic-wave furrow irrigation model. Journal of the irrigation and drainage engineering, ASCE, v.109, n.1R4, p.377-392, 1983.
- WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. The theory and practice of surface irrigation - A guide for study in surface irrigation engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1964.

- WALKER, W.R.; WILLARDSON, L.S. Infiltration measurements for simulating furrow irrigation. Advances in infiltration. ASAE. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration. Chicago, Illinois. p.241-248, dez. 1983.
- WALLENDER, W.W. Furrow model with spatially varying infiltration. Transactions of the ASAE. v.29, n.4, p.1012-1016, jul/ago. 1986.
- WALLENDER, W.W.; RAYEJ, M. Zero-inertia surge model with wet-dry advance. Transactions of the ASAE. v.28, n.5, p.1530-1534, set/out. 1985.
- Shooting method for Saint-Venant equations of furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.116, n.1, p.114-122, fev. 1990.
- WALLENDER, W.W.; YOKOKURA, J. Space solution of kinematic-wave model by time iteration. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v. 117, n.1, p.140-144, jan/fev. 1991.
- WEIR, G.J. Surface irrigation advance after gate closure. WRR. v.21, p.1409, 1983.
- WILKE, O.; SMERDON, E.T. A solution of the irrigation advance problem. Journal of the irrigation and drainage division. ASCE, v.91, n.IR3, Proceedings of the paper 4471: p.23-34, set. 1965.
- WILKE, O.C. A hidrodynamic study of flow in irrigation furrows. Water Resources Institute, Technical Report n.13, Texas A & M University, College Station, Texas, 1968.
- WILLARDSON, L.S. Attainable irrigation efficiencies. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.98, n.IR2, p.239-246, Jun. 1972.

- WILLARDSON, L.S., BISHOP, A.A. Analysis of surface irrigation application efficiency. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v. 93, n. IR2, p.21-36, Jun. 1967.
- WILLIAMS, W.A.; DONEEN, L.D.; RIRIE, D. Production of sugar beets following winter green manure cropping in California: II. Soil physical conditions and associated crop response. Soil science society of american proceedings, v.21, n.1, p.92-94, 1957.
- WILSON, B.N.; ELLIOTT, R.L. Furrow advance using simple routing models. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.114, n.1, p.104-117, fev. 1988.
- WITHAM, G.B. The effects of hydraulic resistance in the dam-break-problem. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, p.227, 399-407, 1955.
- WITHERS, B.; VIPOND, S. Irrigation - design and practice. Edit. B.T. Batsford Limited, 1974.
- WU, I.P. Recession flow in surface irrigation. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.98, n. IR1, p.77-90, mar. 1972.
- WU, I.P.; ASCE, A.M.; BISHOP, A.A. Graphic relation of intake, length-of-run and time. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, v.96, n. IR3, p.233-240, set. 1970.
- YU, F.X.; SINGH, V.P. Analytical model for furrow irrigation. Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, v.110, n.2, p.154-171, mar/abr. 1990.
- YITAYEW, M.; LETEY, J.; VAUX JR., H.J., FEINERMAN, E. Factors affecting uniformity and optimal water management with furrow irrigation. Irrigation science, v.6, n.3, p.201-210, out. 1985.

APÊNDICE 1

GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Seja a seção transversal do sulco de forma parabólica, esquematicamente representada na Fig. 01, onde o elemento geométrico B representa a largura da seção de escoamento, A a área dessa seção e y_0 a profundidade da lamina líquida, determinada no centro da seção.

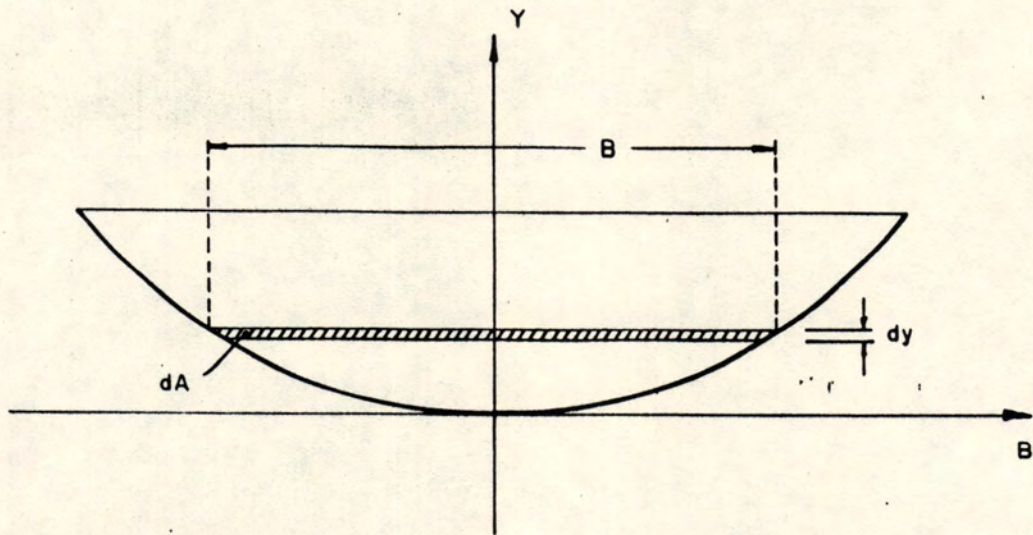


Fig. 01 - Geometria da seção transversal de um sulco de infiltração.

A forma parabólica do sulco obedece a equação:

$$B = C \cdot y_{no}^M \quad (01)$$

onde C e M = constantes determinadas empiricamente, que dependem da geometria do sulco.

O elemento de área dA, é representado pela função

$$dA = B \cdot dy \quad (02)$$

Substituindo a Equação (1), em (2), fica

$$dA = [C \cdot y^M] \cdot dy \quad (03)$$

Efetuada a integral definida, temos

$$\int_0^A dA = C \cdot \int_0^{y_{no}} y^M dy \quad (04)$$

A determinação da área da seção transversal do sulco será, então

$$\left[A \right]_0^A = \frac{C}{M+1} \left[y^{M+1} \right]_0^{y_{no}} \quad (05)$$

$$A = \frac{C}{M+1} \cdot y_{no}^{M+1} \quad (06)$$

APÊNDICE 2

$$\text{CÁLCULO DA INTEGRAL } \int \frac{1}{1 + x^{2/3}} dx$$

Segundo LEVIEN (1985), pode-se proceder à integração de um pequeno número de funções algébricas não racionais, em termos de funções elementares. A integração dessas funções pode ser conduzida à de funções racionais por uma substituição conveniente da variável, ou mesmo à de funções cujas integrais figuram na lista de integrais imediatas.

Denomina-se "integração por racionalização" o método de integrar uma função que não é racional por substituição de variável, de modo a conduzir a integração à de uma função racional. No caso de diferenciais contendo apenas potências fracionárias de x , a integração de tais expressões pode ser conduzida à de uma função racional pela seguinte substituição:

$$x = z^n \tag{01}$$

onde n = mínimo múltiplo comum dos denominadores dos expoentes de x .

Procedendo a esta substituição, x , dx e cada radical da função pode ser expresso racionalmente como função de z .

Então, para calcular a integral da função

$$\int \frac{1}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta \quad (02)$$

procede-se a substituição

142

$$\zeta = z^n \quad (03)$$

Já que $n = 3$, a Equação (03) fica

$$\zeta = z^3; \quad z = \zeta^{1/3} \quad (04)$$

Então,

$$\zeta^{2/3} = z^2 \quad (05)$$

e

$$d\zeta = 3 \cdot z^2 dz \quad (06)$$

Substituindo as Equações (05) e (06) na Equação (02), fica

$$3 \int \frac{z^2}{1 + z^2} dz \quad (07)$$

e dividindo o numerador pelo denominador da fração, a Equação (07) se transforma em

$$3 \cdot \int \left[1 - \frac{1}{1 + z^2} \right] dz \quad (08)$$

que, para facilitar a resolução pode ser reescrita como:

$$3 \cdot \int dz - 3 \cdot \int \frac{1}{1 + z^2} dz \quad (09)$$

Sabe-se que

$$3 \cdot \int dz = 3 \cdot z \quad (10)$$

e que,

$$3 \cdot \int \frac{1}{1+z^2} dz = 3 \cdot \operatorname{arctg} z \quad (11)$$

143

Então, a Equação (09) pode ser reescrita como

$$3 \cdot z - 3 \cdot \operatorname{arctg} z \quad (12)$$

Fazendo a substituição de z da Equação (04), na Equação (12), temos finalmente

$$\int \frac{1}{1+\zeta^{2/3}} d\zeta = 3 \cdot \zeta^{1/3} - 3 \cdot \operatorname{arctg} \left[\zeta^{1/3} \right] \quad (13)$$

APÊNDICE 3

$$\text{CÁLCULO DA INTEGRAL } \int \frac{\zeta^{5/3}}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta$$

Utilizando o método de "integração por racionalização", descrita no Apêndice 2, para calcular a integral da função

$$\int \frac{\zeta^{5/3}}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta \quad (01)$$

procede-se a substituição

$$\zeta = z^n \quad (02)$$

Já que $n = 3$, a Equação (02) fica

$$\zeta = z^3; \quad z = \zeta^{1/3} \quad (03)$$

Então,

$$\zeta^{2/3} = z^2 \quad (04)$$

$$\zeta^{5/3} = z^5 \quad (05)$$

e

$$d\zeta = 3 \cdot z^2 dz \quad (06)$$

Substituindo as Equações (04) e (05) e (06) na Equação (01), fica

$$3 \int \frac{z^7}{1+z^2} dz \quad (07)$$

e dividindo o numerador pelo denominador da fração, a Equação (07) se transforma em

$$3 \cdot \int \left[z^5 - z^3 + z - \frac{z}{1+z^2} \right] dz \quad (08)$$

que, para facilitar a resolução, pode ser reescrita como:

$$3 \cdot \int z^5 dz - 3 \cdot \int z^3 dz + 3 \cdot \int z dz - 3 \cdot \int \frac{z}{1+z^2} dz \quad (09)$$

Sabe-se que

$$3 \cdot \int z^5 dz = \frac{3}{6} \cdot z^6 = \frac{1}{2} \cdot z^6 \quad (10)$$

$$3 \cdot \int z^3 dz = \frac{3}{4} \cdot z^4 \quad (11)$$

$$3 \cdot \int z dz = \frac{3}{2} \cdot z^2 \quad (12)$$

e que,

$$3 \cdot \int \frac{z}{1+z^2} dz = \frac{3}{2} \cdot \ln(1+z^2) \quad (13)$$

Então, a Equação (09) será igual a:

$$\frac{1}{2} \cdot z^6 - \frac{3}{4} \cdot z^4 + \frac{3}{2} \cdot z^2 - \frac{3}{2} \cdot \ln(1+z^2) \quad (14)$$

Fazendo a substituição de z da Equação (03), na Equação (14), obtém-se finalmente

$$\int \frac{\zeta^{5/3}}{1 + \zeta^{2/3}} d\zeta = \frac{1}{2} \cdot \zeta^2 - \frac{3}{4} \cdot \zeta^{4/3} + \frac{3}{2} \cdot \zeta^{2/3} - \frac{3}{2} \cdot \ln \left(1 + \zeta^{2/3} \right) \quad (15)$$

APÊNDICE 4

PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR -
MODELO DE LEVIEN E SOUZA (1987)

```
{primeiro programa }
```

```
program prog1;
```

```
Uses BIBMath1,BibIFat,Crt,Printer;
```

```
Const Esc = 27;
```

```
Enter = 13;
```

```
Var C,M,K,A,S0,Q0,N,Cu,Ry,Rz,L,Tc0:real;
```

```
Yn0,B,A0,Az0,Xa,Zt,Tr,ltr,ltrl,ltm,Q1,Yn1,Sy,G,Ti,Comprimentol:real;
```

```
Vy,Ztr,Ztrl,Vz,V0,Vr0,Vre,IncrFase4,IncrFase15,T,Tl:real;
```

```
Aux,Aux2,Aux3,Aux4,Aux5,Realant:real;
```

```
Erro,nLinTela,nLinImp : Byte;
```

```
Tecla : Char;
```

```
TMenu : TabMenu;
```

```
Imprime,Paratela :boolean;
```

```
{===== PROCEDIMENTOS PARA MONTAGEM DE TELAS  
=====}
```

```
Procedure LimpaLinha(LinInic,LinFim:Byte);
```

```
{ Objetivo : Apagar uma ou mais linhas da tela
```

```
Modo de Chamada : LimpaLinha(< arg1 > , < arg2 > );
```

```
onde:
```

```
arg1 - Linha inicial do trecho a ser apagado (Numero do  
tipo Byte, de 1 a 255)
```

```
arg2 - Linha final do trecho a ser apagado (Numero do  
tipo Byte, de 1 a 255) }
```

```
Begin
```

```
For LinInic := LinInic to LinFim Do
```

```
Begin
```

```
GotoXY(1,LinInic);
```

```
ClrEol;
```

```
End;
```

End;

{-----}

Procedure TelaPrinc;

{ Objetivo : Montar tela principal do programa
 Modo de Chamada : TelaPrinc; }

Begin

```

  ClrScr;
  TextBackGround(15);
  TextColor(0);
  GotoXY(28,1);
  Write(' ESCOAMENTO ');
  TextBackGround(0);
  TextColor(15);
  LinhaDupla(3,1,80);
  GotoXY(26,3);
  TextBackGround(15);
  TextColor(0);
  Write(' PROGRAMA 1 ');
  TextBackGround(0);
  TextColor(15);
  BordaSimples(2,24,4,56);
  LinhaDupla(23,1,80);

```

End;

{-----}

Procedure TelaMenu;

{ Objetivo : Montar tela para exibir o menu de opcoes
 Modo de Chamada : TelaMenu; }

Begin

```

  BordaSimples(9,24,15,56);
  TextBackGround(0);
  TextColor(14);
  GotoXY(25,8);
  Write(' >>> OPCOES <<<< ');
  GotoXY(19,7);
  TMenu[1].Opcao := 'Execucao';

```



```

TMenu[2].Opcao := 'Alteracao dos Dados';
TMenu[3].Opcao := 'Fim';
For I := 1 to 3 Do
  With TMenu[I] Do
    Begin
      Linha := I + 10;
      Coluna := 32;
    End;
  Menu(TMenu,2,3,Opcao,white,black);
End;

{-----}

Procedure IniciaDados;

{Inicializacao dos Dados}
Begin
  C := 1.9087; {coeficiente da equacao de largura maxima }
  M := 0.5445; {expoente da equacao de largura maxima}
  K := 7.31e-05; {coeficiente da equacao de infiltracao de Kostiakov}
  A := 0.8767; {expoente da equacao de infiltracao de Kostiakov}
  S0 = 0.0098; {declividade do sulco}
  Q0 = 0.03456; {vazao de entrada}
  N := 0.15; {fator de rugosidade de Manning}
  Cu = 60; {coeficiente que depende do sistema de unidade
utilizado }
  Ry := 0.75; {Fator de forma para o escoamento superficial }
  Rz := 0.80; {Fator de forma para o escoamento sub-superficial }
  L := 350; {comprimento do sulco}
  Tc0 := 696; {tempo de corte do fornecimento de agua }
  Incrfase4 := 0.5;
  Incrfase15 := 5;
End;

{-----}

Procedure LeValor(var Numero:Real;Linha,Coluna:Byte);

var LeuReal:Boolean;
Begin
  repeat
    RealAnt := Numero;
    LeuReal := LeReal(Numero,Linha,Coluna,erro);
  until LeuReal;
End;

```

```

if not LeuReal then
  if erro = 1 then
    begin
      LeuReal := True;
      Numero := RealAnt;
    end
  else
    MensSino('Numero Invalido !',23,1);
    EscreveRealXY(Numero,12,5,Linha,Coluna,Black,White);
    TextBackGround(Black);
    TextColor(White);
  until LeuReal;
End;

```

```
{-----}
```

```
Procedure AlteraDados;
```

```
Begin
```

```

  ClrScr;
  GotoXY(20,2);
  Writeln('Alteracao dos Dados');
  GotoXY(2,24);
  Writeln('Digite o novo dado ou <ENTER> para nao alterar.');
```



```

  Mens('Coeficiente da equacao de largura maxima           (C) : ',5,1);
  Mens('Expoente da equacao de largura maxima             (M) :
',6,1);
  Mens('Coeficiente da equacao de infiltracao de Kostiakov (K) :
',7,1);
  Mens('Expoente da equacao de infiltracao de Kostiakov     (a) :
',8,1);
  Mens('Declividade do sulco                               (S0) : ',9,1);
  Mens('Vazao de entrada                                     (Q0) : ',10,1);
  Mens('Fator de rugosidade de Manning                       (n) : ',11,1);
  Mens('Coeficiente que depende do sistema de unidade utilizado (Cu) :
',12,1);
  Mens('Fator de forma para o escoamento superficial         (Ry) :
',13,1);
  Mens('Fator de forma para o escoamento sub-superficial     (Rz) :
',14,1);
  Mens('Comprimento do sulco                                 (L) : ',15,1);

```

```

Mens('Tempo de corte do fornecimento de agua          (tc0) :
',16,1);
Mens('Incremento de t para fase 4                      : ',17,1);
Mens('Incremento de l para fase 15                    : ',18,1);

```

```

EscreveRealXY(C,12,5,5,65,Black,White);
EscreveRealXY(M,12,5,6,65,Black,White);
EscreveRealXY(K,12,5,7,65,Black,White);
EscreveRealXY(a,12,5,8,65,Black,White);
EscreveRealXY(s0,12,5,9,65,Black,White);
EscreveRealXY(Q0,12,5,10,65,Black,White);
EscreveRealXY(n,12,5,11,65,Black,White);
EscreveRealXY(Cu,12,5,12,65,Black,White);
EscreveRealXY(Ry,12,5,13,65,Black,White);
EscreveRealXY(Rz,12,5,14,65,Black,White);
EscreveRealXY(L,12,5,15,65,Black,White);
EscreveRealXY(Tc0,12,5,16,65,Black,White);
EscreveRealXY(IncrFase4,12,5,17,65,Black,White);
EscreveRealXY(IncrFase15,12,5,18,65,Black,White);

```

```

LeValor(C,5,65);
LeValor(M,6,65);
LeValor(K,7,65);
LeValor(a,8,65);
LeValor(s0,9,65);
LeValor(Q0,10,65);
LeValor(n,11,65);
LeValor(Cu,12,65);
LeValor(Ry,13,65);
LeValor(Rz,14,65);
LeValor(L,15,65);
LeValor(Tc0,16,65);
LeValor(IncrFase4,17,65);
LeValor(IncrFase15,18,65);

```

```
end;
```

```
{-----}
```

```
Procedure ImprimeMens(Impressora:Boolean;Mens:String;NLinhas:byte);
```

```
{ Objetivo : imprime uma mensagem + uma variavel na tela/imprensa  
parametros:
```

impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao
imprime

Mens- mensagem a ser impressa

NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

```
var i:byte;
begin
```

```
  if ParaTela then
```

```
    if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then
```

```
      begin
```

```
        EsperaTecla(Tecla, 'Digite qualquer tecla para continuar ...', 25, 1);
```

```
        Writeln;
```

```
        NLinTela := NLinhas
```

```
      end
```

```
    else
```

```
      Inc(NLinTela, NLinhas + 1);
```

```
  Writeln(Mens);
```

```
  For i:= 1 to NLinhas do
```

```
    Writeln;
```

```
  If Impressora then
```

```
  begin
```

```
    if nLinImp + NLinhas + 1 >= 62 then
```

```
      begin
```

```
        for i:= nLinImp + 1 to 66 do
```

```
          writeln(lst);
```

```
          NLinImp := NLinhas
```

```
        end
```

```
      else
```

```
        Inc(NLinImp, NLinhas + 1);
```

```
    Writeln(lst, Mens, ' ');
```

```
    For i:= 1 to NLinhas do
```

```
      Writeln(lst);
```

```
    end;
```

```
  end;
```

```
{-----}
```

Procedure

ImprimeVar(Impressora:Boolean;Mens:String;Variavel:Real;Tam,Dec,NLinhas:byte);

{ **Objetivo** : imprime uma mensagem + uma variavel na tela/impressora
parametros:

impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao

imprime

Mens- mensagem a ser impressa

Variavel - numero real a ser impresso

Tam- tamanho da variavel

Dec - numero de casas decimais

NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

var i:byte;

begin

if ParaTela then

if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then

begin

EsperaTecla(Tecla,'Digite qualquer tecla para continuar ...',25,1);

Writeln;

NLinTela := NLinhas

end

else

Inc(NLinTela,NLinhas + 1);

Writeln(Mens,' ',Variavel:Tam:Dec);

For i:= 1 to NLinhas do

Writeln;

If Impressora then

begin

if nLinImp + NLinhas + 1 >= 62 then

begin

for i:= nLinImp + 1 to 66 do

writeln(1st);

NLinImp := NLinhas

end

else

Inc(NLinImp,NLinhas + 1);

Writeln(1st,Mens,' ',Variavel:Tam:Dec);

```

    For i:= 1 to NLinhas do
        Writeln(lst);
    end;
end;

{-----}

Procedure
Imprime2Var(Impressora:Boolean;Mens1,Mens2:String;Var1,Var2:Real;Tam
1,Dec1,Tam2,Dec2,NLinhas:byte);

{ Objetivo : imprime uma mensagem + 2 variaveis na tela/impressora
parametros:
impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao
imprime
Mens1,Mens2- mensagem a ser impressa
Var1,Var2 - numero real a ser impresso
Tam1,Tam2- tamanho da variavel
Dec1,Dec2 - numero de casas decimais
NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

var i:byte;
begin

    if ParaTela then
        if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then
            begin
                EsperaTecla(Tecla,'Digite qualquer tecla para continuar ...',25,1);
                Writeln;
                NLinTela := NLinhas
            end
        else
            Inc(NLinTela,NLinhas + 1);

        Writeln(Mens1,' ',Var1:Tam1:Dec1,Mens2,' ',Var2:Tam2:Dec2);
        For i:= 1 to NLinhas do
            Writeln;

        If Impressora then
            begin
                if nLinImp + NLinhas + 1 >= 62 then
                    begin
                        for i:= nLinImp + 1 to 66 do

```

```

        writeln(lst);
        NLinImp := NLinhas
    end
    else
        Inc(NLinImp,NLinhas + 1);

        Writeln(lst,Mens1,' ',Var1:Tam1:Dec1,Mens2,' ',Var2:Tam2:Dec2);
        For i:= 1 to NLinhas do
            Writeln(lst);
        end;
    end;
end;

```

```
{-----}
```

```
Procedure ExecutaCalculo;
```

```
begin
```

```
Repeat
```

```

    EsperaTecla(Tecla,'Deseja parada em cada tela exibida (S/N) ?',24,1);
    write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];
GotoXY(1,24);
ClrEol;
ParaTela := UpCase(Tecla) = 'S';

```

```
Repeat
```

```

    EsperaTecla(Tecla,'Deseja enviar os resultados para a impressora (S/N) ?',24,1);
    write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];
GotoXY(1,24);
ClrEol;

```

```
Imprime := UpCase(Tecla) = 'S';
```

```
If Imprime then
```

```
Repeat
```

```

    EsperaTecla(Tecla,'A impressora esta ligada e posicionada (S/N) ?',24,1);
    write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];

```

```
Imprime := UpCase(Tecla) = 'S';
```

```
ClrScr;
{Fase de Avanco}
```

```
ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE AVANCO *****',0);
ImprimeMens(Imprime,'=====
=====,2);
```

```
{ 1-Calculo da profundidade normal em funcao de Q0 (Yn0) }
```

```
Yn0 := (Q0*N)/(Cu*Pot(S0,0.5,erro));
Yn0 := Yn0*(Pot(M+1,5/3,erro))/C;
Yn0 := Pot(Yn0,(3/(3*M+5)),erro);
```

```
ImprimeMens(Imprime,'1-Calculo da profundidade normal em funcao de Q0
(Yn0)',0);
ImprimeVar(Imprime,'Yn0 = ',Yn0,15,10,1);
```

```
{2- Calculo da largura da secao transversal do sulco, na superficie da agua
(B) }
```

```
B := C*Pot(Yn0,M,erro);
```

```
ImprimeMens(Imprime,'2- Calculo da largura da secao transversal do sulco,
na superficie da agua (B)',0);
ImprimeVar(Imprime,'B = ',B,10,4,1);
```

```
{ 3- Calculo da area da secao transversal de escoamento na extremidade a
montante (A0) }
```

```
A0 := (B*Yn0)/(M+1);
```

```
ImprimeMens(Imprime,'3- Calculo da area da secao transversal de
escoamento na extremidade a montante (A0)',0);
ImprimeVar(Imprime,'A0 = ',A0,10,4,1);
```

```
{ 4- Calculo da distancia de avanco ao longo do sulco, em funcao do tempo
(Xa) }
```

```
ImprimeMens(Imprime,'4- Calculo da distancia de avanco ao longo do
sulco, em funcao do tempo (Xa)',0);
T := -IncrFase4;
```



```

Repeat
  T := T + IncrFase4;
  Xa := (Q0*T)/(A0*Ry + B*K*Pot(T,A,erro)*Rz);
  Imprime2Var(Imprime,'t = ',' Xa = ',t,Xa,10,4,10,4,0);
Until Trunc(Xa) >= Trunc(L);
Tl := T;

```

{ 5- Calculo da profundidade de infiltracao em funcao do tempo (Zt) }

```

ImprimeMens(Imprime,' ',0);
ImprimeMens(Imprime,'5- Calculo da profundidade de infiltracao em funcao
do tempo (Zt)',0);
Zt := K*Pot(t,a,erro);
ImprimeVar(Imprime,'Zt = ',Zt,10,4,1);

```

{ 6- Calculo do volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco, na extremidade a montante (Az0) }

```

ImprimeMens(Imprime,'6- Calculo do volume infiltrado por unidade de
comprimento do sulco',0);
ImprimeMens(Imprime,'na extremidade a montante (Az0)',0);
Az0 := B*Zt;
ImprimeVar(Imprime,'Az0 = ',Az0,10,4,2);

```

{ Fase de Recessao }

```

ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE RECESSAO
*****',0);
ImprimeMens(Imprime,'=====
===== ',2);

```

{ 7- Calculo do tempo do inicio da recessao (Tr) }

```

ImprimeMens(Imprime,'7- Calculo do tempo do inicio da recessao (Tr)',0);
Tr := Tc0 + (A0/(M+2))*(L/Q0);
ImprimeVar(Imprime,'Tr = ',Tr,10,4,1);

```

{ 8- Calculo da taxa de infiltracao no tempo Tr (ITr) }

```

ImprimeMens(Imprime,'8- Calculo da taxa de infiltracao no tempo Tr
(ITr)',0);
Itr := A*K*Pot(Tr,A-1,erro);
ImprimeVar(Imprime,'Itr = ',Itr,15,10,1);

```


{ 14- Calculo da constante G (G) }

```

ImprimeMens(Imprime,'14- Calculo da constante G (G)',0);
G:= (Cu*Pot(S0,0.5,erro)*Pot(Sy,5/3,erro))/
  ( Pot((M+1),5/3,erro) * N * ltm );
ImprimeVar(Imprime,'G = ',G,15,10,1);

```

{15 - Calculo do tempo de infiltracao (Ti) }

```

ImprimeMens(Imprime,'15- Calculo do tempo de infiltracao (Ti)',0);
ComprimentoL := L;
Aux := Pot(G,1.5,erro);
Repeat
  Aux2 := Pot((Aux*L),1/3,erro);
  Aux3 := ArcTan(Aux2); {arctangente de aux2 }
  Aux4 := Pot(Aux*ComprimentoL,1/3,erro);
  Aux5 := ArcTan(Aux4); {arctangente de aux4 }
  Ti := Tr + (( Sy / ( (M+1)*ltm*Aux ) ) * ( (3*Aux2-3*Aux3) -
(3*Aux4-3*Aux5) ) );
  Imprime2Var(Imprime,'l = ', Ti = ',ComprimentoL,Ti,10,4,10,4,0);
  ComprimentoL := ComprimentoL - IncrFase15;
until ComprimentoL <= -IncrFase15;

```

```

ImprimeMens(Imprime,' ',2);
{ CALCULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL QUE OCORRE ANTES DA
RECESSAO }

```

```

ImprimeMens(Imprime,'CALCULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL QUE
OCORRE ANTES DA RECESSAO',0);

```

```

ImprimeMens(Imprime,'=====
=====
=====',2);

```

{16 - Calculo do volume superficial, no tempo Tr (Vy) }

```

ImprimeMens(Imprime,'16 - Calculo do volume superficial, no tempo Tr
(Vy)',0);
Vy := (C / ( (M+1)*(M+2) )) * Pot(Sy,M+1,erro) * Pot(L,M+2,erro);
ImprimeVar(Imprime,'Vy = ',Vy,15,10,1);

```

{17- Calculo da profundidade de infiltracao no tempo tr (Ztr) }

ImprimeMens(Imprime,'17- Calculo da profundidade de infiltracao no tempo tr (Ztr)',0);

Ztr := K*Pot(Tr,a,erro);

ImprimeVar(Imprime,'Ztr = ',Ztr,15,10,1);

{18- Calculo da profundidade de infiltracao, em funcao de 'tr - tl' (Ztrl) }

ImprimeMens(Imprime,'18- Calculo da profundidade de infiltracao, em funcao de "tr - tl" (Ztrl)',0);

Ztrl := K*Pot(Tr-Tl,a,erro);

ImprimeVar(Imprime,'Ztrl = ',Ztrl,15,10,1);

{19- Calculo do volume infiltrado, no tempo "Tr" (Vz) }

ImprimeMens(Imprime,'19- Calculo do volume infiltrado, no tempo "Tr" (Vz)',0);

Vz := ((Ztr + Ztrl)/2)*B*L;

ImprimeVar(Imprime,'Vz = ',Vz,15,10,1);

{20- Calculo do volume total aplicado (V0) }

ImprimeMens(Imprime,'20- Calculo do volume total aplicado (V0)',0);

V0 := Q0*Tc0;

ImprimeVar(Imprime,'V0 = ',V0,15,10,1);

{21- Volume de escoamento superficial, no tempo "Tr" (Vr0) }

ImprimeMens(Imprime,'21- Volume de escoamento superficial, no tempo "Tr" (Vr0)',0);

Vr0 := V0 - Vy - Vz;

ImprimeVar(Imprime,'Vr0 = ',Vr0,15,10,2);

{CALCULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL QUE OCORRE DURANTE A RECESSAO }

ImprimeMens(Imprime,'CALCULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL QUE OCORRE DURANTE A RECESSAO',0);

ImprimeMens(Imprime,'=====

=====

=====',2);


```
TelaPrinc;  
End;  
Until Opcao = 3 ;  
ClrScr;  
End. {Programa Principal}
```

APÊNDICE 5

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - MODELO DE LEVIEN E SOUZA (1987)

***** FASE DE AVANÇO *****

1- Cálculo da profundidade normal em função de Q_0 (Y_{n0})

$$Y_{n0} = 0.0428408216$$

2- Cálculo da largura da seção transversal do sulco, na superfície da água (B)

$$B = 0.3434$$

3- Cálculo da área da seção transversal de escoamento na extremidade a montante (A_0)

$$A_0 = 0.0095$$

4- Cálculo da distância de avanço ao longo do sulco, em função do tempo (X_a)

t = 0.0000	$X_a = 0.0000$
t = 0.5000	$X_a = 2.4153$
t = 1.0000	$X_a = 4.8244$
t = 1.5000	$X_a = 7.2279$
t = 2.0000	$X_a = 9.6261$
t = 2.5000	$X_a = 12.0193$
t = 3.0000	$X_a = 14.4076$
t = 3.5000	$X_a = 16.7911$
t = 4.0000	$X_a = 19.1700$
t = 4.5000	$X_a = 21.5442$
t = 5.0000	$X_a = 23.9140$
t = 5.5000	$X_a = 26.2793$
t = 6.0000	$X_a = 28.6402$
t = 6.5000	$X_a = 30.9968$
t = 7.0000	$X_a = 33.3492$
t = 7.5000	$X_a = 35.6973$
t = 8.0000	$X_a = 38.0413$
t = 8.5000	$X_a = 40.3812$
t = 9.0000	$X_a = 42.7170$
t = 9.5000	$X_a = 45.0488$
t = 10.0000	$X_a = 47.3765$
t = 10.5000	$X_a = 49.7003$
t = 11.0000	$X_a = 52.0202$
t = 11.5000	$X_a = 54.3362$
t = 12.0000	$X_a = 56.6484$
t = 12.5000	$X_a = 58.9567$
t = 13.0000	$X_a = 61.2612$
t = 13.5000	$X_a = 63.5619$
t = 14.0000	$X_a = 65.8589$
t = 14.5000	$X_a = 68.1521$
t = 15.0000	$X_a = 70.4417$
t = 15.5000	$X_a = 72.7275$
t = 16.0000	$X_a = 75.0098$
t = 16.5000	$X_a = 77.2884$
t = 17.0000	$X_a = 79.5634$
t = 17.5000	$X_a = 81.8348$
t = 18.0000	$X_a = 84.1027$
t = 18.5000	$X_a = 86.3671$
t = 19.0000	$X_a = 88.6279$
t = 19.5000	$X_a = 90.8852$
t = 20.0000	$X_a = 93.1391$
t = 20.5000	$X_a = 95.3894$
t = 21.0000	$X_a = 97.6364$
t = 21.5000	$X_a = 99.8799$
t = 22.0000	$X_a = 102.1201$

t =	22.5000	Xa =	104.3568
t =	23.0000	Xa =	106.5902
t =	23.5000	Xa =	108.8202
t =	24.0000	Xa =	111.0469
t =	24.5000	Xa =	113.2703
t =	25.0000	Xa =	115.4904
t =	25.5000	Xa =	117.7072
t =	26.0000	Xa =	119.9207
t =	26.5000	Xa =	122.1310
t =	27.0000	Xa =	124.3380
t =	27.5000	Xa =	126.5418
t =	28.0000	Xa =	128.7424
t =	28.5000	Xa =	130.9398
t =	29.0000	Xa =	133.1340
t =	29.5000	Xa =	135.3251
t =	30.0000	Xa =	137.5130
t =	30.5000	Xa =	139.6977
t =	31.0000	Xa =	141.8794
t =	31.5000	Xa =	144.0579
t =	32.0000	Xa =	146.2333
t =	32.5000	Xa =	148.4057
t =	33.0000	Xa =	150.5749
t =	33.5000	Xa =	152.7411
t =	34.0000	Xa =	154.9043
t =	34.5000	Xa =	157.0644
t =	35.0000	Xa =	159.2215
t =	35.5000	Xa =	161.3755
t =	36.0000	Xa =	163.5266
t =	36.5000	Xa =	165.6747
t =	37.0000	Xa =	167.8198
t =	37.5000	Xa =	169.9620
t =	38.0000	Xa =	172.1011
t =	38.5000	Xa =	174.2374
t =	39.0000	Xa =	176.3707
t =	39.5000	Xa =	178.5011
t =	40.0000	Xa =	180.6286
t =	40.5000	Xa =	182.7531
t =	41.0000	Xa =	184.8748
t =	41.5000	Xa =	186.9936
t =	42.0000	Xa =	189.1096
t =	42.5000	Xa =	191.2227
t =	43.0000	Xa =	193.3329
t =	43.5000	Xa =	195.4403
t =	44.0000	Xa =	197.5449
t =	44.5000	Xa =	199.6466
t =	45.0000	Xa =	201.7455
t =	45.5000	Xa =	203.8417
t =	46.0000	Xa =	205.9350
t =	46.5000	Xa =	208.0256
t =	47.0000	Xa =	210.1134
t =	47.5000	Xa =	212.1985
t =	48.0000	Xa =	214.2808
t =	48.5000	Xa =	216.3603
t =	49.0000	Xa =	218.4371
t =	49.5000	Xa =	220.5112
t =	50.0000	Xa =	222.5826
t =	50.5000	Xa =	224.6513
t =	51.0000	Xa =	226.7173
t =	51.5000	Xa =	228.7805
t =	52.0000	Xa =	230.8412
t =	52.5000	Xa =	232.8991
t =	53.0000	Xa =	234.9544
t =	53.5000	Xa =	237.0070

t = 54.0000	Xa = 239.0570
t = 54.5000	Xa = 241.1043
t = 55.0000	Xa = 243.1490
t = 55.5000	Xa = 245.1911
t = 56.0000	Xa = 247.2306
t = 56.5000	Xa = 249.2675
t = 57.0000	Xa = 251.3017
t = 57.5000	Xa = 253.3334
t = 58.0000	Xa = 255.3626
t = 58.5000	Xa = 257.3891
t = 59.0000	Xa = 259.4131
t = 59.5000	Xa = 261.4345
t = 60.0000	Xa = 263.4533
t = 60.5000	Xa = 265.4697
t = 61.0000	Xa = 267.4835
t = 61.5000	Xa = 269.4947
t = 62.0000	Xa = 271.5035
t = 62.5000	Xa = 273.5097
t = 63.0000	Xa = 275.5135
t = 63.5000	Xa = 277.5147
t = 64.0000	Xa = 279.5134
t = 64.5000	Xa = 281.5097
t = 65.0000	Xa = 283.5035
t = 65.5000	Xa = 285.4948
t = 66.0000	Xa = 287.4837
t = 66.5000	Xa = 289.4701
t = 67.0000	Xa = 291.4541
t = 67.5000	Xa = 293.4356
t = 68.0000	Xa = 295.4147
t = 68.5000	Xa = 297.3914
t = 69.0000	Xa = 299.3656
t = 69.5000	Xa = 301.3374
t = 70.0000	Xa = 303.3069
t = 70.5000	Xa = 305.2739
t = 71.0000	Xa = 307.2385
t = 71.5000	Xa = 309.2008
t = 72.0000	Xa = 311.1607
t = 72.5000	Xa = 313.1182
t = 73.0000	Xa = 315.0733
t = 73.5000	Xa = 317.0261
t = 74.0000	Xa = 318.9765
t = 74.5000	Xa = 320.9246
t = 75.0000	Xa = 322.8704
t = 75.5000	Xa = 324.8138
t = 76.0000	Xa = 326.7549
t = 76.5000	Xa = 328.6936
t = 77.0000	Xa = 330.6301
t = 77.5000	Xa = 332.5642
t = 78.0000	Xa = 334.4961
t = 78.5000	Xa = 336.4256
t = 79.0000	Xa = 338.3528
t = 79.5000	Xa = 340.2778
t = 80.0000	Xa = 342.2005
t = 80.5000	Xa = 344.1209
t = 81.0000	Xa = 346.0391
t = 81.5000	Xa = 347.9550
t = 82.0000	Xa = 349.8686
t = 82.5000	Xa = 351.7800

5- Calculo da profundidade de infiltracao em funcao do tempo (Zt)
 $Z_t = 0.0035$

6- Calculo do volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco

na extremidade a montante (Az0)

$$Az0 = 0.0012$$

***** FASE DE RECESSAO *****

7- Calculo do tempo do inicio da recessao (Tr)

$$Tr = 733.9093$$

8- Calculo da taxa de infiltracao no tempo Tr (ITr)

$$Itr = 0.0000284076$$

9- Calculo da taxa de infiltracao em funcao de "Tr-TI" (ITrI)

$$ITrI = 0.0000288284$$

10- Calculo da taxa de infiltracao media (Itrm)

$$Itrm = 0.0000286180$$

11- Calculo da vazao de escoamento superficial no tempo "tr" (Q1)

$$Q1 = 0.0311205306$$

12- Calculo da profundidade normal em funcao de Q1 (Yn1)

$$Yn1 = 0.0408571741$$

13- Calculo da declividade superficial da agua (Sy)

$$Sy = 0.0001167348$$

14- Calculo da constante G (G)

$$G = 0.1869481367$$

15- Calculo do tempo de infiltracao (Ti)

$$l = 350.0000 \quad Ti = 733.9093$$

$$l = 345.0000 \quad Ti = 735.1988$$

$$l = 340.0000 \quad Ti = 736.4997$$

$$l = 335.0000 \quad Ti = 737.8120$$

$$l = 330.0000 \quad Ti = 739.1362$$

$$l = 325.0000 \quad Ti = 740.4724$$

$$l = 320.0000 \quad Ti = 741.8210$$

$$l = 315.0000 \quad Ti = 743.1823$$

$$l = 310.0000 \quad Ti = 744.5566$$

$$l = 305.0000 \quad Ti = 745.9441$$

$$l = 300.0000 \quad Ti = 747.3453$$

$$l = 295.0000 \quad Ti = 748.7605$$

$$l = 290.0000 \quad Ti = 750.1900$$

$$l = 285.0000 \quad Ti = 751.6342$$

$$l = 280.0000 \quad Ti = 753.0935$$

$$l = 275.0000 \quad Ti = 754.5684$$

$$l = 270.0000 \quad Ti = 756.0592$$

$$l = 265.0000 \quad Ti = 757.5664$$

$$l = 260.0000 \quad Ti = 759.0905$$

$$l = 255.0000 \quad Ti = 760.6320$$

$$l = 250.0000 \quad Ti = 762.1914$$

$$l = 245.0000 \quad Ti = 763.7692$$

$$l = 240.0000 \quad Ti = 765.3660$$

$$l = 235.0000 \quad Ti = 766.9824$$

$$l = 230.0000 \quad Ti = 768.6190$$

$$l = 225.0000 \quad Ti = 770.2765$$

$$l = 220.0000 \quad Ti = 771.9556$$

$$l = 215.0000 \quad Ti = 773.6571$$

$$l = 210.0000 \quad Ti = 775.3816$$

$$l = 205.0000 \quad Ti = 777.1301$$

1 =	200.0000	Ti =	778.9035
1 =	195.0000	Ti =	780.7025
1 =	190.0000	Ti =	782.5283
1 =	185.0000	Ti =	784.3819
1 =	180.0000	Ti =	786.2644
1 =	175.0000	Ti =	788.1770
1 =	170.0000	Ti =	790.1210
1 =	165.0000	Ti =	792.0976
1 =	160.0000	Ti =	794.1085
1 =	155.0000	Ti =	796.1552
1 =	150.0000	Ti =	798.2393
1 =	145.0000	Ti =	800.3628
1 =	140.0000	Ti =	802.5276
1 =	135.0000	Ti =	804.7358
1 =	130.0000	Ti =	806.9898
1 =	125.0000	Ti =	809.2921
1 =	120.0000	Ti =	811.6456
1 =	115.0000	Ti =	814.0533
1 =	110.0000	Ti =	816.5186
1 =	105.0000	Ti =	819.0453
1 =	100.0000	Ti =	821.6375
1 =	95.0000	Ti =	824.2999
1 =	90.0000	Ti =	827.0378
1 =	85.0000	Ti =	829.8569
1 =	80.0000	Ti =	832.7640
1 =	75.0000	Ti =	835.7667
1 =	70.0000	Ti =	838.8739
1 =	65.0000	Ti =	842.0957
1 =	60.0000	Ti =	845.4442
1 =	55.0000	Ti =	848.9337
1 =	50.0000	Ti =	852.5812
1 =	45.0000	Ti =	856.4077
1 =	40.0000	Ti =	860.4390
1 =	35.0000	Ti =	864.7081
1 =	30.0000	Ti =	869.2579
1 =	25.0000	Ti =	874.1461
1 =	20.0000	Ti =	879.4544
1 =	15.0000	Ti =	885.3051
1 =	10.0000	Ti =	891.8997
1 =	5.0000	Ti =	899.6298
1 =	0.0000	Ti =	909.6964

CALCULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL QUE OCORRE ANTES DA RECESSAO

16 - Calculo do volume superficial, no tempo Tr (Vy)
 $Vy = 1.2176410412$

17- Calculo da profundidade de infiltracao no tempo tr (Ztr)
 $Ztr = 0.0237807787$

18- Calculo da profundidade de infiltracao, em funcao de "tr - tl" (Ztrl)
 $Ztrl = 0.0214201817$

19- Calculo do volume infiltrado, no tempo "Tr" (Vz)
 $Vz = 2.7162513243$

20- Calculo do volume total aplicado (V0)
 $V0 = 24.0537600000$

21- Volume de escoamento superficial, no tempo "Tr" (Vr0)

APÊNDICE 6

PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO EM MICROCOMPUTADOR -
MODELO DE YU E SINGH (1990)

```
{ $A + , B - , D + , E + , F - , G - , I + , L + , N + , O - , R - , S + , V + , X - }
{ $M 16384,0,655360}
{ Segundo programa de escoamento}
```

```
program prog2;
```

```
Uses BIBMath1,BibIFat,Crt,Printer;
```

```
Const Esc = 27;
      Enter = 13;
```

```
Type vetor = Array [1..500] Of LongInt;
```

```
Var ene, p, afi, bf, d, ele, u, erre, cf, h, e, g, sf: Real;
    ff: vetor;
    nf: Word;
    L,S0,n,C,M,Q0,Cu,K,a,Ci,F,Ts:real;
```

```
Yn0,B,Af,Pf,R,h0,A0,P0,Q0Ant,h2,A2,P2,t2,Ai2,A1,Via,Vsa,Vt,t,Ta:real;
```

```
Ae,Pe,Q0f,he,P1Barra,I1Barra,Tv,xr,ht,At,Pt,Vtr,Qt,IBarra,Vtv,Dt,Vtrant:real;
```

```
l;
  Aux,RealAnt,y,yant,Bant,S,te,Tvc,tr:real;
  IncrFase2,IncrFase71,IncrFase8,IncrFase10:real;
  Precisaofase2: real;
  Erro,nLinTela, nLinImp : Byte;
  Tecla : Char;
  TMenu : TabMenu;
  Imprime,ParaTela:boolean;
```

```
{ ===== PROCEDIMENTOS PARA MONTAGEM DE TELAS
===== }
```

```
Procedure LimpaLinha(LinInic,LinFim:Byte);
```

```
{ Objetivo : Apagar uma ou mais linhas da tela
```

Modo de Chamada : LimpaLinha(< arg1 > , < arg2 >);

onde:

arg1 - Linha inicial do trecho a ser apagado (Numero do tipo Byte, de 1 a 255)

arg2 - Linha final do trecho a ser apagado (Numero do tipo Byte, de 1 a 255) }

Begin

For LinInic := LinInic to LinFim Do

Begin

GotoXY(1, LinInic);

ClrEol;

End;

End;

{-----}

Procedure TelaPrinc;

{ Objetivo : Montar tela principal do programa

Modo de Chamada : TelaPrinc; }

Begin

ClrScr;

TextBackGround(15);

TextColor(0);

GotoXY(28,1);

Write(' ESCOAMENTO ');

TextBackGround(0);

TextColor(15);

LinhaDupla(3,1,80);

GotoXY(26,3);

TextBackGround(15);

TextColor(0);

Write(' PROGRAMA 2 - Yu e Singh ');

TextBackGround(0);

TextColor(15);

BordaSimples(2,24,4,56);

LinhaDupla(23,1,80);

End;

{-----}

Procedure TelaMenu;

{ Objetivo : Montar tela para exibir o menu de opcoes
 Modo de Chamada : TelaMenu; }

Begin

BordaSimples(9,24,16,56);

TextBackGround(0);

TextColor(14);

GotoXY(25,8);

Write(' >>> O P C O E S <<< ');

GotoXY(19,7);

TMenu[1].Opcao := 'Execucao';

TMenu[2].Opcao := 'Alteracao dos Dados';

TMenu[3].Opcao := 'Alter.Incrementos/Precisoas';

TMenu[4].Opcao := 'Fim';

For I := 1 to 4 Do

With TMenu[I] Do

Begin

Linha := I + 10;

Coluna := 27;

End;

Menu(TMenu,2,4,Opcao,white,black);

End;

{-----}

Procedure IniciaDados;

{Inicializacao dos Dados}

Begin

L := 330; {comprimento do sulco}

S0 := 0.001032; {declividade do sulco}

N := 0.022; {fator de rugosidade de Manning}

C := 2.095; {coeficiente da equacao de largura maxima }

M := 0.4539; {expoente da equacao de largura maxima}

Q0 := 2.82; {vazao de entrada}

Cu := 89.16; {coeficiente que depende do sistema de unidade
 utilizado }

K := 3.17367e-02; {coeficiente da equacao de infiltracao de Kostiakov}

a := 0.5; {expoente da equacao de infiltracao de Kostiakov}

Ci := 0; {parametro de infiltracao da equacao de Kostiakov
 modificada}

```

f := 0.35;      {coeficiente de correcao do escoamento nao uniforme}
Ts := 208;     {tempo de corte do fornecimento de agua}
Incrfase2 := 0.001;
Incrfase71 := 5;
Incrfase8 := 5;
Incrfase10 := 5;
PrecisaoFase2 := 0.001;
End;

```

```
{-----}
```

```
Procedure LeValor(var Numero:Real;Linha,Coluna:Byte);
```

```
var LeuReal:Boolean;
```

```
Begin
```

```
  repeat
```

```
    RealAnt := Numero;
```

```
    LeuReal := LeReal(Numero,Linha,Coluna,erro);
```

```
    if not LeuReal then
```

```
      if erro = 1 then
```

```
        begin
```

```
          LeuReal := True;
```

```
          Numero := RealAnt;
```

```
        end
```

```
      else
```

```
        MensSino('Numero Invalido !',23,1);
```

```
        EscreveRealXY(Numero,12,5,Linha,Coluna,Black,White);
```

```
        TextBackGround(Black);
```

```
        TextColor(White);
```

```
    until LeuReal;
```

```
End;
```

```
{-----}
```

```
Procedure AlteraDados;
```

```
Begin
```

```
  ClrScr;
```

```
  GotoXY(20,2);
```

```
  Writeln('Alteracao dos Dados');
```

```
  GotoXY(2,24);
```

```
  Writeln('Digite o novo dado ou <ENTER> para nao alterar.');
```


Mens('Comprimento do sulco (L) : ',5,1);
 Mens('Declividade do sulco (SO) : ',6,1);
 Mens('Fator de rugosidade de Manning (n) : ',7,1);
 Mens('Coeficiente da equacao de largura maxima (C) : ',8,1);
 Mens('Expoente da equacao de largura maxima (M) :
 ',9,1);
 Mens('Vazao de entrada (Q0) : ',10,1);
 Mens('Coeficiente que depende do sistema de unidade utilizado (Cu) :
 ',11,1);
 Mens('Coeficiente da equacao de infiltracao de Kostiakov (K) :
 ',12,1);
 Mens('Expoente da equacao de infiltracao de Kostiakov (a) :
 ',13,1);
 Mens('Parametro de infiltracao da equacao de Kostiyav modific. (Ci) :
 ',14,1);
 Mens('Coeficiente de correcao do escoamento nao uniforme (f) :
 ',15,1);
 Mens('Tempo de corte do fornecimento de agua (Ts) :
 ',16,1);

EscreveRealXY(L,12,5,5,65,Black,White);
 EscreveRealXY(SO,12,5,6,65,Black,White);
 EscreveRealXY(n,12,5,7,65,Black,White);
 EscreveRealXY(C,12,5,8,65,Black,White);
 EscreveRealXY(M,12,5,9,65,Black,White);
 EscreveRealXY(Q0,12,5,10,65,Black,White);
 EscreveRealXY(Cu,12,5,11,65,Black,White);
 EscreveRealXY(K,12,5,12,65,Black,White);
 EscreveRealXY(a,12,5,13,65,Black,White);
 EscreveRealXY(Ci,12,5,14,65,Black,White);
 EscreveRealXY(f,12,5,15,65,Black,White);
 EscreveRealXY(Ts,12,5,16,65,Black,White);

LeValor(L,5,65);
 LeValor(s0,6,65);
 LeValor(n,7,65);
 LeValor(C,8,65);
 LeValor(M,9,65);
 LeValor(Q0,10,65);
 LeValor(Cu,11,65);
 LeValor(K,12,65);
 LeValor(a,13,65);

```

LeValor(Ci,14,65);
LeValor(f,15,65);
LeValor(Ts,16,65);

end;

{-----}

Procedure AlteraIncrPrec;

Begin

  ClrScr;
  GotoXY(20,2);
  Writeln('Alteracao de Incrementos / Precisoas');
  GotoXY(2,24);
  Writeln('Digite o novo dado ou <ENTER> para nao alterar.');
```

Mens('Incremento da Fase 2 (y)	: ',5,1);
Mens('Incremento da Fase 7 (S)	: ',7,1);
Mens('Incremento da Fase 8 (te)	: ',9,1);
Mens('Incremento da Fase 10 (xr)	: ',11,1);
Mens('Precisao da Fase 2 (Yn0 - y)	: ',13,1);

```

  EscreveRealXY(IncrFase2,12,5,5,65,Black,White);
  EscreveRealXY(IncrFase7,12,5,7,65,Black,White);
  EscreveRealXY(IncrteFase8,12,5,9,65,Black,White);
  EscreveRealXY(IncrFase10,12,5,11,65,Black,White);
  EscreveRealXY(PrecisaoFase2,12,5,13,65,Black,White);

  LeValor(IncrFase2,5,65);
  LeValor(IncrFase7,7,65);
  LeValor(IncrteFase8,9,65);
  LeValor(IncrFase10,11,65);
  LeValor(PrecisaoFase2,13,65);

end;

{-----}

Procedure ImprimeMens(Impressora:Boolean;Mens:String;NLinhas:byte);

{ Objetivo : imprime uma mensagem + uma variavel na tela/impressora
```

```

parametros:
impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao
imprime
Mens- mensagem a ser impressa
NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

var i:byte;
begin

  if ParaTela then
    if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then
      begin
        EsperaTecla(Tecla,'Digite qualquer tecla para continuar ...',25,1);
        Writeln;
        NLinTela := NLinhas
      end
    else
      Inc(NLinTela,NLinhas + 1);

  Writeln(Mens);
  For i:= 1 to NLinhas do
    Writeln;

  If Impressora then
  begin
    if nLinImp + NLinhas + 1 >= 64 then
      begin
        for i:= nLinImp + 1 to 66 do
          writeln(lst);
        NLinImp := NLinhas
      end
    else
      Inc(NLinImp,NLinhas + 1);

    Writeln(lst,Mens,' ');
    For i:= 1 to NLinhas do
      Writeln(lst);
  end;
end;

{-----}

```

Procedure

ImprimeVar(Impressora:Boolean;Mens:String;Variavel:Real;Tam,Dec,NLinhas:byte);

{ Objetivo : imprime uma mensagem + uma variavel na tela/impressora
parametros:

impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao
imprime

Mens- mensagem a ser impressa

Variavel - numero real a ser impresso

Tam- tamanho da variavel

Dec - numero de casas decimais

NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

var i:byte;

begin

if ParaTela then

if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then

begin

EsperaTecla(Tecla,'Digite qualquer tecla para continuar ...',25,1);

Writeln;

NLinTela := NLinhas

end

else

Inc(NLinTela,NLinhas + 1);

Writeln(Mens,' ',Variavel:Tam:Dec);

For i:= 1 to NLinhas do

Writeln;

If Impressora then

begin

if nLinImp + NLinhas + 1 >= 64 then

begin

for i:= nLinImp + 1 to 66 do

writeln(lst);

NLinImp := NLinhas

end

else

Inc(NLinImp,NLinhas + 1);

Writeln(lst,Mens,' ',Variavel:Tam:Dec);

```

    For i:= 1 to NLinhas do
        Writeln(1st);
    end;
end;

```

```

{-----}

```

Procedure

```

Imprime2Var(Impressora:Boolean;Mens1,Mens2:String;Var1,Var2:Real;Tam
1,Dec1,Tam2,Dec2,NLinhas:byte);

```

{ Objetivo : imprime uma mensagem + 2 variaveis na tela/impressora
parametros:

impressora - se true vai imprimir na impressora, caso contrario, nao
imprime

Mens1,Mens2- mensagem a ser impressa

Var1,Var2 - numero real a ser impresso

Tam1,Tam2- tamanho da variavel

Dec1,Dec2 - numero de casas decimais

NLinhas - Numero de linhas a saltar apos a impressao }

```

var i:byte;
begin

```

```

    if ParaTela then

```

```

        if nLinTela + NLinhas + 1 >= 23 then

```

```

            begin

```

```

                EsperaTecla(Tecla,'Digite qualquer tecla para continuar ...',25,1);

```

```

                Writeln;

```

```

                NLinTela := NLinhas

```

```

            end

```

```

        else

```

```

            Inc(NLinTela,NLinhas + 1);

```

```

        Writeln(Mens1,' ',Var1:Tam1:Dec1,Mens2,' ',Var2:Tam2:Dec2);

```

```

        For i:= 1 to NLinhas do

```

```

            Writeln;

```

```

    If Impressora then

```

```

        begin

```

```

            if nLinImp + NLinhas + 1 >= 64 then

```

```

                begin

```

```

                    for i:= nLinImp + 1 to 66 do

```

```

        writeln(lst);
        NLinImp := NLinhas
    end
    else
        Inc(NLinImp,NLinhas + 1);

        Writeln(lst,Mens1,' ',Var1:Tam1:Dec1,Mens2,' ',Var2:Tam2:Dec2);
        For i:= 1 to NLinhas do
            Writeln(lst);
        end;
    end;
end;

```

```
{-----}
```

```

Function Vazao (a: Real): Real;
var z:real;
Begin
    z := Sqrt(r*r-Sqr(r-a))/(r-a);
    a0 := r*r*ArcTan(z)-z*Sqr(r-a);
    p0 := 2*r*ArcTan(z);
    Vazao := (q0-60*Sqrt(s0)*Pot(a0,5/3,erro)/ene/Pot(p0,2/3,erro));
End; {Vazao }

```

```
{-----}
```

```

Function Vazao2 (aV: Real): Real;
Var Vazao1,z:Real;
Begin
    z := Sqrt(r*r-Sqr(r-aV))/(r-aV);
    a2 := r*r*ArcTan(z)-z*Sqr(r-aV);
    p2 := 2*r*ArcTan(z);
    t2 := ( ene / ( 15*Sqrt(S0) ) ) *Pot(P2/A2,2/3,erro);
    Vazao1 := (60*Sqrt(S0)*Pot(a2,5/3,erro)) / (ene * Pot(p2,2/3,erro));
    Aux := q0 - (0.5*f*( K * Pot(t2,a-1,erro) + Ci)*(P0 + P2)*(S-2) +
Vazao1);
    Vazao2 := Sqr(Aux);
End; {Vazao2}

```

```
{-----}
```

```

Function Tempo (t: Real): Real;
Var Tempo1, Aux3, Aux4, Aux5, Aux6, t11: Real;
Begin
    Aux3 := ArcTan( Sqrt(r*r-Sqr(r-h0))/(r-h0));

```

```

Aux4 := (K*Pot(t,a,erro) + Ci*t);
A1 := 2*R*Aux3*Aux4;
Aux5 := 1 - ( ( (A1 - Ai2) * Sqr(S) ) / ( 3*A1*Sqr(S-2) ) );
Aux6 := 1 - ( ( (A0 - A2) * Sqr(S) ) / ( 3*A0*Sqr(S-2) ) );
Via := A1*S*Aux5;
Vsa := A0*S*Aux6;
Vt := Vsa + Via;
Tempo1 := ((A0*S)/Q0)*Aux6 + ((A1*S)/Q0)*Aux5;
Tempo := Sqr(Tempo1 - t);
End; {Tempo}

```

```
{-----}
```

```

Function Vazao3 (aA: Real): Real;
Var Aux7, Aux8, Q0aux:Real;
Begin
  Aux7 := Arctan( Sqrt( Sqr(R) - Sqr(R-aA) )/(R-aA));
  Ae := Sqr(R)*Aux7-(R-aA)*Sqrt(Sqr(R) - Sqr(R-aA));
  Pe := 2*R*Aux7;
  Q0f := (60*Sqrt(S0)*Pot(Ae,5/3,erro))/(n*Pot(Pe,2/3,erro));
  Q0aux := 0.5*K*a*( Pot(te,a-1,erro) + Pot(te-Ta,a-1,erro) ) + Ci;
  Aux8 := q0 - (Q0Aux * 0.5*(P0 + Pe)*L + Q0f);
  Vazao3 := Sqr(Aux8);
End; {Vazao3}

```

```
{-----}
```

```

Function TempoRv (Tv: Real): Real;
Var Aux1: Real;
Begin
  P1Barra := 0.5*(0.5*P0 + Pe);
  Aux := Pot(Tv,a-1,erro) + Pot(Ts,a-1,erro) + Pot(Tv-Ts,a-1,erro);
  Aux := Aux + Pot(Ts-Ta,a-1,erro);
  I1Barra := 0.25*K*a*Aux + Ci;
  Aux1 := Tv - (Ts + (0.5*A0*L)/(Q0f + I1Barra*P1Barra*L));
  TempoRv := Sqr (Aux1);
End; {TempoRv}

```

```
{-----}
```

```
Procedure ExecutaCalculo;
```

```
begin
```

```

Repeat
  EsperaTecla(Tecla,'Deseja parada em cada tela exibida (S/N) ?',24,1);
  write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];
GotoXY(1,24);
ClrEol;
ParaTela := UpCase(Tecla) = 'S';

Repeat
  EsperaTecla(Tecla,'Deseja enviar os resultados para a impressora (S/N) ?',24,1);
  write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];
GotoXY(1,24);
ClrEol;

Imprime := UpCase(Tecla) = 'S';

If Imprime then
Repeat
  EsperaTecla(Tecla,'A impressora esta ligada e posicionada (S/N) ?',24,1);
  write(tecla);
Until Upcase(Tecla) In ['S','N'];

Imprime := UpCase(Tecla) = 'S';

ClrScr;
{Fase de Avanco}

ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE AVANCO *****',0);
ImprimeMens(Imprime,'=====
=====',2);

{ 1-Calculo da profundidade normal em funcao de Q0 (Yn0) }

Yn0 := (Q0*N)/(Cu*Pot(S0,0.5,erro));
Yn0 := Yn0*(Pot(M+1,5/3,erro))/C;
Yn0 := Pot(Yn0,(3/(3*M+5)),erro);

ImprimeMens(Imprime,'1-Calculo da profundidade normal em funcao de Q0 (Yn0)',0);

```



```
ImprimeVar(Imprime,'Yn0 = ',Yn0,15,10,1);
```

```
{ 2- Forma do sulco - parabolico }
```

```
ImprimeMens(Imprime,'2- Forma do sulco - parabolico',0);
```

```
y := 0;
```

```
Af := 0;
```

```
Pf := 0;
```

```
B := C*Pot(y,M,erro);
```

```
Imprime2Var(Imprime,'y = ', B = ',y,B,15,10,15,10,0);
```

```
Repeat
```

```
  yant := y;
```

```
  Bant := B;
```

```
  y := y + IncrFase2;
```

```
  B := C*Pot(y,M,erro);
```

```
  Af := Af + 0.5*( (Bant + B)*(y - yant) );
```

```
  Pf := Pf + sqrt( Sqr(y - yant) + Sqr(B - Bant) );
```

```
  Imprime2Var(Imprime,'y = ', B = ',y,B,15,10,15,10,0);
```

```
Until (Abs ((Yn0-y)/max(1,abs(y))) < PrecisaoFase2) and (y >= Yn0);
```

```
{ 3- Calculo da area media da secao transversal do sulco (Af) }
```

```
ImprimeMens(Imprime,'3- Calculo da area media da secao transversal do  
sulco (Af)',0);
```

```
ImprimeVar(Imprime,'Af = ',Af,15,10,1);
```

```
{ 4- Calculo do perimetro medio da secao transversal do sulco (Pf) }
```

```
ImprimeMens(Imprime,'4- Calculo do perimetro medio da secao transversal  
do sulco (Pf)',0);
```

```
ImprimeVar(Imprime,'Pf = ',Pf,15,10,1);
```

```
{ 5- Calculo do raio de um sulco semi-circular equivalente (R) }
```

```
ImprimeMens(Imprime,'5- Calculo do raio de um sulco semi-circular  
equivalente (R)',0);
```

```
R := Pot(2 * Af,5/8,erro)/(Pot(PI,3/8,erro) * Pot(Pf,0.25,erro));
```

```
ImprimeVar(Imprime,'R = ',R,15,10,1);
```

```
{ 6- Calculo da profundidade inicial do escoamento na superficie do solo  
(h0)}
```

```

Q0Ant := Q0;
ene := N;

```

```

p := 0.001;
afi := 0.001;
bf := r - 0.00001;
u := 100/p;

```

```

{ Geracao da sequencia de Fibonacci }

```

```

ff[1] := 1;
ff[2] := 1;
i := 2;
While ff[i] <= u Do
Begin
  Inc (i);
  ff[i] := ff[i-1] + ff[i-2];
End;

```

```

nf := i;
d := ff[nf-2]*(bf-afi)/ff[nf];
ele := afi + d;
erre := bf - d;
cf := Vazao(afi);
h := Vazao (bf);
e := Vazao (ele);
g := Vazao (erre);
While nf <> 2 Do
Begin
  Dec (nf);
  WriteLn ('n = ',nf:3);
  WriteLn ('A':12,' ', 'L':12,' ', 'ERRE':12,' ', 'B':12);
  WriteLn (afi:10:10,' ',ele:10:10,' ',erre:10:10,' ',bf:10:10);
  WriteLn ('C':12,' ', 'E':12,' ', 'G':12,' ', 'H':12);
  WriteLn (cf:10:10,' ',e:10:10,' ',g:10:10,' ',h:10:10,' ');
  If nf <> 2 Then
  Begin
    sf := erre - afi;
    d := sf * ff[nf-2]/ff[nf];
    If e <= g Then
    Begin
      bf := erre;
      h := g;
      erre := ele;
    End;
  End;
End;

```

```

g := e;
If nf = 3 Then
  d := (1 - p)*d;
  ele := afi + d;
  e := Vazao (ele);
End
Else
Begin
  afi := ele;
  cf := e;
  ele := erre;
  e := g;
  If nf = 3 Then
    d := (1 - p)*d;
    erre := bf - d;
    g := Vazao (erre);
  End
End;
End;

```

```

h0 := ele;

```

```

if (h0 >= R) or (h0 <= 0) then

```

```

begin

```

```

  ImprimeMens(Imprime,' ',2);

```

```

  ImprimeMens(Imprime,'>>>> ERRO -> h0 FORA DOS LIMITES 0
< h0 <= R',0);

```

```

end

```

```

else

```

```

begin

```

```

  ImprimeMens(Imprime,'6- Calculo da profundidade inicial do escoamento
na superficie do solo (h0) ',0);

```

```

  ImprimeVar(Imprime,'h0 = ',h0,15,10,0);

```

```

  ImprimeVar(Imprime,'A0 (Area normal de entrada) = ',A0,15,10,0);

```

```

  ImprimeVar(Imprime,'P0 (Perimetro molhado na secao de entrada) =
',P0,15,10,1);

```

```

  ImprimeVar(Imprime,'Diferenca entre Q0 e Q0 dado = ',Abs(Q0Ant-
Q0),15,10,1);

```

```

  { 7- Calculo da profundidade de escoamento na superficie do solo na
secao x = S - 2 metros (h2) }

```



ImprimeMens(Imprime,'7- Calculo da profundidade de escoamento na
superficie do solo na secao $x = S - 2$ metros (h2)',0);

```

S:= 0;
Repeat
  S := S + IncrFase71; {inicio = 5}
  {acha h2 para cada variacao de S - S varia de 5 em 5 ate atingir L }

  Q0 := Q0Ant;
  ene := N;

  p := 0.001;
  afi := 0.001;
  bf:= r - 0.00001;
  u := 100/p;

  { Geracao da sequencia de Fibonacci }
  ff[1] := 1;
  ff[2] := 1;
  i := 2;
  While ff[i] <= u Do
  Begin
    Inc (i);
    ff[i] := ff[i-1] + ff[i-2];
  End;

  nf := i;
  d := ff[nf-2]*(bf-afi)/ff[nf];
  ele := afi + d;
  erre := bf - d;
  cf := Vazao2(afi);
  h := Vazao2(bf);
  e := Vazao2(ele);
  g := Vazao2(erre);
  While nf <> 2 Do
  Begin
    Dec (nf);
    Writeln('n = ',nf:3);
    Writeln('A':12,' ', 'L':12,' ', 'ERRE':12,' ', 'B':12);
    WriteLn (afi:10:10,' ',ele:10:10,' ',erre:10:10,' ',bf:10:10);
    WriteLn ('C':12,' ', 'E':12,' ', 'G':12,' ', 'H':12);
    WriteLn (cf:10:10,' ',e:10:10,' ',g:10:10,' ',h:10:10,' ');
    If nf <> 2 Then

```

```

Begin
  sf := erre - afi;
  d := sf * ff[nf-2]/ff[nf];
  If e <= g Then
  Begin
    bf := erre;
    h := g;
    erre := ele;
    g := e;
    If nf = 3 Then
      d := (1 - p)*d;
    ele := afi + d;
    e := Vazao2(ele);
  End
  Else
  Begin
    afi := ele;
    cf := e;
    ele := erre;
    e := g;
    If nf = 3 Then
      d := (1 - p)*d;
    erre := bf - d;
    g := Vazao2(erre);
  End
  End;
End;

h2 := ele;

Ai2 := P2*(K*Pot(t2,a,erro) + Ci*t2);

p := 0.001;
afi := 0.001;
bf := 100;
u := 100/p;

{ Geracao da sequencia de Fibonacci }
ff[1] := 1;
ff[2] := 1;
i := 2;
While ff[i] <= u Do
Begin

```

```

Inc (i);
ff[i] := ff[i-1] + ff[i-2];
End;

nf := i;
d := ff[nf-2]*(bf-afi)/ff[nf];
ele := afi + d;
erre := bf - d;
cf := Tempo(afi);
h := Tempo(bf);
e := Tempo(ele);
g := Tempo(erre);
While nf <> 2 Do
Begin
  Dec (nf);
  WriteLn ('n = ',nf:3);
  WriteLn ('A':12,' ', 'L':12,' ', 'ERRE':12,' ', 'B':12);
  WriteLn (afi:10:10,' ',ele:10:10,' ',erre:10:10,' ',bf:10:10);
  WriteLn ('C':12,' ', 'E':12,' ', 'G':12,' ', 'H':12);
  WriteLn (cf:10:10,' ',e:10:10,' ',g:10:10,' ',h:10:10,' ');
  If nf <> 2 Then
  Begin
    sf := erre - afi;
    d := sf * ff[nf-2]/ff[nf];
    If e <= g Then
    Begin
      bf := erre;
      h := g;
      erre := ele;
      g := e;
      If nf = 3 Then
        d := (1 - p)*d;
      ele := afi + d;
      e := Tempo(ele);
    End
  Else
  Begin
    afi := ele;
    cf := e;
    ele := erre;
    e := g;
    If nf = 3 Then
      d := (1 - p)*d;
  End
End

```

```

    erre := bf - d;
    g := Tempo(erre);
  End
End;
End;

t := ele;

Imprime2Var(Imprime,'S = ',' t = ',S,t,15,10,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente
avanco) = ',h2,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente
avanco) = ',A2,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente
avanco) = ',P2,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente
avanco) = ',t2,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'Diferenca entre Q0 e Q0 dado
= ',e,15,10,1);
ImprimeVar(Imprime,'Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente
avanco) = ',Ai2,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'A1 (Area infiltrada na extremidade a montante )
= ',A1,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2 )
= ',Via,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2 )
= ',Vsa,15,10,0);
ImprimeVar(Imprime,'Vt (Volume total de agua no tempo t2 )
= ',Vt,15,10,1);
Writeln('Digite qualquer tecla para continuar ...');
Readln;
until S >= L;

begin
ImprimeMens(Imprime,' ',2);
end;

{ 8- Fase de Armazenamento}

ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE ARMAZENAMENT
O *****',0);

```

```

ImprimeMens(Imprime,'=====
=====','2)
;

```

```

Ta := t;
if TS <= Ta then
begin
  ImprimeMens(Imprime,' ',2);
  ImprimeMens(Imprime,'Tempo de armazenamento MENOR que tempo
de avanco',2);
  Ae := A2;
  Pe := P2;
  QOf := (60*Sqrt(S0)*Pot(Ae,5/3,erro))/(n*Pot(Pe,2/3,erro));
end
else
begin
  te := TS;
  Repeat

    QO := QOAnt;
    ene := N;

    p := 0.001;
    afi := 0.001;
    bf := R - 0.00001;
    u := 100/p;

    { Geracao da sequencia de Fibonacci }
    ff[1] := 1;
    ff[2] := 1;
    i := 2;
    While ff[i] <= u Do
    Begin
      Inc (i);
      ff[i] := ff[i-1] + ff[i-2];
    End;

    nf := i;
    d := ff[nf-2]*(bf-afi)/ff[nf];
    ele := afi + d;
    erre := bf - d;
    cf := Vazao3(afi);
    h := Vazao3(bf);

```



```

e := Vazao3(ele);
g := Vazao3(erre);
While nf < > 2 Do
Begin
  Dec (nf);
  Writeln('n = ',nf:3);
  Writeln('A':12,' ', 'L':12,' ', 'ERRE':12,' ', 'B':12);
  WriteLn (afi:10:10,' ',ele:10:10,' ',erre:10:10,' ',bf:10:10);
  Writeln ('C':12,' ', 'E':12,' ', 'G':12,' ', 'H':12);
  WriteLn (cf:10:10,' ',e:10:10,' ',g:10:10,' ',h:10:10,' ');
  If nf < > 2 Then
  Begin
    sf := erre - afi;
    d := sf * ff[nf-2]/ff[nf];
    If e <= g Then
    Begin
      bf := erre;
      h := g;
      erre := ele;
      g := e;
      If nf = 3 Then
        d := (1 - p)*d;
      ele := afi + d;
      e := Vazao3(ele);
    End
  Else
  Begin
    afi := ele;
    cf := e;
    ele := erre;
    e := g;
    If nf = 3 Then
      d := (1 - p)*d;
    erre := bf - d;
    g := Vazao3(erre);
  End
End;
End;
he := ele;
Imprime2Var(Imprime,'te = ',' he = ',te,he,15,10,15,10,0);
if (he >= R) or (he <= 0) then
begin
  ImprimeMens(Imprime,' ',2);

```

```

    ImprimeMens(Imprime,'>>>> ERRO -> he FORA DOS LIMITES
0 < he <= R',0);
end
else
    if (te > Ts) or (te < Ta) then
        begin
            ImprimeMens(Imprime,' ',2);
            ImprimeMens(Imprime,'>>>> ERRO -> te FORA DOS
LIMITES Ta <= te <= Ts',0);
        end
    else
        begin
            ImprimeVar(Imprime,'QOf (taxa escoamento superficial na
extremidade a jusante) = ',QOf,15,10,0);
            ImprimeVar(Imprime,'Ta (Tempo total de avanço)
= ',Ta,15,10,0);
            ImprimeVar(Imprime,'Ts (Tempo total de entrada)
= ',Ts,15,10,0);
            ImprimeVar(Imprime,'Ae (Area de escoamento na superficie, na
extrem. a jusante) = ',Ae,15,10,0);
            ImprimeVar(Imprime,'Pe (Perimetro molhado na extremidade a
jusante) = ',Pe,15,10,0);
            ImprimeVar(Imprime,'Diferença entre Q0 e Q0 dado =
',e,15,10,1);
            Writeln('Digite qualquer tecla para continuar ...');
            Readln;
        end;
        te := te + IncrteFase8;
        If Abs(te - Ts) < IncrTeFase8 Then
            te := Ts;
        Until te > Ts;
    end;

```

{ 9- Fase de recessão vertical }

```

    ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE RECESSAO VE
RTICAL *****',0);

```

```

ImprimeMens(Imprime,'=====
=====
===== ',2);

```

```

Q0 := Q0Ant;

```

```

ene := N;

p := 0.001;
afi := Ts;
bf := 15000;
u := 100/p;

{ Geracao da sequencia de Fibonacci }
ff[1] := 1;
ff[2] := 1;
i := 2;
While ff[i] <= u Do
Begin
  Inc (i);
  ff[i] := ff[i-1] + ff[i-2];
End;

nf := i;
d := ff[nf-2]*(bf-afi)/ff[nf];
ele := afi + d;
erre := bf - d;
cf := TempoRv (afi);
h := TempoRv (bf);
e := TempoRv (ele);
g := TempoRv (erre);
While nf <> 2 Do
Begin
  Dec (nf);
  WriteLn ('n = ',nf:3);
  WriteLn ('A':12,' ', 'L':12,' ', 'ERRE':12,' ', 'B':12);
  WriteLn (afi:10:10,' ',ele:10:10,' ',erre:10:10,' ',bf:10:10);
  WriteLn ('C':12,' ', 'E':12,' ', 'G':12,' ', 'H':12);
  WriteLn (cf:10:10,' ',e:10:10,' ',g:10:10,' ',h:10:10,' ');
  If nf <> 2 Then
  Begin
    sf := erre - afi;
    d := sf * ff[nf-2]/ff[nf];
    If e <= g Then
    Begin
      bf := erre;
      h := g;
      erre := ele;
      g := e;
    End;
  End;
End;

```

```

If nf = 3 Then
  d := (1 - p)*d;
  ele := afi + d;
  e := TempoRv (ele);
End
Else
Begin
  afi := ele;
  cf := e;
  ele := erre;
  e := g;
  If nf = 3 Then
    d := (1 - p)*d;
    erre := bf - d;
    g := TempoRv (erre);
  End
End;
End;

```

```
Tv := ele;
```

```

ImprimeVar(Imprime,'P1 = ',P1Barra,15,10,1);
ImprimeVar(Imprime,'I1 = ',I1Barra,15,10,1);
ImprimeVar(Imprime,'Tv = ',Tv,15,10,2);

```

```
{ 10- Fase de Recessao Horizontal}
```

```

ImprimeMens(Imprime,'***** FASE DE RECESSAO HO
RIZONTAL *****',0);

```

```

ImprimeMens(Imprime,'=====
=====
=====',2);

```

```

tr := Tv;
xr := 0;
ht := (he/L)*(L-xr);
Aux := Arctan( Sqr(R) - Sqr(R-ht) )/(R-ht);
At := Sqr(R)*Aux - (R-ht)*Sqr(Sqr(R) - Sqr(R-ht));
Pt := 2*R*Aux;
Vtr := 0.5*At*(L-xr);
Qt := (60*Sqr(S0)*Pot(At,5/3,erro))/(n*Pot(Pt,2/3,erro));
Ibarra := 0.5*K*a*( Pot(Tv,a-1,erro) + Pot(tr-Ta,a-1,erro) ) + Ci;

```

```

Vtv := 0.5*Ae*L;

for i:= 1 to Trunc(L/IncrFase10) Do
begin
  VTrAnt := Vtr;
  xr := xr + IncrFase10;
  If xr = L Then
    xr := xr - 0.0001;
  ht := (he/L)*(L-xr);
  Aux := Arctan( Sqrt( Sqr(R) - Sqr(R-ht) )/(R-ht));
  At := Sqr(R)*Aux - (R-ht)*Sqrt(Sqr(R)-Sqr(R-ht));
  Pt := 2*R*Aux;
  Vtr := 0.5*At*(L-xr);
  Qt := (60*Sqrt(S0)*Pot(At,5/3,erro))/(n*Pot(Pt,2/3,erro));
  Ibarra := 0.5*K*a*( Pot(Tv,a-1,erro) + Pot(tr-Ta,a-1,erro) ) + Ci;
  Vtv := 0.5*Ae*L;
  Dt := (VtrAnt - Vtr)/(Qt + 0.5*Pt*Ibarra*(L-xr));
  tr := tr + Dt;

  Imprime2Var(Imprime,'Tr = ', xr = ',tr,xr,15,10,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'ht (Profundidade de escoamento na
extremidade a jusante, em tr ) = ',ht,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'At (Area de escoamento na extremidade a
jusante, no tempo tr ) = ',At,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'Pt (Perimetro molhado na extremidade a
jusante, no tempo tr ) = ',Pt,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'V(tr) (Volume de agua remanescente na
superficie, no tempo tr) = ',VtrAnt,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'V(tr + Dt)
= ',Vtr,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr
= ',Qt,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao
= ',Ibarra,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do
tr = ',Vtv,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'Dt (Incremento de tempo )
= ',IncrFase10,15,10,0);
  ImprimeVar(Imprime,'i (Numero de incrementos de tempo calculados)
= ',i,15,10,1);
  end;
End;
ImprimeMens(Imprime,' ',2);

```


APÊNDICE 7

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - MODELO DE YU E SINGH (1990)

***** FASE DE AVANCO *****

1-Calculo da profundidade normal em funcao de Q0 (Yn0)

Yn0 = 0.0428408216

2- Forma do sulco - parabolico

y = 0.000000000	B = 0.000000000
y = 0.001000000	B = 0.0443851481
y = 0.002000000	B = 0.0647363943
y = 0.003000000	B = 0.0807291160
y = 0.004000000	B = 0.0944189875
y = 0.005000000	B = 0.1066170940
y = 0.006000000	B = 0.1177446083
y = 0.007000000	B = 0.1280541201
y = 0.008000000	B = 0.1377114881
y = 0.009000000	B = 0.1468326781
y = 0.010000000	B = 0.1555026067
y = 0.011000000	B = 0.1637857035
y = 0.012000000	B = 0.1717322508
y = 0.013000000	B = 0.1793823994
y = 0.014000000	B = 0.1867688260
y = 0.015000000	B = 0.1939185540
y = 0.016000000	B = 0.2008542400
y = 0.017000000	B = 0.2075951061
y = 0.018000000	B = 0.2141576302
y = 0.019000000	B = 0.2205560672
y = 0.020000000	B = 0.2268028492
y = 0.021000000	B = 0.2329088974
y = 0.022000000	B = 0.2388838684
y = 0.023000000	B = 0.2447363509
y = 0.024000000	B = 0.2504740249
y = 0.025000000	B = 0.2561037916
y = 0.026000000	B = 0.2616318797
y = 0.027000000	B = 0.2670639346
y = 0.028000000	B = 0.2724050921
y = 0.029000000	B = 0.2776600409
y = 0.030000000	B = 0.2828330759
y = 0.031000000	B = 0.2879281427
y = 0.032000000	B = 0.2929488765
y = 0.033000000	B = 0.2978986354
y = 0.034000000	B = 0.3027805293
y = 0.035000000	B = 0.3075974449
y = 0.036000000	B = 0.3123520677
y = 0.037000000	B = 0.3170469008
y = 0.038000000	B = 0.3216842826
y = 0.039000000	B = 0.3262664008
y = 0.040000000	B = 0.3307953064
y = 0.041000000	B = 0.3352729251
y = 0.042000000	B = 0.3397010679
y = 0.043000000	B = 0.3440814404

3- Calculo da area media da secao transversal do sulco (Af)

$$Af = 0.0095713001$$

4- Calculo do perimetro medio da secao transversal do sulco (Pf)

$$Pf = 0.3474412660$$

5- Calculo do raio de um sulco semi-circular equivalente (R)

$$R = 0.0715482522$$

6- Calculo da profundidade inicial do escoamento na superficie do solo (h0)

$$h0 = 0.0715376712$$

$$A0 \text{ (Area normal de entrada)} = 0.0080396318$$

$$P0 \text{ (Perimetro molhado na secao de entrada)} = 0.2247543026$$

$$\text{Diferenca entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000000$$

7- Calculo da profundidade de escoamento na superficie do solo na secao $x = S - 2$ metros (h2)

$$S = 5.0000000000 \quad t = 1.1649763990$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0715144276$$

$$A2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0080363056$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2247078144$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9305965758$$

$$\text{Diferenca entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000002$$

$$Ai2 \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154223$$

$$A1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0000187830$$

$$Via \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t2) = 0.0000783561$$

$$Vsa \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t2) = 0.0401827599$$

$$Vt \text{ (Volume total de agua no tempo } t2) = 0.0402611161$$

$$S = 10.0000000000 \quad t = 2.3322478479$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0714789822$$

$$A2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0080312335$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2246369234$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9307925304$$

$$\text{Diferenca entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000147$$

$$Ai2 \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154203$$

$$A1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0000345186$$

$$Via \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t2) = 0.0002457157$$

$$Vsa \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t2) = 0.0803525765$$

$$Vt \text{ (Volume total de agua no tempo } t2) = 0.0805982922$$

$$S = 15.0000000000 \quad t = 3.5019897605$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0714435373$$

$$A2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0080261615$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2245660347$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9309887052$$

$$\text{Diferenca entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000841$$

$$Ai2 \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154182$$

$$A1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0000492977$$

$$Via \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t2) = 0.0005139362$$

$$Vsa \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t2) = 0.1205048076$$

$$Vt \text{ (Volume total de agua no tempo } t2) = 0.1210187438$$

$$S = 20.0000000000 \quad t = 4.6733800219$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0714086729$$

$$A2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0080211726$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2244963058$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9311818918$$

$$\text{Diferenca entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000066$$

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000154163
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0000634879
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0008741067
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 0.1606407075
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 0.1615148142

S = 25.0000000000 t = 5.8472423945
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0713732274
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0080161004
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2244254147
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9313785236
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000011

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000154142
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0000772701
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0013227432
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 0.2007591135
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 0.2020818567

S = 30.0000000000 t = 7.0227514684
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0713377813
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0080110282
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2243545211
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9315753893
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000001130

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000154122
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0000907316
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0018573117
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 0.2408605951
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 0.2427179069

S = 35.0000000000 t = 8.2007310059
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0713023364
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0080059562
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2242836321
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9317724698
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000138

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000154102
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0001039441
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0024761554
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 0.2809451653
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 0.2834213207

S = 40.0000000000 t = 9.3803588922
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0712668909
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0080008841
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2242127407
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9319697847
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000232

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000154082
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0001169419
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0031776403
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 0.3210128217
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 0.3241904619

S = 45.0000000000 t = 10.5624580660
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0712320265
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0079958952
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2241430113

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9321640877$$

$$\text{Diferença entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000001379$$

$$Ai2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154062$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0001297658$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t2 \text{)} = 0.0039607844$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t2 \text{)} = 0.3610649339$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t2 \text{)} = 0.3650257182$$

$$S = 50.0000000000 \quad t = 11.7453818260$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0711965810$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0079908231$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2240721195$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9323618557$$

$$\text{Diferença entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000055$$

$$Ai2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154042$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0001424223$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t2 \text{)} = 0.0048240572$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t2 \text{)} = 0.4010989089$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t2 \text{)} = 0.4059229661$$

$$S = 55.0000000000 \quad t = 12.9307752259$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0711611350$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0079857509$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2240012253$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9325598590$$

$$\text{Diferença entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000172$$

$$Ai2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154022$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0001549482$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t2 \text{)} = 0.0057670839$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t2 \text{)} = 0.4411159725$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t2 \text{)} = 0.4468830563$$

$$S = 60.0000000000 \quad t = 14.1178177984$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0711256901$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0079806790$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2239303355$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9327580782$$

$$\text{Diferença entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000391$$

$$Ai2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000154002$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0001673504$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t2 \text{)} = 0.0067888186$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t2 \text{)} = 0.4811161350$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t2 \text{)} = 0.4879049536$$

$$S = 65.0000000000 \quad t = 15.3065070721$$

$$h2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0710908257$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0079756902$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2238606054$$

$$t2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9329532781$$

$$\text{Diferença entre } Q0 \text{ e } Q0 \text{ dado} = 0.0000000076$$

$$Ai2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000153982$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0001796413$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t2 \text{)} = 0.0078885574$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t2 \text{)} = 0.5211013047$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t2 \text{)} = 0.5289898621$$

$$\begin{aligned}
 S &= 70.0000000000 \quad t = 16.4968438707 \\
 h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0710553796 \\
 A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079706180 \\
 P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2237897105 \\
 t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9331519655 \\
 \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000054
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153962 \\
 A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0001918319 \\
 V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0090656715 \\
 V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.5610677837 \\
 V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.5701334552
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= 75.0000000000 \quad t = 17.6888273706 \\
 h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0710199341 \\
 A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079655460 \\
 P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2237188178 \\
 t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9333508761 \\
 \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000001028
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153942 \\
 A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002039309 \\
 V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0103195961 \\
 V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6010173599 \\
 V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6113369560
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= 80.0000000000 \quad t = 18.8832838055 \\
 h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0709850697 \\
 A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079605572 \\
 P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2236490869 \\
 t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9335467504 \\
 \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000113
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153923 \\
 A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002159547 \\
 V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0116502525 \\
 V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6409523619 \\
 V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6526026145
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= 85.0000000000 \quad t = 20.0785631791 \\
 h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0709496242 \\
 A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079554852 \\
 P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2235781936 \\
 t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9337461177 \\
 \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000749
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153903 \\
 A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002278931 \\
 V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0130563376 \\
 V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6808682636 \\
 V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.6939246012
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= 90.0000000000 \quad t = 21.2763130164 \\
 h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0709147598 \\
 A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079504964 \\
 P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2235084622 \\
 t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9339424416 \\
 \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000012
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153883 \\
 A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002397685 \\
 V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0145383098 \\
 V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.7207698682
 \end{aligned}$$

$$Vt \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} = 0.7353081780$$

$$S = 95.0000000000 \quad t = 22.4757112025$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0708793149 \\ A_2 \text{ (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079454247 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.2234375706 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. médio secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.9341422600 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000001443 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153863 \\ A_1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002515779 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0160953494 \\ V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.7606521017 \\ V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.7767474511 \end{aligned}$$

$$S = 100.0000000000 \quad t = 23.6759339748$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0708438689 \\ A_2 \text{ (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079403526 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.2233666741 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. médio secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.9343423226 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000115 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153843 \\ A_1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002633179 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0177265736 \\ V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.8005174185 \\ V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.8182439921 \end{aligned}$$

$$S = 105.0000000000 \quad t = 24.8786263870$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0708090050 \\ A_2 \text{ (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079353641 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.2232969440 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. médio secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.9345393181 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000120 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153824 \\ A_1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002750087 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0194326736 \\ V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.8403688656 \\ V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.8598015392 \end{aligned}$$

$$S = 110.0000000000 \quad t = 26.0821433855$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0707735590 \\ A_2 \text{ (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079302920 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.2232260468 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. médio secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.9347398399 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000001619 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153804 \\ A_1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002866379 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0212122709 \\ V_{sa} \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 0.8802005094 \\ V_t \text{ (Volume total de água no tempo } t_2 \text{)} &= 0.9014127803 \end{aligned}$$

$$S = 115.0000000000 \quad t = 27.2881324953$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0707386951 \\ A_2 \text{ (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0079253035 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.2231563160 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. médio secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.9349372877 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000399 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153784 \\ A_1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0002982247 \end{aligned}$$

Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.0230662016
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 0.9200185618
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 0.9430847634

S = 120.0000000000 t = 28.4957683062
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0707032491
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço) = 0.0079202316
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço) = 0.2230854180
 t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço) = 0.9351382697
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000107

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0000153764
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003097643
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.0249936475
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 0.9598165334
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 0.9848101809

S = 125.0000000000 t = 29.7050508184
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0706683847
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço) = 0.0079152430
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço) = 0.2230156841
 t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço) = 0.9353361773
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000001014

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0000153745
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003212593
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.0269943637
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 0.9996011848
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 1.0265955486

S = 130.0000000000 t = 30.9151579168
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0706329398
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço) = 0.0079101714
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço) = 0.2229447899
 t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço) = 0.9355376075
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000218

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0000153725
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003327045
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.0290674561
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 1.0393654997
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 1.0684329558

S = 135.0000000000 t = 32.1277371264
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0705980754
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço) = 0.0079051829
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço) = 0.2228750551
 t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço) = 0.9357359693
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000122

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0000153705
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003441179
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.0312140151
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 1.0791167579
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 1.1103307731

S = 140.0000000000 t = 33.3411384511
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço) = 0.0705626299
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço) = 0.0079001112
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço) = 0.2228041577
 t2 (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço) = 0.9359378684
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000860

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153686
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003554859
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.0334324833
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 1.1188473958
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 1.1522798790

$S = 145.0000000000$ $t = 34.5570118870$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0705277655
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0078951227
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2227344220
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9361366855
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000008

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153666
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003668260
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.0357240724
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 1.1585652614
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 1.1942893338

$S = 150.0000000000$ $t = 35.7737090854$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0704923194
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0078900510
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2226635213
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9363390547
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000837

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153646
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003781246
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.0380871618
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 1.1982622218
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 1.2363493835

$S = 155.0000000000$ $t = 36.9928783950$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0704574556
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0078850627
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2225937869
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9365383214
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000141

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153627
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0003893988
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.0405230734
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 1.2379467044
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 1.2784697778

$S = 160.0000000000$ $t = 38.2128698195$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0704220095
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0078799910
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2225228851
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9367411551
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000093

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153607
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0004006347
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.0430301147
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 1.2776099962
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 1.3206401109

$S = 165.0000000000$ $t = 39.4345104166$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0703871451
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0078750027
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2224531474
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9369408859

Diferença entre Q0 e Q0 dado	=	0.0000001481
Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0000153588
A1 (Area infiltrada na extremidade a montante)	=	0.0004118417
Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2)	=	0.0456089016
Vsa (Volume de água superficial no tempo t2)	=	1.3172610795
Vt (Volume total de água no tempo t2)	=	1.3628699812
S = 170.0000000000	t =	40.6586206536
h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0703516996
A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço)	=	0.0078699313
P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.2223822468
t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço)	=	0.9371441784
Diferença entre Q0 e Q0 dado	=	0.0000001030
Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0000153568
A1 (Area infiltrada na extremidade a montante)	=	0.0004230284
Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2)	=	0.0482601274
Vsa (Volume de água superficial no tempo t2)	=	1.3568907132
Vt (Volume total de água no tempo t2)	=	1.4051508407
S = 175.0000000000	t =	41.8835554768
h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0703168352
A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço)	=	0.0078649430
P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.2223125080
t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço)	=	0.9373443676
Diferença entre Q0 e Q0 dado	=	0.0000000232
Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0000153548
A1 (Area infiltrada na extremidade a montante)	=	0.0004341811
Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2)	=	0.0509820099
Vsa (Volume de água superficial no tempo t2)	=	1.3965084071
Vt (Volume total de água no tempo t2)	=	1.4474904171
S = 180.0000000000	t =	43.1101378252
h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0702819708
A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço)	=	0.0078599548
P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.2222427685
t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço)	=	0.9375447845
Diferença entre Q0 e Q0 dado	=	0.0000000023
Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0000153529
A1 (Area infiltrada na extremidade a montante)	=	0.0004453087
Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2)	=	0.0537752429
Vsa (Volume de água superficial no tempo t2)	=	1.4361094759
Vt (Volume total de água no tempo t2)	=	1.4898847189
S = 185.0000000000	t =	44.3383685220
h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0702465259
A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço)	=	0.0078548837
P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.2221718685
t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço)	=	0.9377487688
Diferença entre Q0 e Q0 dado	=	0.0000000264
Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0000153509
A1 (Area infiltrada na extremidade a montante)	=	0.0004564121
Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2)	=	0.0566397112
Vsa (Volume de água superficial no tempo t2)	=	1.4756886911
Vt (Volume total de água no tempo t2)	=	1.5323284023
S = 190.0000000000	t =	45.5682459203
h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço)	=	0.0702116615

A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078498955
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2221021278
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9379496457
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000399

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153490
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0004674925
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0595753069
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.5152563725
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.5748316794

S = 195.0000000000 t = 46.7997708434
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0701767965
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078449073
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2220323841
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9381507578
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000965

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153471
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0004785508
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0625819280
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.5548074187
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.6173893466

S = 200.0000000000 t = 48.0321187053
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0701413516
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078398363
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2219614821
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9383554428
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000184

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153451
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0004895807
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0656585029
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.5943362083
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.6599947112

S = 205.0000000000 t = 49.2669395023
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0701064872
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078348483
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2218917395
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9385570098
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000183

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153432
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005005977
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0688068732
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.6338538797
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.7026607529

S = 210.0000000000 t = 50.5025832379
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0700716228
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078298604
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2218219962
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9387588061
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000946

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153412
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005115881
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0720249817
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.6733549279
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.7453799097

S = 215.0000000000 t = 51.7406982611
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0700361767
 A2 (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078247892
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2217510874
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9389642077
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000924

Ai2 (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153393
 A1 (Área infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005225672
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0753147557
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.7128332710
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.7881480267

S = 220.0000000000 t = 52.9796362228
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0700013129
 A2 (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078198015
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2216813450
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9391664604
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000012

Ai2 (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153373
 A1 (Área infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005335213
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0786740729
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.7523009475
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.8309750204

S = 225.0000000000 t = 54.2202233573
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0699664485
 A2 (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078148137
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2216115995
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9393689499
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000205

Ai2 (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153354
 A1 (Área infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005444583
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0821038815
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.7917519897
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.8738558712

S = 230.0000000000 t = 55.4624571928
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0699315841
 A2 (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078098260
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2215418533
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9395716698
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000536

Ai2 (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153335
 A1 (Área infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005553789
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0856041092
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.8311864101
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 1.9167905193

S = 235.0000000000 t = 56.7063377295
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0698961380
 A2 (Área esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0078047550
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2214709415
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9397780115
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000013

Ai2 (Área infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000153315
 A1 (Área infiltrada na extremidade a montante) = 0.0005662839
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.0891746916
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 1.8705975719

$$V_t \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} = 1.9597722636$$

$$S = 240.0000000000 \quad t = 57.9518674388$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0698612742 \\ A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0077997676 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2214011960 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9399811900 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000046 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153296 \\ A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0005771738 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0928155828 \\ V_{sa} \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 1.9099986247 \\ V_t \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} &= 2.0028142074 \end{aligned}$$

$$S = 245.0000000000 \quad t = 59.1990430255$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0698264098 \\ A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0077947800 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2213314474 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9401846063 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000703 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153277 \\ A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0005880492 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.0965267170 \\ V_{sa} \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 1.9493830435 \\ V_t \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} &= 2.0459097605 \end{aligned}$$

$$S = 250.0000000000 \quad t = 60.4470440223$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0697915454 \\ A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0077897925 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2212616979 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9403882541 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000518 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153258 \\ A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0005989036 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.1003068701 \\ V_{sa} \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 1.9887508420 \\ V_t \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} &= 2.0890577121 \end{aligned}$$

$$S = 255.0000000000 \quad t = 61.6975154828$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0697566810 \\ A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0077848051 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2211919477 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9405921335 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000280 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153238 \\ A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0006097518 \\ V_{ia} \text{ (Volume total de agua infiltrada no tempo } t_2 \text{)} &= 0.1041583330 \\ V_{sa} \text{ (Volume de agua superficial no tempo } t_2 \text{)} &= 2.0281020206 \\ V_t \text{ (Volume total de agua no tempo } t_2 \text{)} &= 2.1322603536 \end{aligned}$$

$$S = 260.0000000000 \quad t = 62.9488107057$$

$$\begin{aligned} h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0697212349 \\ A_2 \text{ (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} &= 0.0077797344 \\ P_2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.2211210317 \\ t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.9407996556 \\ \text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} &= 0.0000000074 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{i2} \text{ (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} &= 0.0000153219 \\ A_1 \text{ (Area infiltrada na extremidade a montante)} &= 0.0006205800 \end{aligned}$$

Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.1080786749
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 2.0674292491
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 2.1755079240

S = 265.0000000000 t = 64.2017534537
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0696863711
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanco) = 0.0077747473
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanco) = 0.2210512820
 t2 (Tempo infilt. medio secao 2 m antes frente avanco) = 0.9410039962
 Diferenca entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000103

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0000153200
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006313959
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.1120690438
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 2.1067470653
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 2.2188161091

S = 270.0000000000 t = 65.4563437266
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0696515067
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanco) = 0.0077697600
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanco) = 0.2209815292
 t2 (Tempo infilt. medio secao 2 m antes frente avanco) = 0.9412085762
 Diferenca entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000344

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0000153181
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006422000
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.1161293993
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 2.1460482484
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 2.2621776476

S = 275.0000000000 t = 66.7125807006
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0696166423
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanco) = 0.0077647728
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanco) = 0.2209117754
 t2 (Tempo infilt. medio secao 2 m antes frente avanco) = 0.9414133889
 Diferenca entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000275

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0000153161
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006529927
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.1202597041
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 2.1853328132
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 2.3055925172

S = 280.0000000000 t = 67.9704660235
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0695817778
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanco) = 0.0077597857
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanco) = 0.2208420207
 t2 (Tempo infilt. medio secao 2 m antes frente avanco) = 0.9416184346
 Diferenca entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000016

Ai2 (Area infiltrada na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0000153142
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006637745
 Via (Volume total de agua infiltrada no tempo t2) = 0.1244599314
 Vsa (Volume de agua superficial no tempo t2) = 2.2246007602
 Vt (Volume total de agua no tempo t2) = 2.3490606916

S = 285.0000000000 t = 69.2299996952
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanco) = 0.0695469129
 A2 (Area esc. na secao 2 m antes da frente avanco) = 0.0077547985
 P2 (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanco) = 0.2207722627
 t2 (Tempo infilt. medio secao 2 m antes frente avanco) = 0.9418237205
 Diferenca entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000372

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153123
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006745458
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.1287300520
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 2.2638520738
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 2.3925821258

$S = 290.0000000000$ $t = 70.4903563055$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0695120485
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0077498115
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2207025061
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9420292331
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000642

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153104
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006853000
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.1330686858
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 2.3030867864
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 2.4361554722

$S = 295.0000000000$ $t = 71.7531842031$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0694771840
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0077448246
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2206327486
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9422349795
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000373

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153085
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0006960515
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.1374784867
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 2.3423048825
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 2.4797833692

$S = 300.0000000000$ $t = 73.0168350398$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0694417391
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0077397548
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2205618297
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9424443881
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000428

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153066
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0007067866
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.1419567104
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 2.3814979562
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 2.5234546666

$S = 305.0000000000$ $t = 74.2821342251$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0694068747
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0077347680
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2204920701
 t_2 (Tempo infiltr. medio secção 2 m antes frente avanço) = 0.9426506070
 Diferença entre Q_0 e Q_0 dado = 0.0000000085

A_{i2} (Area infiltrada na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0000153047
 A_1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0007175129
 V_{ia} (Volume total de água infiltrada no tempo t_2) = 0.1465046970
 V_{sa} (Volume de água superficial no tempo t_2) = 2.4206826827
 V_t (Volume total de água no tempo t_2) = 2.5671873798

$S = 310.0000000000$ $t = 75.5490817593$
 h_2 (Prof. esc. sup. solo na secção 2 m antes frente avanço) = 0.0693720097
 A_2 (Area esc. na secção 2 m antes da frente avanço) = 0.0077297811
 P_2 (Perim. molhado na secção 2 m antes frente avanço) = 0.2204223072

$$t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9428570673$$

$$\text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} = 0.0000000079$$

$$Ai_2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000153028$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0007282306$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2) = 0.1511224261$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2) = 2.4598507769$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t_2) = 2.6109732031$$

$$S = 315.0000000000 \quad t = 76.8176759945$$

$$h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0693371453$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0077247945$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2203525456$$

$$t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9430637557$$

$$\text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} = 0.0000000380$$

$$Ai_2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000153009$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0007389400$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2) = 0.1558098766$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2) = 2.4990022737$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t_2) = 2.6548121503$$

$$S = 320.0000000000 \quad t = 78.0870931684$$

$$h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0693022809$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0077198079$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2202827829$$

$$t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9432706793$$

$$\text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} = 0.0000001368$$

$$Ai_2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000152989$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0007496346$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2) = 0.1605655653$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2) = 2.5381371565$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t_2) = 2.6987027218$$

$$S = 325.0000000000 \quad t = 79.3589824537$$

$$h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0692674165$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0077148215$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2202130192$$

$$t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9434778385$$

$$\text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} = 0.0000000016$$

$$Ai_2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000152970$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0007603285$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2) = 0.1653924058$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2) = 2.5772554258$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t_2) = 2.7426478316$$

$$S = 330.0000000000 \quad t = 80.6316955013$$

$$h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0692325521$$

$$A2 \text{ (Área esc. na secao 2 m antes da frente avanço)} = 0.0077098351$$

$$P2 \text{ (Perim. molhado na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.2201432544$$

$$t_2 \text{ (Tempo infiltr. medio secao 2 m antes frente avanço)} = 0.9436852333$$

$$\text{Diferença entre } Q_0 \text{ e } Q_0 \text{ dado} = 0.0000001439$$

$$Ai_2 \text{ (Área infiltrada na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0000152951$$

$$A1 \text{ (Área infiltrada na extremidade a montante)} = 0.0007710082$$

$$Via \text{ (Volume total de água infiltrada no tempo } t_2) = 0.1702874261$$

$$Vsa \text{ (Volume de água superficial no tempo } t_2) = 2.6163570821$$

$$Vt \text{ (Volume total de água no tempo } t_2) = 2.7866445082$$

$$S = 335.0000000000 \quad t = 81.9068806603$$

$$h_2 \text{ (Prof. esc. sup. solo na secao 2 m antes frente avanço)} = 0.0691976877$$

A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0077048487
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2200734885
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9438928642
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000306

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000152933
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0007816879
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.1752536215
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 2.6554421260
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 2.8306957474

S = 340.0000000000 t = 83.1828879343
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0691628233
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0076998625
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2200037214
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9441007314
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000037

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000152914
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0007923539
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.1802879367
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 2.6945105579
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 2.8747984946

S = 345.0000000000 t = 84.4605443807
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0691279589
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0076948763
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2199339532
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9443088352
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000039

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000152895
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0008030135
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.1853918899
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 2.7335623784
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 2.9189542683

S = 350.0000000000 t = 85.7398475283
 h2 (Prof. esc. sup. solo na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0690930951
 A2 (Area esc. na secão 2 m antes da frente avanço) = 0.0076898904
 P2 (Perim. molhado na secão 2 m antes frente avanço) = 0.2198641862
 t2 (Tempo infiltr. medio secão 2 m antes frente avanço) = 0.9445171689
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000307

Ai2 (Area infiltrada na secão 2 m antes frente avanço) = 0.0000152876
 A1 (Area infiltrada na extremidade a montante) = 0.0008136669
 Via (Volume total de água infiltrada no tempo t2) = 0.1905654691
 Vsa (Volume de água superficial no tempo t2) = 2.7725976078
 Vt (Volume total de água no tempo t2) = 2.9631630769

***** FASE DE ARMAZENAMENTO *****

te = 696.0000000000 he = 0.0687891936
 Qof (taxa escoamento superficial na extremidade a jusante) = 0.0323199088
 Ta (Tempo total de avanço) = 85.7398475283
 Ts (Tempo total de entrada) = 696.0000000000
 Ae (Area de escoamento na superfície, na extrem. a jusante) = 0.0076464321
 Pe (Perimetro molhado na extremidade a jusante) = 0.2192559790
 Diferença entre Q0 e Q0 dado = 0.0000000000

***** FASE DE RECESSAO VERTICAL *****

PI = 0.1658165652
 II = 0.0000316401
 Tv = 737.2412577327

***** FASE DE RECESSAO HORIZONTAL *****

Tr = 738.5710489433 xr = 5.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0678064909
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0075059570
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2172885254
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 1.3381256023
 V(tr + Dt) = 1.2947775785
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0315252558
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000286098
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 1.0000000000

Tr = 739.9123330759 xr = 10.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0668237881
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0073655831
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2153196553
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 1.2947775785
 V(tr + Dt) = 1.2521491254
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0307347110
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000286062
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 2.0000000000

Tr = 741.2653911579 xr = 15.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0658410853
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0072253370
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2133489906
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 1.2521491254
 V(tr + Dt) = 1.2102439516
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0299485741
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000286025
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 3.0000000000

Tr = 742.6305164639 xr = 20.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0648583826
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0070852455
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2113761517
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 1.2102439516
 V(tr + Dt) = 1.1690655107
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0291671421
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285989
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 4.0000000000

Tr = 744.0080151679 xr = 25.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0638756798
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0069453354
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2094007549
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 1.1690655107

$V(tr + Dt) = 1.1286170038$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0283907091
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285952
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 5.0000000000

$Tr = 745.3982070461$ $xr = 30.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0628929770
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0068056336
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2074224122
 $V(tr)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 1.1286170038
 $V(tr + Dt) = 1.0889013800$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0276195661
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285915
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 6.0000000000

$Tr = 746.8014262356$ $xr = 35.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0619102743
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0066661672
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2054407305
 $V(tr)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 1.0889013800
 $V(tr + Dt) = 1.0499213382$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0268540011
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285877
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 7.0000000000

$Tr = 748.2180220457$ $xr = 40.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0609275715
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0065269634
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2034553106
 $V(tr)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 1.0499213382
 $V(tr + Dt) = 1.0116793281$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0260942993
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285839
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 8.0000000000

$Tr = 749.6483598417$ $xr = 45.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0599448687
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0063880495
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.2014657468
 $V(tr)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 1.0116793281
 $V(tr + Dt) = 0.9741775508$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0253407427
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285801
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 9.0000000000

$Tr = 751.0928219967$ $xr = 50.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0589621660
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0062494531
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1994716259
 $V(tr)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.9741775508
 $V(tr + Dt) = 0.9374179598$
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0245936108
 I (Taxa de infiltração para a fase de recesso) = 0.0000285763
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169

$$\begin{aligned} Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 10.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tr &= 752.5518089151 \quad xr = 55.0000000000 \\ ht \text{ (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0579794632 \\ At \text{ (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0061112018 \\ Pt \text{ (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.1974725264 \\ V(tr) \text{ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.9374179598 \\ V(tr + Dt) &= 0.9014022614 \\ Qt \text{ (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0238531797 \\ I \text{ (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000285725 \\ Vtv \text{ (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 11.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tr &= 754.0257401513 \quad xr = 60.0000000000 \\ ht \text{ (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0569967604 \\ At \text{ (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0059733235 \\ Pt \text{ (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.1954680175 \\ V(tr) \text{ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.9014022614 \\ V(tr + Dt) &= 0.8661319147 \\ Qt \text{ (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0231197228 \\ I \text{ (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000285686 \\ Vtv \text{ (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 12.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tr &= 755.5150556127 \quad xr = 65.0000000000 \\ ht \text{ (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0560140577 \\ At \text{ (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0058358465 \\ Pt \text{ (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.1934576584 \\ V(tr) \text{ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.8661319147 \\ V(tr + Dt) &= 0.8316081325 \\ Qt \text{ (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0223935107 \\ I \text{ (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000285647 \\ Vtv \text{ (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 13.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tr &= 757.0202168683 \quad xr = 70.0000000000 \\ ht \text{ (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0550313549 \\ At \text{ (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0056987991 \\ Pt \text{ (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.1914409971 \\ V(tr) \text{ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.8316081325 \\ V(tr + Dt) &= 0.7978318803 \\ Qt \text{ (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0216748108 \\ I \text{ (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000285607 \\ Vtv \text{ (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 14.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tr &= 758.5417085718 \quad xr = 75.0000000000 \\ ht \text{ (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0540486521 \\ At \text{ (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0055622100 \\ Pt \text{ (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.1894175695 \\ V(tr) \text{ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.7978318803 \\ V(tr + Dt) &= 0.7648038768 \\ Qt \text{ (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0209638878 \\ I \text{ (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000285568 \\ Vtv \text{ (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ Dt \text{ (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ i \text{ (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 15.0000000000 \end{aligned}$$

$Tr = 760.0800400069$ $xr = 80.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0530659494
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0054261081
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1873868982
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.7648038768
 V(tr + Dt) = 0.7325245932
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0202610034
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285527
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 16.0000000000

$Tr = 761.6357467724$ $xr = 85.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0520832466
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0052905227
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1853484913
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.7325245932
 V(tr + Dt) = 0.7009942523
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0195664163
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285487
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 17.0000000000

$Tr = 763.2093926212$ $xr = 90.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0511005438
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0051554833
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1833018411
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.7009942523
 V(tr + Dt) = 0.6702128282
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0188803823
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285446
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 18.0000000000

$Tr = 764.8015714670$ $xr = 95.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0501178411
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0050210200
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1812464229
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.6702128282
 V(tr + Dt) = 0.6401800450
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0182031541
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285405
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 19.0000000000

$Tr = 766.4129095851$ $xr = 100.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0491351383
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0048871630
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1791816932
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.6401800450
 V(tr + Dt) = 0.6108953753
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0175349815
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285364
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 20.0000000000

$Tr = 768.0440680180$ $xr = 105.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0481524355
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0047539432

Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1771070883
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.6108953753
 V(tr + Dt) = 0.5823580394
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0168761112
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285322
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 21.0000000000

Tr = 769.6957452269 xr = 110.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0471697328
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0046213917
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1750220226
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.5823580394
 V(tr + Dt) = 0.5545670031
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0162267868
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285279
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 22.0000000000

Tr = 771.3686799984 xr = 115.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0461870300
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0044895402
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1729258866
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.5545670031
 V(tr + Dt) = 0.5275209757
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0155872487
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285237
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 23.0000000000

Tr = 773.0636546584 xr = 120.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0452043272
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0043584209
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1708180448
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.5275209757
 V(tr + Dt) = 0.5012184083
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0149577345
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285194
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 24.0000000000

Tr = 774.7814986147 xr = 125.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0442216245
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0042280666
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1686978335
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.5012184083
 V(tr + Dt) = 0.4756574913
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0143384781
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000285150
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 25.0000000000

Tr = 776.5230922867 xr = 130.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0432389217
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0040985105
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1665645584
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.4756574913
 V(tr + Dt) = 0.4508361514

Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0137297104
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000285106
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 26.0000000000

Tr = 778.2893714551 xr = 135.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0422562189
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0039697865
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1644174917
 V(tr) (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.4508361514
 V(tr + Dt) = 0.4267520489
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0131316591
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000285061
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 27.0000000000

Tr = 780.0813321099 xr = 140.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0412735162
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0038419293
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1622558692
 V(tr) (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.4267520489
 V(tr + Dt) = 0.4034025744
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0125445483
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000285016
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 28.0000000000

Tr = 781.9000358460 xr = 145.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0402908134
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0037149741
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1600788872
 V(tr) (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.4034025744
 V(tr + Dt) = 0.3807848452
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0119685988
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000284971
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 29.0000000000

Tr = 783.7466158988 xr = 150.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0393081106
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0035889570
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1578856983
 V(tr) (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.3807848452
 V(tr + Dt) = 0.3588957016
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0114040277
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000284925
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 30.0000000000

Tr = 785.6222839076 xr = 155.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0383254079
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0034639149
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1556754079
 V(tr) (Volume de água remanescente na superfície, no tempo tr) = 0.3588957016
 V(tr + Dt) = 0.3377317022
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0108510486
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000284878
 Vtv (Volume de água na superfície, no início do tr) = 1.3381256169

Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 31.0000000000

Tr = 787.5283375131 xr = 160.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0373427051
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0033398855
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1534470694
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.3377317022
 V(tr + Dt) = 0.3172891199
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0103098716
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284831
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 32.0000000000

Tr = 789.4661689289 xr = 165.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0363600023
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0032169074
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1511996791
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.3172891199
 V(tr + Dt) = 0.2975639361
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0097807026
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284783
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 33.0000000000

Tr = 791.4372746237 xr = 170.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0353772996
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0030950204
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1489321706
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2975639361
 V(tr + Dt) = 0.2785518359
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0092637440
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284734
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 34.0000000000

Tr = 793.4432663163 xr = 175.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0343945968
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0029742652
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1466434082
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2785518359
 V(tr + Dt) = 0.2602482016
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0087591939
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284685
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 35.0000000000

Tr = 795.4858834865 xr = 180.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0334118940
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0028546836
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1443321802
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2602482016
 V(tr + Dt) = 0.2426481065
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0082672464
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284635
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 36.0000000000

$Tr = 797.5670076776$ $xr = 185.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0324291913
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0027363189
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1419971901
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2426481065
 $V(tr + Dt)$ = 0.2257463077
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0077880914
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284584
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 37.0000000000

$Tr = 799.6886789026$ $xr = 190.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0314464885
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0026192155
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1396370476
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2257463077
 $V(tr + Dt)$ = 0.2095372384
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0073219143
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284533
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 38.0000000000

$Tr = 801.8531145426$ $xr = 195.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0304637858
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0025034194
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1372502581
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.2095372384
 $V(tr + Dt)$ = 0.1940149998
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0068688957
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284481
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 39.0000000000

$Tr = 804.0627312232$ $xr = 200.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0294810830
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0023889780
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1348352103
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.1940149998
 $V(tr + Dt)$ = 0.1791733513
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0064292119
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284427
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 40.0000000000

$Tr = 806.3201702461$ $xr = 205.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0284983802
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0022759407
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.1323901625
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.1791733513
 $V(tr + Dt)$ = 0.1650057014
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0060030339
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284373
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 41.0000000000

$Tr = 808.6283273092$ $xr = 210.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0275156775
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0021643585

P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1299132261
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1650057014
 $V(t_r + D_t)$ = 0.1515050962
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0055905275
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284318
 V_{tv} (Volume de agua na superficie, no inicio do t_r) = 1.3381256169
 D_t (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 42.0000000000

$T_r = 810.9903874258$ $x_r = 215.0000000000$
 h_t (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0265329747
 A_t (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0020542846
 P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1274023468
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1515050962
 $V(t_r + D_t)$ = 0.1386642077
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0051918533
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284262
 V_{tv} (Volume de agua na superficie, no inicio do t_r) = 1.3381256169
 D_t (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 43.0000000000

$T_r = 813.4098661896$ $x_r = 220.0000000000$
 h_t (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0255502719
 A_t (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0019457742
 P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1248552829
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1386642077
 $V(t_r + D_t)$ = 0.1264753208
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0048071662
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284205
 V_{tv} (Volume de agua na superficie, no inicio do t_r) = 1.3381256169
 D_t (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 44.0000000000

$T_r = 815.8906588489$ $x_r = 225.0000000000$
 h_t (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0245675692
 A_t (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0018388851
 P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1222695794
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1264753208
 $V(t_r + D_t)$ = 0.1149303187
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0044366150
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284146
 V_{tv} (Volume de agua na superficie, no inicio do t_r) = 1.3381256169
 D_t (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 45.0000000000

$T_r = 818.4370990545$ $x_r = 230.0000000000$
 h_t (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0235848664
 A_t (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0017336778
 P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1196425371
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1149303187
 $V(t_r + D_t)$ = 0.1040206675
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0040803423
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000284087
 V_{tv} (Volume de agua na superficie, no inicio do t_r) = 1.3381256169
 D_t (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 46.0000000000

$T_r = 821.0540297013$ $x_r = 235.0000000000$
 h_t (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0226021636
 A_t (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0016302156
 P_t (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1169711767
 $V(t_r)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo t_r) = 0.1040206675
 $V(t_r + D_t)$ = 0.0937373983

Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0037384841
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000284026
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 47.0000000000

$Tr = 823.7468890371$ $xr = 240.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0216194609
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0015285652
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1142521949
 $V(t_r)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r) = 0.0937373983
 $V(t_r + Dt)$ = 0.0840710881
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0034111694
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000283963
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 48.0000000000

$Tr = 826.5218162183$ $xr = 245.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0206367581
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0014287969
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1114819122
 $V(t_r)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r) = 0.0840710881
 $V(t_r + Dt)$ = 0.0750118380
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0030985197
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000283899
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 49.0000000000

$Tr = 829.3857819289$ $xr = 250.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0196540553
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0013309850
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1086562086
 $V(t_r)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r) = 0.0750118380
 $V(t_r + Dt)$ = 0.0665492493
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0028006484
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000283834
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 50.0000000000

$Tr = 832.3467516787$ $xr = 255.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0186713526
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0012352083
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1057704446
 $V(t_r)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r) = 0.0665492493
 $V(t_r + Dt)$ = 0.0586723965
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0025176605
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000283766
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Número de incrementos de tempo calculados) = 51.0000000000

$Tr = 835.4138922794$ $xr = 260.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em t_r) = 0.0176886498
 At (Área de escoamento na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.0011415510
 Pt (Perímetro molhado na extremidade a jusante, no tempo t_r) = 0.1028193645
 $V(t_r)$ (Volume de água remanescente na superfície, no tempo t_r) = 0.0586723965
 $V(t_r + Dt)$ = 0.0513697966
 Q_t (Taxa de escoamento superficial no tempo t_r) = 0.0022496518
 I (Taxa de infiltração para a fase de recessão) = 0.0000283697
 V_{tv} (Volume de água na superfície, no início do t_r) = 1.3381256169

$$\begin{aligned} \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 52.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 838.5978362048 \quad \text{xr} = 265.0000000000 \\ \text{ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0167059470 \\ \text{At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0010501029 \\ \text{Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0997969731 \\ \text{V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.0513697966 \\ \text{V(tr + Dt)} &= 0.0446293747 \\ \text{Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0019967081 \\ \text{I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000283625 \\ \text{Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 53.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 841.9110248098 \quad \text{xr} = 270.0000000000 \\ \text{ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0157232443 \\ \text{At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0009609606 \\ \text{Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0966963804 \\ \text{V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.0446293747 \\ \text{V(tr + Dt)} &= 0.0384384244 \\ \text{Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0017589042 \\ \text{I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000283551 \\ \text{Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 54.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 845.3681609472 \quad \text{xr} = 275.0000000000 \\ \text{ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0147405415 \\ \text{At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0008742283 \\ \text{Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0935096016 \\ \text{V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.0384384244 \\ \text{V(tr + Dt)} &= 0.0327835628 \\ \text{Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0015363035 \\ \text{I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000283474 \\ \text{Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 55.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 848.9868164416 \quad \text{xr} = 280.0000000000 \\ \text{ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0137578387 \\ \text{At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0007900194 \\ \text{Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0902272959 \\ \text{V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.0327835628 \\ \text{V(tr + Dt)} &= 0.0276506777 \\ \text{Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0013289561 \\ \text{I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000283395 \\ \text{Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 56.0000000000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr} &= 852.7882638834 \quad \text{xr} = 285.0000000000 \\ \text{ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr)} &= 0.0127751360 \\ \text{At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0007084574 \\ \text{Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr)} &= 0.0868384183 \\ \text{V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr)} &= 0.0276506777 \\ \text{V(tr + Dt)} &= 0.0230248663 \\ \text{Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr)} &= 0.0011368976 \\ \text{I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao)} &= 0.0000283312 \\ \text{Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr)} &= 1.3381256169 \\ \text{Dt (Incremento de tempo)} &= 5.0000000000 \\ \text{i (Numero de incrementos de tempo calculados)} &= 57.0000000000 \end{aligned}$$

$Tr = 856.7986419955$ $xr = 290.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0117924332
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0006296788
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0833297496
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0230248663
 $V(tr + Dt)$ = 0.0188903628
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0009601477
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000283225
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 58.0000000000

$Tr = 861.0506322915$ $xr = 295.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0108097304
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0005538346
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0796852441
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0188903628
 $V(tr + Dt)$ = 0.0152304522
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0007987078
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000283135
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 59.0000000000

$Tr = 865.5859476263$ $xr = 300.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0098270277
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0004810946
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0758851026
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0152304522
 $V(tr + Dt)$ = 0.0120273648
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0006525585
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000283039
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 60.0000000000

$Tr = 870.4591650059$ $xr = 305.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0088443249
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0004116510
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0719044150
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0120273648
 $V(tr + Dt)$ = 0.0092621476
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0005216565
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282937
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 61.0000000000

$Tr = 875.7438987438$ $xr = 310.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0078616221
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0003457251
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0677110976
 $V(tr)$ (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0092621476
 $V(tr + Dt)$ = 0.0069145022
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0004059302
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282829
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 62.0000000000

$Tr = 881.5433068331$ $xr = 315.0000000000$
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0068789194
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0002835758

Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0632626219
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0069145022
 V(tr + Dt) = 0.0049625765
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0003052743
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282713
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 63.0000000000

Tr = 888.0092652468 xr = 320.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0058962166
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0002255126
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0585005318
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0049625765
 V(tr + Dt) = 0.0033826891
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0002195421
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282586
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 64.0000000000

Tr = 895.3807094339 xr = 325.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0049135138
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0001719161
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0533406000
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0033826891
 V(tr + Dt) = 0.0021489510
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0001485349
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282446
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 65.0000000000

Tr = 904.0705258418 xr = 330.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0039308111
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0001232721
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0476534391
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0021489510
 V(tr + Dt) = 0.0012327210
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0000919853
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282287
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 66.0000000000

Tr = 914.9020820679 xr = 335.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0029481083
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0000802354
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0412210319
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0012327210
 V(tr + Dt) = 0.0006017652
 Qt (Taxa de escoamento superficial no tempo tr) = 0.0000495302
 I (Taxa de infiltracao para a fase de recessao) = 0.0000282103
 Vtv (Volume de agua na superficie, no inicio do tr) = 1.3381256169
 Dt (Incremento de tempo) = 5.0000000000
 i (Numero de incrementos de tempo calculados) = 67.0000000000

Tr = 929.9780157562 xr = 340.0000000000
 ht (Profundidade de escoamento na extremidade a jusante, em tr) = 0.0019654055
 At (Area de escoamento na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0000437657
 Pt (Perimetro molhado na extremidade a jusante, no tempo tr) = 0.0336178395
 V(tr) (Volume de agua remanescente na superficie, no tempo tr) = 0.0006017652
 V(tr + Dt) = 0.0002188285

