

ESTUDO DE PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS  
ABERTOS EM DECLIVE UTILIZANDO UM MODELO ALGÉBRICO

ROBERTO VIEIRA PORDEUS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A COORDENAÇÃO DO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

FORTALEZA - 1990

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Irrigação e Drenagem, autorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se a disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

---

Roberto Vieira Pordeus

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 21/12/90

---

Francisco de Souza, Ph.D.

Orientador da Dissertação

---

Moisés Custódio Saraiva Leão, Ph.D.

Conselheiro

---

Luis Carlos Uchoa Saunders, Dr.

Conselheiro

DEDICO

À minha esposa Gilselia e minha filhinha Roberta Larissa, que no transcorrer do curso foram privadas do lazer e do meu convívio, e com amor e compreensão foi possível a conclusão desta obra.

E à José Augusto de Lira (IN MEMORIAN), pelo incentivo e apoio ao longo de minha vida acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa Nacional de Irrigação (PRONI), pela bolsa de estudo oferecida;

Ao professor Francisco de Souza, pela dedicação e sábia orientação deste trabalho;

Ao professor Moisés Custódio Saraiva Leão, pelo apoio como coordenador e professor do curso;

Ao professor Luis Carlos Uchôa Saunders, pela amizade e apoio durante o curso;

Ao grande amigo Engenheiro Agrônomo Johnny Aguilár Rodriguez, pela amizade, apoio e incentivo durante o curso e evolução desta obra;

A todos os professores do curso de Mestrado do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos grandes conhecimentos transmitidos;

Aos professores do Departamento de Fitotecnia, Francisco Ivaldo O. Melo e ao professor do Departamento de Solo, Mardônio Aguiar Coelho (IN MEMORIAN) pelo apoio e grandes conhecimentos transmitidos;

A todos os colegas que tive contato durante o curso, pelo apoio e cooperação e sinceras amizades.

ROBERTO VIEIRA PORDEUS

## SUMÁRIO

	página
<u>LISTA DE TABELAS</u> .....	vii
<u>LISTA DE FIGURAS</u> .....	xiv
<u>RESUMO</u> .....	xvii
<u>ABSTRACT</u> .....	xviii
1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2 - <u>REVISÃO DE LITERATURA</u> .....	3
2.1 - Fase de avanço.....	9
2.1.1 - Fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial.....	15
2.2 - Perímetro molhado.....	20
2.3 - Fase de recessão.....	26
3 - <u>MATERIAL E MÉTODOS</u> .....	35
3.1 - Fase de avanço.....	36
3.1.1 - Fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial.....	38
a - Fatores de forma estimados.....	38
b - Fatores de forma superficial e subsuperficial segundo SOUZA (1981).....	38
c - Fatores de forma superficial e subsuperficial segundo FOK-BISHOP.....	39
3.1.2 - Área da seção transversal do fluxo.....	40
3.1.3 - Área infiltrada acumulada.....	43
3.2 - Fase de recessão.....	44

3.2.1 - Tempo de recessão igual ao tempo de aplicação da água - HIPÓTESE I.....	45
3.2.2 - Tempo de recessão superior ao tempo de aplicação da água - HIPÓTESE II.....	45
3.2.3 - Curvas de recessão -HIPÓTESE III.....	47
3.3 - Perímetro Molhado.....	48
3.3.1 - Perímetro molhado igual a superfície livre da água (CASO I).....	48
3.3.2 - Perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S - USDA (CASO II).....	49
3.3.3 - Perímetro molhado igual ao arco da parábola (CASO III).....	49
3.4 - Volume infiltrado.....	52
4 - <u>RESULTADOS E DISCURSÃO</u> .....	53
4.1 - Efeito dos fatores de forma do perfil superficial e subsuperficial sobre o avanço.....	55
4.2 - Efeito de recessão sobre o perfil de infiltração na irrigação por sulco.....	87
4.3 - Influência do perímetro molhado nos parâmetros da irrigação por sulco.....	107
5 - <u>CONCLUSÕES</u> .....	130
6 - <u>RECOMENDAÇÕES</u> .....	131
7 - <u>LITERATURA CITADA</u> .....	132
8 - <u>ANEXOS</u> .....	136
ANEXO A - <u>DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DO ARCO DA PARÁBOLA PARA CALCULAR O PERÍMETRO MOLHADO EM IRRIGAÇÃO POR SULCO</u> .....	137
ANEXO B - <u>NOTAÇÕES</u> .....	147

LISTA DE TABELAS

TABELA		página
01	Dados de campo utilizados na análise da irrigação por sulcos.....	54
02	Valores de n em função da condição da superfície de escoamento (S.C.S, 1974).....	56
03	Fatores de Forma Superficial ( $r_y$ ) e subsuperficial ( $r_z$ ) estimados, e os encontrados com a equação de SOUZA, e com a equação de FOK-BISHOP.....	57
04	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y1} = 0,70$ e $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Ramsey).....	61
05	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y2} = 0,75$ e $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Ramsey).....	62
06	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y3} = 0,616$ e $r_{z3} = 0,590$ . (dados de Ramsey).....	63
07	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y4} = 0,54$ e $r_{z4} = 0,77$ . (dados de Ramsey).....	64
08	Dados de avanço e recessão de Ramsey.....	65
09	Avanço e recessão calculado pelo modelo hidrodinâmico não linear da irrigação por sulco (dados de Ramsey).....	66

## TABELA

página

10	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y1} = 0,70$ e $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Horticulture).....	68
11	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y2} = 0,75$ e $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Horticulture).....	69
12	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y3} = 0,66$ e $r_{z3} = 0,61$ . (dados de Horticulture).....	70
13	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y4} = 0,57$ e $r_{z4} = 0,74$ . (dados de horticulture).....	71
14	Dados de avanço e recessão de Colorado.....	72
15	Avanço e recessão calculados pelo modelo hidrodinâmico não linear da irrigação por sulcos (dados do Colorado-Horticulture-Farm)....	73
16	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y1} = 0,70$ e $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Stieben).....	75
17	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y2} = 0,75$ e $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Stieben).....	76
18	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y3} = 0,602$ e $r_{z3} = 0,476$ . (dados de Stieben).....	77

## TABELA

página

19	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y4} = 0,53$ e $r_{z4} = 0,57$ . (dados de Stieben).....	78
20	Dados de avanço e recessão de Stieben Farm...	79
21	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y1} = 0,70$ e $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Benson).....	81
22	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y2} = 0,75$ e $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Benson).....	82
23	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y3} = 0,617$ e $r_{z3} = 0,611$ . (dados de Benson).....	83
24	Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando $r_{y4} = 0,51$ e $r_{z4} = 0,71$ . (dados de Benson).....	84
25	Dados de avanço e recessão de Benson Farm....	85
26	Valores dos tempos de recessão encontrados com as três hipóteses, e os dados de campo...	88
27	Avanço, recessão e infiltração calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão. Hipótese I (dados de Ramsey).....	90
28	Avanço, recessão e infiltração calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos	

## TABELA

página

	considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II. (dados de Ramsey).	91
29	Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão uma curva, hipótese III. (dados de Ramsey).....	92
30	Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão igual ao tempo de aplicação, hipótese I. (dados de Horticulture)	94
31	Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II. (dados de Horticulture).....	95
32	Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão, hipótese III. (dados de Horticulture).....	96
33	Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos considerando-se a recessão igual ao tempo de aplicação, hipótese I. (dados de Stieben).....	98
34	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II	

## TABELA

página

	(dados de Stieben).....	99
35	Avanço, recessão e infiltração acumulada <u>cal</u> culados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipó tese III. (dados de Stieben).....	100
36	Avanço, recessão e infiltração acumulada <u>cal</u> culados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o tempo de <u>reces</u> são igual ao tempo de aplicação, hipótese I (dados de Benson).....	102
37	Avanço, recessão e infiltração acumulada <u>cal</u> culados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o tempo de <u>reces</u> são superior ao tempo de aplicação, hipótese II. (dados de Benson).....	103
38	Avanço, recessão e infiltração acumulada <u>cal</u> culados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipó tese III. (dados de Benson).....	104
39	Valores de Perímetro molhado em metros, $P_m$ , encontrados para os três casos estudados....	109
40	Avanço, recessão e infiltração acumulada <u>cal</u> culados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molha do, caso I. (dados de Ramsey).....	111
41	Avanço, recessão e infiltração acumulada	

## TABELA

página

	calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S-USDA, caso II. (dados de Ramsey).....	112
42	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III. (dados de Ramsey).....	113
43	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I. (dados de Horticulture).....	115
44	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do C.S.C-USDA, caso II. (dados de Horticulture).....	116
45	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III. (dados de Horticulture).....	117
46	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I. (dados de Stieben).....	119

## TABELA

página

47	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S-USDA, caso II. (dados de Stieben).....	120
48	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III. (Dados de Stieben).....	121
49	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I. (dados de Benson).....	123
50	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S -USDA, caso II. (dados de Benson).....	124
51	Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III. (dados de Benson).....	125

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	página
01 Diagrama esquemático mostrando as fases da irrigação superficial (após BASSET et.al 1983)	5
02 Definição esquemática do método de HALL para determinação do avanço da água sobre faixas...	16
03 Diagrama de seção transversal para um canal de forma parabólica.....	25
04 Volume superficial esquemático: fase de depleção.....	31
05 Monograma de KIEFER para obter o F da equação do fator de forma subsuperficial, $r_z$ .....	41
06 Elemento geométrico da seção transversal parabólica de um sulco de irrigação (após SOUZA, 1983).....	42
07 Arco de uma parábola.....	50
08 Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico, com fatores de forma variados comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulco com comprimento de 100m.....	60
09 Curvas de avanço calculados pelo modelo algébrico com fatores de forma variados, comparados com dados observados (dados de Horticulture), sulco com comprimento de 175m.....	67
10 Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico com fatores de forma variados, comparados com dados observados (dados de Stieben),	

FIGURA	página
sulco com comprimento de 350m.....	74
11 Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico com fatores de forma variados, comparados com dados observados (dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m.....	80
12 Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulcos com comprimento de 100m.....	89
13 Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculados pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados (dados de Horticulture), sulcos com comprimento de 175m.....	93
14 Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculados pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados (dados de Stieben), sulcos com comprimento de 350m.....	97
15 Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados (dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m.....	101
16 Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro	

## FIGURA

## página

	molhado, comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulco com comprimento de 100m.	110
17	Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Horticulture), sulcos com comprimento de 175m.....	114
18	Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Stieben), sulcos com comprimento de 350m...	118
19	Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m....	122

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise da irrigação por sulcos aplicando o modelo desenvolvido por LEVIEN (1985). Foram estudadas as relações entre os fatores de forma do perfil superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço da água nos sulcos, a influência da recessão sobre a distribuição das lâminas infiltradas, e a aplicação da equação do arco da parábola para calcular o perímetro molhado e verificar sua influência na irrigação por sulcos.

O estudo foi realizado com dados de campo obtidos em experimentos realizados por RAMSEY (1976) e pelo Departamento de Agricultura e Engenharia Química do Estado do Colorado (1979).

O resultado do desempenho da equação do arco da parábola, do estudo dos fatores de forma superficial e subsuperficial sobre o avanço da água, e de recessão, foram avaliados pela comparação dos resultados com aqueles obtidos pela aplicação de um modelo mais complexo (modelo hidrodinâmico não linear de SOUZA, 1981) e com dados de campo. Tais resultados mostraram a viabilidade da equação do arco da parábola para calcular o perímetro molhado, o uso da recessão instantânea inicial na cabeceira do sulco, e da aplicabilidade dos fatores de forma superficial e subsuperficial estimados, no cálculo do avanço da água nos sulcos.

## ABSTRACT

This work deals with an application of LEVIEN's (1985) farrow irrigation model. Some aspects were analyzed: the relationship between shape factors and advance curve; the influence of recession on ultimate infiltrated profile; and application of a parabolic equation to calculate, the wetted perimeter and to verify its influence on farrow irrigation.

The study used field data obtained by RAMSEY (1976) and by the University of Colorado, Department of Agricultural and Chemical Engineering (1979).

The results were compared, to a more advanced model (hidrodynamic model, SOUZA (1981)), and with field data, and demonstrate the adequate use of the parabolic equation to calculate the wetted perimeter, the use of instantaneons recession, and the aplicability of shape factors to estimate water advance.

## 1 - INTRODUÇÃO

Na última década vários modelos foram apresentados para simular a irrigação por superfície, sendo classificados em hidrodinâmicos, zero-inércia, onda cinemática, e os mais simplificados, baseados no balanço de volume. LEVIEN (1985) desenvolveu um modelo baseado no balanço de volume.

Existe um consenso de que o desenvolvimento de modelos matemáticos na hidráulica da irrigação superficial permite uma análise relativamente rápida e econômica dos parâmetros necessários a elaboração e manejo eficiente de sistemas de irrigação por sulcos e faixas. O modelo algébrico, desenvolvido por LEVIEN (1985) pode ser utilizado para a elaboração e para o manejo de sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive.

A recessão é a fase da irrigação marcada pelo desaparecimento d'água da superfície do solo. Muitos autores consideram que em sulcos o tempo de recessão é pequeno e a curva de recessão é negligenciável, com pouca ou nenhuma contribuição para a água infiltrada.

Especificamente, os objetivos deste estudo é aplicar o modelo simplificado de LEVIEN, bem como, analisar o efeito dos fatores de forma,  $r_y$  e  $r_z$ , sobre a curva de avanço da água nos sulcos, o efeito da recessão sobre o

perfil de infiltração, e a influência do perímetro molhado nos parâmetros da irrigação por sulcos.

## 2 - REVISÃO DE LITERATURA

A técnica de irrigação por superfície está fundamentada na hidráulica do escoamento livre em canais permeáveis. Mediante princípios baseados na hidráulica do escoamento superficial e nos processos de infiltração, percolação e retenção de água no solo, tendo em conta a estabilidade estrutural, declividade e rugosidade do mesmo, o engenheiro projetista deve escolher os comprimentos das unidades de irrigação e prever o avanço e a recessão da água que corresponde a cada módulo de aplicação.

(VILLASANTE. 1987).

SOUZA (1983) afirma que na irrigação superficial decorre um intervalo de tempo finito para que a água percorra do início até o final da parcela. Na realidade uma irrigação superficial completa, considerando-se o evento desde o instante da adução até o desaparecimento total da água de sulco ou faixa, é composta de várias fases.

Conforme BASSET (1973); STRELKOFF (1977); SOUZA (1981, 1983, 1984) e BASSET et. al. (1983), as fases da irrigação por sulcos são: avanço, armazenamento, depleção e recessão. A primeira delas tem início quando a água é aduzida ao sulco ou faixa, e termina quando a frente de avanço atinge o final do sulco ou cobre toda a parcela. É a chamada "FASE DE AVANÇO". A segunda fase, conhecida como

"FASE DE ARMAZENAMENTO SUPERFICIAL" - para sulcos e faixas - e de "FASE DE INUNDAÇÃO" - para irrigação por inundação, começa ao final do avanço e termina quando a vazão de entrada é suprida. Nesse momento tem início a "FASE DE DEPLEÇÃO" que se encerra no exato momento em que a água desaparece de uma pequena porção qualquer do terreno, que em geral é na cabeceira. Aí então, inicia-se a fase final, conhecida como "FASE DE RECESSÃO", a qual termina quando toda água desaparece na superfície do solo.

Segundo SOUZA (1983), o acompanhamento das diversas fases da irrigação superficial permite a determinação de duas curvas - a curva de avanço e a de recessão. Tudo o que é necessário para obtê-la é ir ao campo e determinar o tempo em que a água avança até pontos específicos,  $X_K$ , chamados de estações; essa trajetória da água define a curva de avanço quando os pontos  $(X_K, t_K)$  são plotados em papel milimetrado. Em seguida, obtêm-se o tempo de recessão em cada estação, que por sua vez estabelece os pontos da curva de recessão. O intervalo de tempo entre as curvas de avanço e de recessão é o tempo de oportunidade de infiltração,  $t_0$ . Se a forma da equação de infiltração do solo em estudo é conhecida, é então possível determinar a distribuição da água infiltrada em função da distância a partir da entrada do sulco ou parcela. Curvas típicas de avanço e de recessão são apresentadas na FIGURA 1 (após BASSET et. al, 1983).

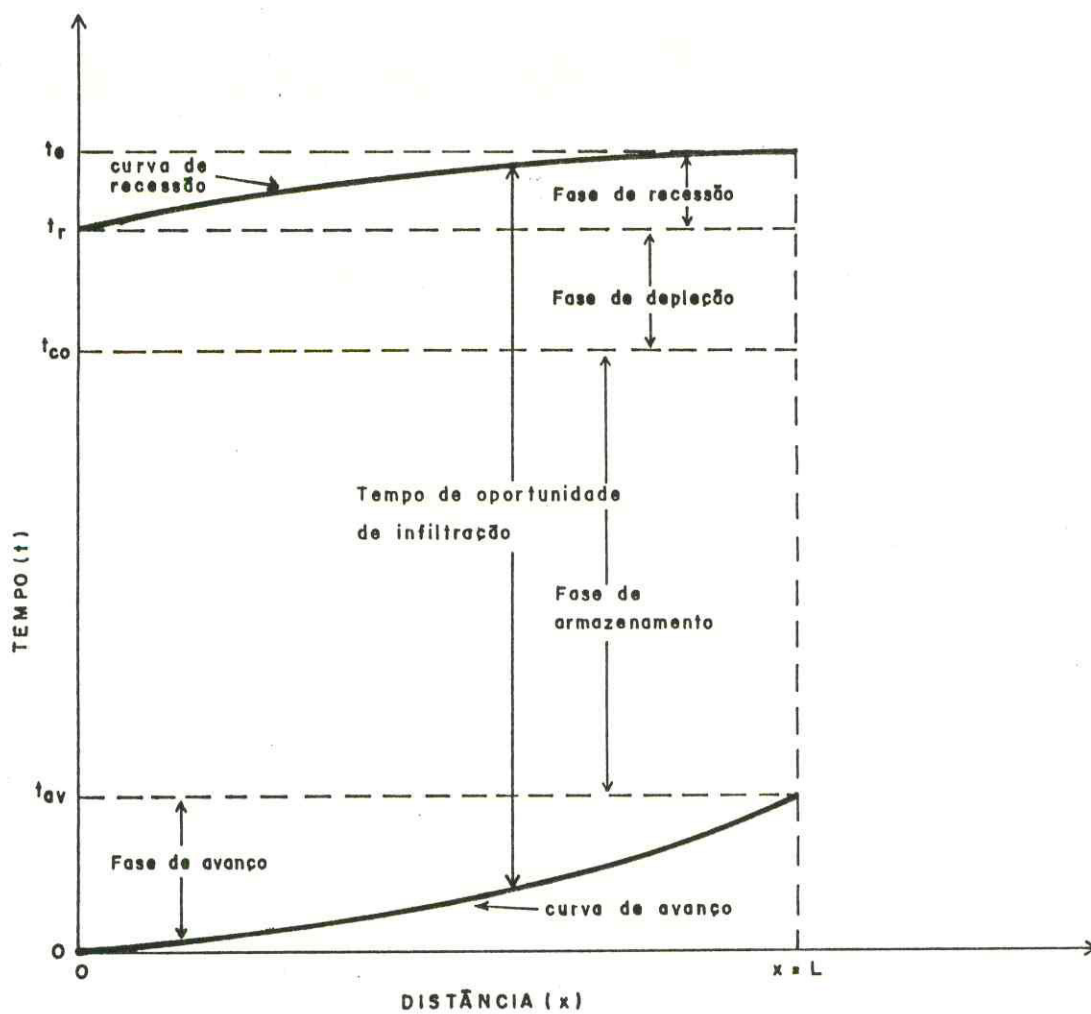


FIGURA 1 - Diagrama esquemático mostrando as fases da irrigação superficial (após Basset et.al., 1983).

O conhecimento das curvas de avanço e de recessão, e da equação característica de infiltração do solo, é essencial para avaliar a performance de um sistema de irrigação superficial no que tange a determinação de parâmetros que expressam a qualidade da irrigação, notadamente, as eficiências de aplicação ( $E_a$ ), de Armazenamento ( $E_s$ ), de distribuição ( $E_d$ ) e os índices de percolação ( $I_p$ ) e de "runoff" ( $I_{ro}$ ), SOUZA, 1983).

De acordo com SAKKAS (1972), citado por SOUZA (1984), todos os enfoques que empregam os princípios da mecânica dos fluídos na solução do problema da irrigação superficial caem dentro de duas categorias: (a) enfoque do balanço de volume, o qual baseia-se no princípio da conservação da massa junto com certas hipóteses relativas a lâmina média do fluxo superficial d'água; (b) enfoque hidrodinâmico baseado no princípio da conservação da massa e da conservação do momento linear. Um terceiro enfoque (o enfoque chamado de "zero inércia") pode ser adicionado aos outros dois. Este fundamenta-se nos mesmos princípios que o hidrodinâmico, porém sob a hipótese de que a aceleração é desprezível. Assim, os modelos matemáticos da irrigação superficial podem ser de três tipos: modelo hidrodinâmico, modelo zero - inércia e o modelo do balanço de volume.

LEWIS e MILNE (1938), aplicaram o princípio da conservação da massa para determinar o avanço da água na irrigação por faixas. Elas assumiram que a vazão e a lâmina d'água eram constantes e apresentaram soluções para duas formas diferentes de infiltração. PHILIP e

MACNTIRE (1953), citados por SOUZA (1981), mostraram que um dos exemplos utilizados por LEWIS e MILNE apresentaram erros. SOUZA (1981) ressaltou que é importante observar que aqueles autores foram os primeiros a propor uma equação para a taxa de avanço considerando a taxa de infiltração variável; outros autores consideraram a taxa de infiltração constante durante a irrigação.

HALL (1956) propôs uma técnica diferente para resolver a equação da conservação da massa. Ao invés de considerar a lâmina d'água constante, ele sugeriu que a lâmina no início da parcela era a lâmina normal (para fluxo uniforme, permanente), que a forma do perfil da água dentro do canal (sulco ou faixa) seguia a forma de uma parábola de grau entre 0,5 a 1,0, com o eixo coincidindo com a superfície do solo. Além do mais a forma do perfil sub-superficial (infiltrada) era de uma parábola, orientada do mesmo modo.

BASSET (1972) apresentou um modelo hidrodinâmico do avanço da água em faixas de irrigação; este autor (1973) estendeu esse modelo para todas as demais fases da irrigação.

SAKKAS e STRELKOFF (1974) apresentaram outra aplicação do enfoque hidrodinâmico para a fase do avanço.

KATOPODES e STRELKOFF (1977) propuseram um modelo hidrodinâmico completo, isto é, representando todas as fases da irrigação por faixas.

Segundo SOUZA (1983), a análise da irrigação por sulcos é mais difícil do que a da irrigação por faixas devido a complexidade introduzida pela forma de sulco e suas relações com a taxa de infiltração. Segundo este autor, poucas tentativas foram feitas para desenvolver um modelo da irrigação por sulcos.

DAVIS (1965) e WILKE e SMERDON (1965) usaram o enfoque do balanço de volume, com a hipótese da lâmina normal, para determinar o avanço da água em sulcos; WILKE (1968) estudou a hidrodinâmica dos sulcos; SOUZA (1981) estabeleceu um modelo hidrodinâmico da irrigação por sulcos.

Segundo SOUZA (1983), eles são complexos e caros. Por outro lado, os modelos hidrodinâmicos são importantes porque estabelecem um padrão de comparação para os modelos simplificados, isto é, os modelos de balanço de volume e zero inércia.

LEVIEN (1985), desenvolveu um modelo algébrico que simula o processo completo da irrigação por sulcos. Seu modelo pode ser usado para analisar e prever o desempenho de um sistema de irrigação por sulcos em declive com drenagem livre. LEVIEN, utilizou a equação da conservação da massa com a hipótese básica de que a lâmina de irrigação é a lâmina de fluxo uniforme (lâmina normal). O desempenho do modelo de LEVIEN, foi avaliado pelas comparações dos resultados com aqueles obtidos pela aplicação de um modelo matemático mais complexo, (modelo hidrodinâmico não linear

de SOUZA, 1981) e com dados de campo; tais resultados de mostram a viabilidade da aplicação do modelo, bem como a validade das hipóteses utilizadas para o desenvolvimento do mesmo.

## 2.1 - Fase de Avanço

Segundo KARMELI (1978), o movimento da frente molhada através do sulco em declive é chamada de fase de avanço. A fase de avanço é um caso de fluxo não uniforme e variado sobre superfície porosa. A solução deste problema requer considerações de conservação de massa e energia. A taxa de avanço é primeiramente dependente da vazão de entrada no canal, seção transversal, características de rugosidade, declividade e características do solo.

De acordo com estes mesmos autores, a solução para o problema do avanço na irrigação por superfície cai dentro de duas categorias principais: hidrodinâmico e balanço de volume.

O conceito hidrodinâmico é baseado nas equações da conservação da massa e energia o qual relaciona lâmina de fluxo e velocidade no canal. A solução das equações de fluxo, conhecidas como equações de St. Venant, tem sido obtida por vários autores. Alguns desses autores são: KRUGER e BASSET (1965); WILKE (1968); STRELKOFF (1970); BASSET (1972); KINCAID et.al. (1972); BASSET e FITS SIMMONS

(1974) e SOUZA (1981).

O conceito ao balanço de volume está baseado nos princípios da conservação da massa. Neste conceito uma área ou lâmina média constante de superfície armazenada obtida através de medições em campo ou estimada através de outros meios substitui a equação de energia, necessária para estabelecer o perfil superficial. Comparações com dados de campo de taxa de avanço ilustrado por vários autores, indicam que os resultados baseados em hipóteses razoáveis aproximam-se dos valores reais de avanço (HALL, 1956; DAVIS, 1961; FOK e BISHOP, 1965; WILKE e SMERDON, 1965; HART et.al., 1968).

WALKER e SKOGERBOE (1987) concluíram que a taxa de avanço da frente de água através do campo é uma função da vazão, rugosidade hidráulica, declividade, taxa de infiltração e forma de sulco.

FOK e BISHOP (1965) citados por KARMELI et. al. (1978), desenvolveram uma técnica de balanço de volume para estimar a taxa de avanço em faixa e sulcos baseado na seguinte equação:

$$X = a T^b$$

Onde: x= distância de avanço

T= tempo de avanço

a, b = constante empíricas

No caso da irrigação por sulcos ainda deve ser considerado o efeito da forma do canal. Considerando que a relação entre Q e  $D_o$  é apresentada na forma de  $Q = C'D_o^p$ ,

em que  $C'$  e  $p$  são constantes e podem ser determinados empíricamente; deste modo, a equação para um sistema de irrigação por sulcos pode ser apresentado como:

$$x = \frac{Q \cdot t}{\frac{U D_o^m}{1+b} + \frac{W F K t^{m+1}}{(n+1)(n+2)}} \quad (2)$$

onde  $U$  e  $m'$  são coeficientes da água da seção transversal em termos da altura da lâmina de água  $D_o$ , e  $W$  é um parâmetro que pode ser o perímetro molhado, a largura da água no sulco ou o espaçamento dos sulcos, dependendo do processo utilizado na determinação da equação de infiltração. Neste caso a relação entre a seção transversal e a altura  $D_o$  precisa ser determinada graficamente.

WILKE e SMERDON (1965), citado por SOUZA (1981) apresentaram outras aproximações da conservação da massa para medir o avanço, mediante a solução da equação de PHILIP e FARREL (1964), WILKE e SMERDON (1965) propuseram uma série de equações de regressão linear, relacionando avanço e tempo para diferentes valores da constante da equação de KOSTIAKOV.

Segundo KARMELI et.al. (1978), o avanço pode ser determinado desde que se conheça os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, através da seguinte equação:

$$q \cdot t = r_y Y_m X + r_z Z_m X$$

onde:  $\bar{Y} = r_y Y_m$

$$\bar{Z} = r_z Z_m$$

$Y_m, Z_m$  = lâmina máxima na superfície do solo e lâmina máxima infiltrada, respectivamente.

$r_y, r_z$  = fatores de forma superficial e subsuperficial, isto é, a relação de área do perfil superficial e subsuperficial para a área dos respectivos retângulos circunscritos.

Segundo KARMELI et.al. (1978), o parâmetro  $r_y$ , depende da gravidade e da força de resistência, bem como da característica da infiltração do solo. HALL (1956) sugeriu que:  $0,5 < r_y < 1,0$ .

A função  $r_z$  é dependente da função infiltração, bem como das características hidráulicas do sistema. A forma subsuperficial ( $r_z$ ) é assumida constante no perfil com valores entre 0,5 e 1,0 (KARMELI et.al., 1978).

Para SCALOPPI (1986) o avanço da água na superfície de escoamento, em sulcos ou faixas, é difícil de ser previsto. Esta dificuldade é atribuída à natureza do fluxo superficial, caracterizado como não permanente e espacialmente variado, reduzindo com a distância, devido à infiltração. De acordo com este autor, alguns métodos simplificados, nem sempre precisos, baseiam-se na solução da equação do balanço de volume:

$$q.t = (\bar{A}_y + \bar{A}_z) x \quad (4)$$

onde:  $q$  = vazão derivada a parcela;  
 $t$  = tempo decorrido desde o início do processo;  
 $x$  = distância de avanço correspondente;  
 $\bar{A}_y, \bar{A}_z$  = área média das seções transversais de escoamento superficial e infiltrado, respectivamente.

A maior dificuldade deste cálculo reside na estimativa destas áreas médias que podem ser aproximadas por aquelas determinadas no início da parcela ( $A_{y0}$  e  $A_{z0}$ , respectivamente), (SCALOPPI, 1986).

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1986), na irrigação em sulcos e faixas, o tempo de avanço é provavelmente o parâmetro hidráulico que deve receber maior atenção para alterações, enquanto para irrigação por bacia o tempo de avanço é secundário.

O avanço da água acima da superfície é também uma consideração importante no manejo do sistema de irrigação superficial (WALKER e SKOGERBOE, 1986). De acordo com estes autores, o tempo gasto pela água para alcançar o fim da parcela é muitas vezes uma grande aproximação do tempo de aplicação da água, ou seja, muitas vezes a aplicação de água é cortada quando a mesma alcança o fim da parcela.

As características de infiltração do solo, declividade, configuração geométrica, rugosidade e comprimento dos sulcos, vazão e tempo total de irrigação são os fatores básicos que afetam a fase de avanço da água sobre a superfície do solo (KERMELI et.al., 1978).

De acordo com CRISTIANSEN et.al., (1966), uma análise matemática da aplicação de água pelo método de irrigação por sulcos envolve como principal variável a taxa de infiltração do solo, já que a infiltração é um dos principais fatores que afetam o avanço da água e, consequentemente sua distribuição.

A infiltração em sulcos não é unidirecional. O estudo da infiltração em duas ou três direções usa análise matemática avançada (PHILIP, 1966, citado por FOK, 1988). O uso de aplicações matemáticas e experimentos de campo para investigar a infiltração bidirecional foi apresentada por TOKSOZ et.al. (1965). FOK e CHIANG (1984) estabeleceram um método capaz de determinar equações algébricas de infiltração bi-direcional para irrigação por sulcos. Estes mesmos autores expressaram o volume infiltrado ou lâmina como função do tempo de infiltração e concluíram que não existe uma equação geral para infiltração na irrigação por sulcos, porque a área da seção transversal de um sulco pode tomar muitas formas geométricas.

Segundo DAKER (1976) a forma geométrica dos sulcos incluindo sua profundidade, é muito importante na eficiência e na adequação da irrigação. De acordo com BOOHER, (1974), a seção transversal deve ser suficiente para conter a quantidade d'água necessária para uma distribuição uniforme ao longo do sulco. (BERNARDO, 1978), a forma geométrica dos sulcos tem uma influência considerável na adequabilidade e eficiência de irrigação.

A profundidade ou lâmina d'água no sulco, é

influenciada pela forma do mesmo (além da declividade, rugosidade e vazão de entrada), e é bem conhecido que a variação da lâmina ( $y$ ) d'água com o tempo e distância é um fator que determina a infiltração total de água no sulco durante a irrigação (SOUZA, 1988).

### 2.1.1 - Fatores de Forma Dos Perfis Superficial e Subsuperficial

HALL (1956) representa os perfis superficial e subsuperficial durante o avanço da água na irrigação por faixas de acordo com a FIGURA 2. O mesmo autor propôs o método recursivo para estimar o avanço da água na irrigação.

Segundo HALL (1956), citado por KERMELI et. al. (1978), conhecida a infiltração função de  $Z(t - t_s)$  as linhas horizontais  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ ,  $Z_{03}$ , ..., representando as lâminas infiltradas em intervalos de tempo constante podem ser construídas. A distância de avanço para tempos  $t$ ,  $2t$ ,  $3t$ , ..., é representada pelas linhas verticais  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , ..., (FIGURA 2).

O perfil superficial é calculado para intervalo de tempo  $\Delta t$ , e conseqüentemente, o perfil subsuperficial pode ser construído ligando os vértices opostos dos retângulos resultando na FIGURA 2, HALL (1956)

Segundo SOUZA (1981) o problema do avanço, de

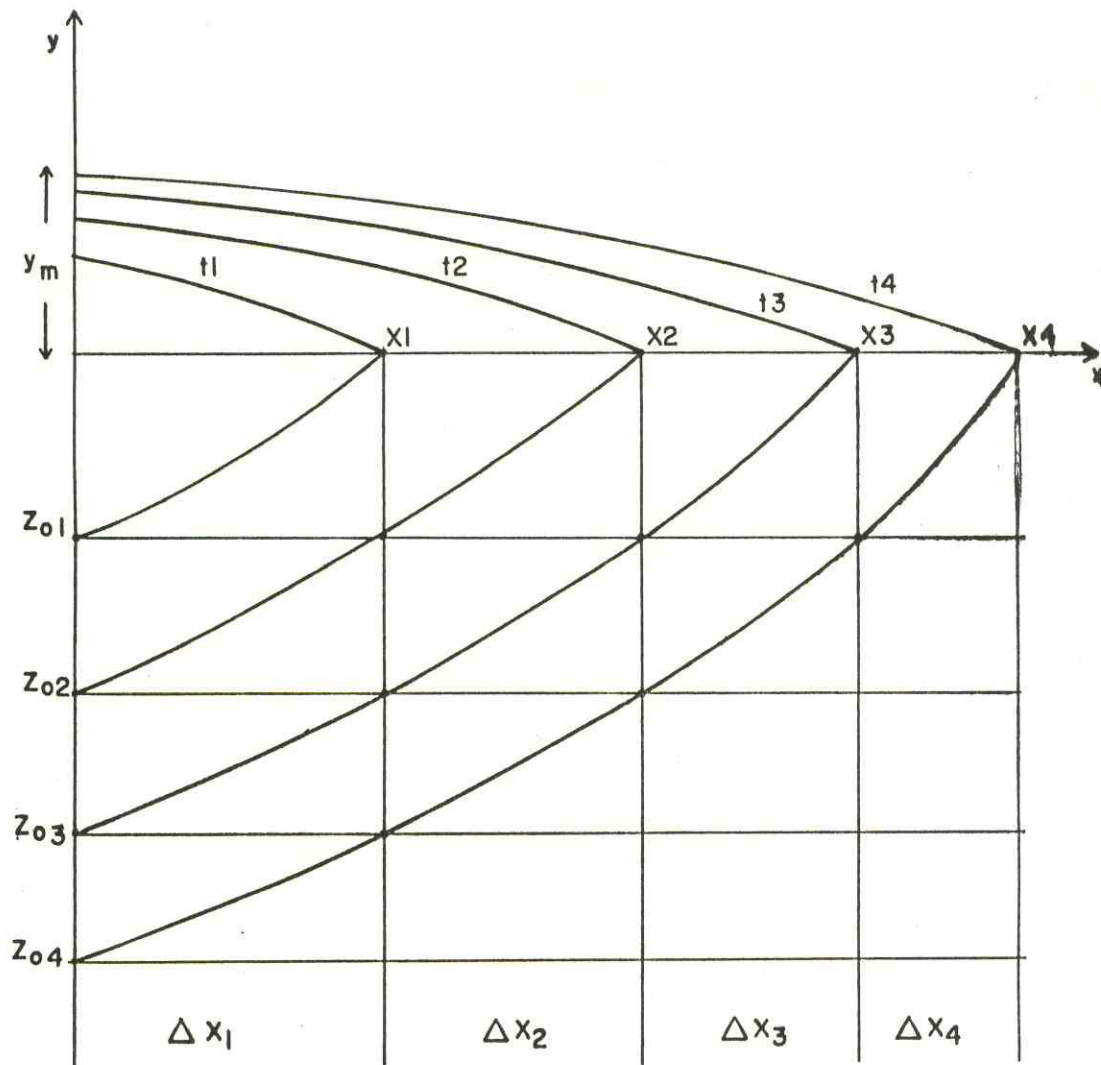


FIGURA 2 - Definição esquemática do método de Hall para determinação do avanço da água so bre faixas.

acordo com as equações de balanço de volume, reduz-se a determinação dos fatores de forma,  $r_y$  e  $r_z$ , com o tempo, e as lâminas máximas superficial e infiltrada,  $Y_o$  e  $Z_o$ . HALL (1956) sugeriu que  $Y_m$  na irrigação por faixas seja a lâmina normal da cabeceira, a qual pode ser obtida pela equação de Manning apresentada abaixo:

$$Y_m = \frac{n \cdot q}{1,48 S_o^{0,5}} \quad (5)$$

onde:  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning;

$q$  = taxa de fluxo por unidade de largura da faixa  
(ft<sup>3</sup>/s);

$S_o$  = declividade da faixa.

Segundo SOUZA (1981), as funções  $r_y$  e  $Y_o$  para fluxo d'água sobre uma superfície impermeável depende somente das forças de pressão, peso e resistência, além da aceleração. No caso da superfície permeável,  $r_y$  e  $Y_o$  são funções de infiltração. Por sua vez,  $r_z$  e  $Z_o$  são dependentes da infiltração e da extensão do perfil superficial.

É evidente que as equações que descrevem fluxos d'água na zona superficial e subsuperficial estão interligadas e num enfoque rigoroso devem ser resolvidas simultaneamente. Segundo o balanço de volume a equação de energia é ignorada e conseqüentemente é substituída por uma hipótese que é a seguinte: o produto,  $r_y \cdot Y_o$  é constante, igual a  $\bar{Y}$ , (SOUZA, 1983). De acordo com SOUZA (1981), o problema do avanço está centrado na avaliação de  $r_z$ .

Segundo SCALOPPI (1986), os valores de  $r_y$  e  $r_z$  são empíricos. Logo, quanto mais representativos forem os valores atribuídos aos fatores de forma,  $r_y$  e  $r_z$ , mais precisas deverão ser as estimativas das distâncias de avanço em função do tempo. LEVIEN (1985), analisando seu modelo algébrico, estimou 0,75 e 0,80 para os fatores de forma superficial e subsuperficial, respectivamente.

STRELKOFF (1978) expressou o fator de forma do perfil subsuperficial,  $r_z$ , através da seguinte equação:

$$r_z = \frac{l}{a + 1} \quad (6)$$

onde:  $a$  = expoente da equação de infiltração de Kostiakov.

$$z = K t^a \quad (7)$$

sendo:  $z$  = lâmina infiltrada;  
 $t$  = tempo de infiltração;  
 $K$  e  $a$  = constantes empíricas.

FOK e BISHOP (1956), usaram em sua técnica de balanço de volume para estimar a taxa de avanço em faixas e sulcos, as seguintes equações para os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial.

$$r_y = \frac{l}{l + h}$$

$$r_z = \frac{F}{a + 1} = h \left[ \frac{l}{h} - \frac{a}{1 + h} + \frac{a(a-1)}{(2+h)2!} - \frac{a(a-1)(a-2)}{(3+h)3!} + \dots \right]$$

onde:  $h =$  expoente da equação de avanço,  $x = f t^h$

$$h = e^{-0,6a} \quad (10)$$

HART et.al. (1968) determinaram  $h$  do seguinte modo:

$$h = 1 - a \quad (11)$$

sendo:  $a =$  expoente da equação de infiltração de kostiakov.

$F =$  fator de correção de Kiefer (1959)

HART et.al. (1968), afirmam que  $r_z$  pode ser calculado por uma expressão equivalente,

$$r_z = \frac{\Gamma(1+h) \Gamma(1+a)}{\Gamma(1+h+a)} \quad (12)$$

onde:  $\Gamma =$  símbolo da função gama

substituindo a equação (11) em (12) e reescrevendo,

$$\begin{aligned} r_z &= \frac{(1-a) \Gamma(1-a) \Gamma(1+a)}{\Gamma(a)} \\ &= (1-a) \Gamma(1-a) \Gamma(a) \\ &= \frac{(1-a) a^\pi}{\text{sen } a \pi} \end{aligned} \quad (13)$$

SOUZA (1981), no modelo hidrodinâmico, considera para a célula situada na extremidade da frente de avanço da água nos sulcos, as seguintes equações para expressar as formas dos perfis superficial e subsuperficial:

$$r_y = \frac{1}{\beta(M+1) + 1} \quad (14)$$

$$r_z = \frac{1}{\beta M + a + 1} \quad (15)$$

onde:  $\beta$  = expoente do perfil  $y = 3/7$

$M$  = expoente da equação da forma do sulco

$a$  = expoente da equação de infiltração de Kostia  
kov.

## 2.2 - Perímetro Molhado

De acordo com o S.C.S - USDA (1979), a água infiltra por unidade de comprimento do sulco é diretamente proporcional a superfície do solo em contato com a água, isto é, ao perímetro molhado. A infiltração, entretanto, ocorre em ambas as direções, vertical e horizontalmente, em contraste com os métodos de inundação e aspersão. Ao perímetro molhado encontrado, o S.C.S -USDA adicionou uma constante empírica para considerar a infiltração horizontal causada pelo gradiente de umidade. Este é chamado perímetro molhado ajustado. A equação apresentada para sulcos e corrugações é a seguinte:

$$P_m = 0,265 (Q.n/S_o^{0,5})^{0,425} + 0,227 \quad (16)$$

onde,  $P_m$  é o perímetro molhado ajustado (m),  $Q$  a taxa de vazão de entrada ( l/s),  $S_o$  é a declividade ou gradiente (m/m), e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Segundo o C.S.C - USDA, o valor de  $P_m$  não deve exceder o espaçamento entre os sulcos.

Em sulcos, como somente parte da superfície do solo está em contato com a água, a taxa de infiltração de verá ser um pouco menor do que no caso de irrigação por inundação. No caso de sulcos profundos e de reduzido espaçamento, o perímetro molhado pode ser comparado ao espaçamento. Mas em sulcos de maior espaçamento o perímetro molhado pode ser a metade, um terço ou uma fração ainda menor do espaçamento. Neste caso o tempo de irrigação tem que prolongar-se para obter a mesma penetração da água entre os sulcos, ainda que as perdas por percolação sejam excessivas (OLITTA,1978).

KARMELI et.al. (1978) concluíram que em irrigação por faixas, a forma do canal não afeta a infiltração, porque a faixa é inteiramente coberta com água. Na irrigação por sulcos, o perímetro molhado (a área de infiltração efetiva) é usualmente menor por unidade de área de campo irrigado que na infiltração por faixas.

A menor seção transversal de escoamento confere algumas características aos sulcos que o diferenciam substancialmente das faixas. Principalmente, as equações necessárias à caracterização dessa geometria, introduzem complicações adicionais ao tratamento hidráulico do processo de escoamento. A variação da lâmina líquida superficial com a distância de escoamento e, conseqüentemente, a quantidade de água filtrada. Esta, não é apenas função do tempo de infiltração, como ocorre nas faixas, mas também da

lâmina superficial. (SCALOPPI, 1986).

Segundo SCALOPPI (1986), a geometria da seção de escoamento tem grande influência na razão de avanço da água na superfície, através de seus efeitos sobre a área de infiltração, resistência ao escoamento e capacidade de armazenamento de água. Quanto menor esta capacidade, maior deverá ser a distância do avanço para acomodar um determinado volume de água introduzido na parcela.

Segundo OLITTA (1978) a forma dos sulcos pode exercer uma influência considerável na eficiência da irrigação. A seção transversal deve ser suficiente para conter a quantidade de água necessária, para uma distribuição uniforme ao longo do comprimento do sulco. O formato depende principalmente do implemento agrícola utilizado, da cultura e do tipo de solo, podendo aproximar-se da forma parabólica, semi-circular, triangular ou trapezoidal.

GRANADO (1971), citado por OLITTA (1978) faz uma comparação entre o perímetro molhado de sulcos em V e em U, com as perdas por percolação profunda, através da relação:

$$\% \text{ perdas} = \frac{P_i - P_f}{P_i + P_f} \cdot 100 \quad (17)$$

onde:  $P_i$  = perímetro molhado no início

$P_f$  = perímetro molhado no final

Graficamente, ele conclui que as perdas por percolação podem alcançar valores muitos altos no caso de sulcos em V e de comprimento muito elevado. O ideal seria que não houvesse variação no perímetro molhado ao longo do sulco.

BERNARDO (1982) afirma que em terrenos com baixa velocidade de infiltração, recomenda-se o uso de sulcos largos e pouco profundos, pois, aumentando o perímetro molhado do sulco, aumenta-se a área de infiltração. Estes sulcos apresentam a forma de U, com profundidade de 15 cm e largura do fundo entre 15 e 25 cm, sendo que sulcos com largura do fundo de 60 cm ou mais, têm sido usado para irrigar pomares, uvas, melão, etc.

SOUZA (1981), LEVIEN (1985) e SCALOPPI (1986) afirmam que em sulcos de forma parabólica, quando  $y$  for muito pequeno em relação a  $B$  (superfície livre da água), o perímetro molhado é aproximadamente igual a largura da superfície livre da água, portanto,

$$P_m \cong B = C y^M \quad (18)$$

Segundo SCALOPPI (1986) os valores de  $C$  e  $M$  normalmente observados na prática, impedem que o perímetro molhado no sulco ( $P_m$ ) seja calculado por soluções diretas. De acordo com este mesmo autor, na maioria das situações, as soluções são aproximadas por integração numérica, o que desaconselha sua determinação sem a utilização de recursos que nem sempre se encontram disponíveis. Deve-se portanto encontrar uma solução aproximada. Seria por exemplo, assumir o perímetro molhado do sulco igual a  $B$ . Evidentemente, a grandeza do erro decorrente dessa aproximação será proporcional as diferenças entre o valor  $M$ . Quanto menor o valor de  $M$ , maior a aproximação entre  $B$  e  $P_m$ , para qualquer valor  $y$ . No caso de faixas, o conceito de unidade

de largura introduzido, resulta na igualdade entre  $B$  e  $P_m$ , e o valor de  $M$  seria zero.

SOUZA (1981) desenvolveu um modelo hidrodinâmico da irrigação por sulcos, considera que o sulco é da forma parabólica, definida pela equação:

$$B = C y^M \quad (19)$$

Na qual  $B$  é a largura do sulco na superfície livre da água, e  $C$  e  $M$  são duas constantes.  $M$  é um fator de forma que pode representar a seção retangular, parabólica convexa ou triangular, se  $M = 0$ ,  $0 < M < 1$  e  $M = 1$ , respectivamente.

Este mesmo autor calcula o perímetro molhado por integração numérica da seguinte expressão:

$$P_m = 2 \int \left[ 1 + \left( \frac{M B}{2 y} \right)^2 \right]^{1/2} dy \quad (20)$$

AMIM (1985) recomenda que as medições da largura da superfície livre da água ( $B$ ) devem seguir a seguinte ordem quando a frente de avanço atingir a 1ª estação, faz-se a medição de  $B$  na estação "zero", quando a frente de avanço atingir a 2ª estação, faz-se as medições de  $B$  na 1ª e na estação "zero", e assim sucessivamente.

MIRONENKO et. al. (1984) citado por FLYNN (1987), num trabalho de seleção de seção transversal ótima para usar em canal de forma parabolica, apresentou algumas relações entre os parâmetros mostrado na FIGURA 3, como apresentado a seguir:

$$L = 4 d \cot \theta \quad (21)$$

$$A = \frac{8 d^2 \cot \theta}{3} \quad (22)$$

$$P_m = 2 d \cot \theta \left\{ \sec \theta + \cot \theta \left[ \ln(\sin \theta + 1) - \ln(\cos \theta) \right] \right\} \quad (23)$$

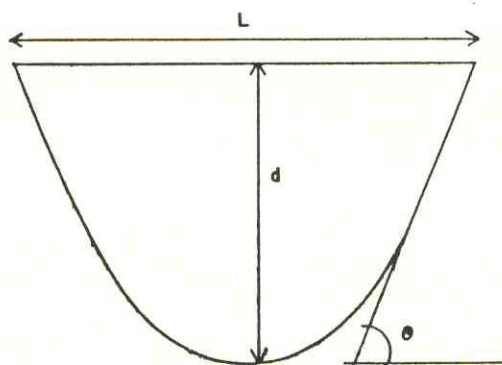


FIGURA 3 - Diagrama de seção transversal para um canal de forma parabólica.

Sendo  $d$  a lâmina normal na cabeceira do sulco, obtido pela equação da Manning e  $\theta$  o ângulo de declinação do arco da parábola.

### 2.3 - Fase de Recessão

KARMEELLI et. al. (1978) definiram a recessão como a fase da irrigação marcada pelo desaparecimento d'água da superfície do solo.

É difícil de predizer exatamente no fim da irrigação por sulcos, a taxa de armazenamento superficial em relação a água total infiltrada que é, em muitos casos, pequena e o tempo de recessão é assumido negligenciável em sua contribuição para a água infiltrada, (KARMEELLI et.al. 1978).

A fase de recessão é o período de tempo que vai do corte do fluxo até o desaparecimento da água da superfície do solo, (I - PAI WU BISHOP, 1970; citado por AUGUSTO, 1984).

A posição de uma ou mais frentes recessivas em função do tempo define a curva de recesso. A duração desta fase depende do volume de água existente na superfície ao término da fase de depleção, das características de infiltração e do gradiente de declive na superfície de escoamento, (SCALOPPI, 1986).

KARMEELLI et. al. (1978) afirmaram que poucos modelos altamente empíricos tem sido sugeridos para estimar recessão.

FOK (1964), citado por KARMEELLI et. al. (1978) propôs uma função de recessão da seguinte forma:

$$x_r = g (t - t_r)^h \quad (24)$$

onde:  $x_r$  = distância da recessão da água medida a partir da cabeceira da faixa em declive;

$t$  = tempo no qual a recessão atinge  $x_r$ ;

$t_r$  = tempo no qual a recessão começa;

$g, h$  = constantes empíricas que são específicas para uma série de condições e podem ser determinadas através de estudos de campo.

A determinação de uma equação que represente a recessão d'água em sulcos é muito mais difícil do que para a fase de avanço por falta de informações sobre a superfície rugosa e infiltração, (WU, 1972; citado por FOK, 1988). Hidraulicamente, é a fase mais complexa do processo de irrigação e, portanto, mais difícil de ser prevista nos tratamentos típicos, (SCALOPPI, 1986).

As condições de fluxo durante a fase de recessão são as mesmas do fluxo de avanço durante uma irrigação, quais sejam, instável, não uniforme e espacialmente variado. A fase de recessão pode ser expressa por uma série de equações diferenciais, dentre elas a equação da continuidade e equação de movimento, (I-PAI WU, 1972; citado por AUGUSTO, 1984).

SU (1962), citado por FOK (1988) considerou o fluxo de recessão em duas partes: vertical e horizontal. Segundo este autor, a recessão vertical ocorre quando a vazão de entrada tem sido cortada, e a água na cabeceira

do sulco começa a desaparecer enquanto a água ainda está avançando no final do sulco, e finaliza quando a água desaparece da superfície do solo na cabeceira do sulco. Enquanto a recessão horizontal, começa quando a água diminui ao longo do comprimento do sulco, mas continua avançando lentamente ao final, e termina quando a água desaparece ao longo do sulco.

A curva de recessão, que relaciona o tempo e a localização da estação onde a água desaparece da superfície do solo, pode ser plotada, mas segundo MERRIAN e KELLER(1978) na irrigação por sulcos ela é usualmente uma linha reta horizontal a não ser que os dados de campo indiquem um significativo afastamento.

O tempo de recessão,  $t_r$ , para sulcos em declive abertos ao final é relativamente de pequena duração e, portanto, tem pouca influência na quantidade de água infiltrada. Em consequência, considera-se a curva de recessão como sendo uma linha reta paralela ao eixo horizontal e o tempo de recessão é omitido dos critérios de projeto para este tipo de sulco, (S.C.S - USDA, 1979).

A curva de recessão para sulcos pode ser considerada, sem muito erro, como uma linha horizontal traçada a partir do tempo em que cessou a vazão aplicada ao sulco. Somente nos sulcos com declividade acima de 0,5%, bem uniformes, é que existem curvas próprias de recessão, (BERNARDO, 1982).

Segundo o S.C.S - USDA (1979), o tempo de recessão é afetado pela vazão, comprimento e forma do sulco, e pela declividade. Em sulcos com declividade a curva de recessão é uma reta paralela ao eixo das abscissas. Quando a declividade é 0,25% este período é tão curto que não afeta a infiltração.

Em sulcos com reduzida seção de escoamento e moderado gradiente de declividade, a fase de recessão é rápida o suficiente para ser considerada desprezível. A medida que aumenta a seção de escoamento e diminui o gradiente de declive e a razão de infiltração, a recessão é mais demorada (SCALOPPI, 1986).

Segundo OLITTA (1978), normalmente a água infiltrada no solo durante o período de recessão é muito pequena, considerando-se o seu desaparecimento por igual em toda a extensão do sulco. SCALOPPI (1986), confirma que durante o tempo de recessão, sua contribuição para a quantidade total de água infiltrada não parece ser significativa. Para simplificar, sua representação pode ser aproximada por uma reta, o que quase sempre não acarreta sérios inconvenientes nos cálculos das lâminas infiltradas ao longo do comprimento da parcela, ao final do processo de irrigação.

GRASSI (1972), citado por OLITTA (1978), demonstrou que em casos especiais de solo pesados, o volume infiltrado durante o período de recessão pode representar até 44% do volume de água infiltrada durante o período de avanço. Este autor, demonstrou que a recessão da água deve ser

considerada quando se aplicam lâminas de reduzida espessura.

Segundo AUGUSTO (1984), ao considerar a recessão instantânea pode-se subestimar o tempo de oportunidade de infiltração e, conseqüentemente, as lâminas infiltradas ao longo dos sulcos, o que neste caso levaria a superestimar a eficiência de aplicação d'água. Este autor recomenda que deve-se plotar as curvas de recessão a partir dos dados obtidos no campo, para que não seja subestimado o tempo de oportunidade de infiltração, principalmente quando se trabalha com solo aluvial.

LEVIEN (1985) determinou a recessão em duas partes: início da recessão,  $t_r$  (recessão na cabeceira do sulco); e recessão ao longo do sulco, de maneira sequencial.

LEVIEN (1985) ao determinar a recessão, a exemplo do que estabeleceu STRELKOFF (1977) para irrigação por faixas, fez a hipótese de que no tempo de corte da água ( $t_{co}$ ), o perfil da superfície da água é aproximado pelo plano ABCD, mostrado na FIGURA 4. A lâmina d'água na cabeceira do sulco,  $Y_0$ , é a lâmina normal no tempo  $t_{co}$  para a vazão  $Q_0$ . A vazão no final do sulco (escoamento superficial),  $Q_1$ , é igual a  $Q_0$  menos o valor de  $Q_{inf}$ , a vazão infiltrada no sulco. Isto permitiu o estabelecimento de algumas hipóteses para facilidade dos cálculos na fase de depleção:

1. A lâmina  $Y_1$ , no final do sulco, é constante e normal para a vazão de escoamento superficial,  $Q_1$ , no

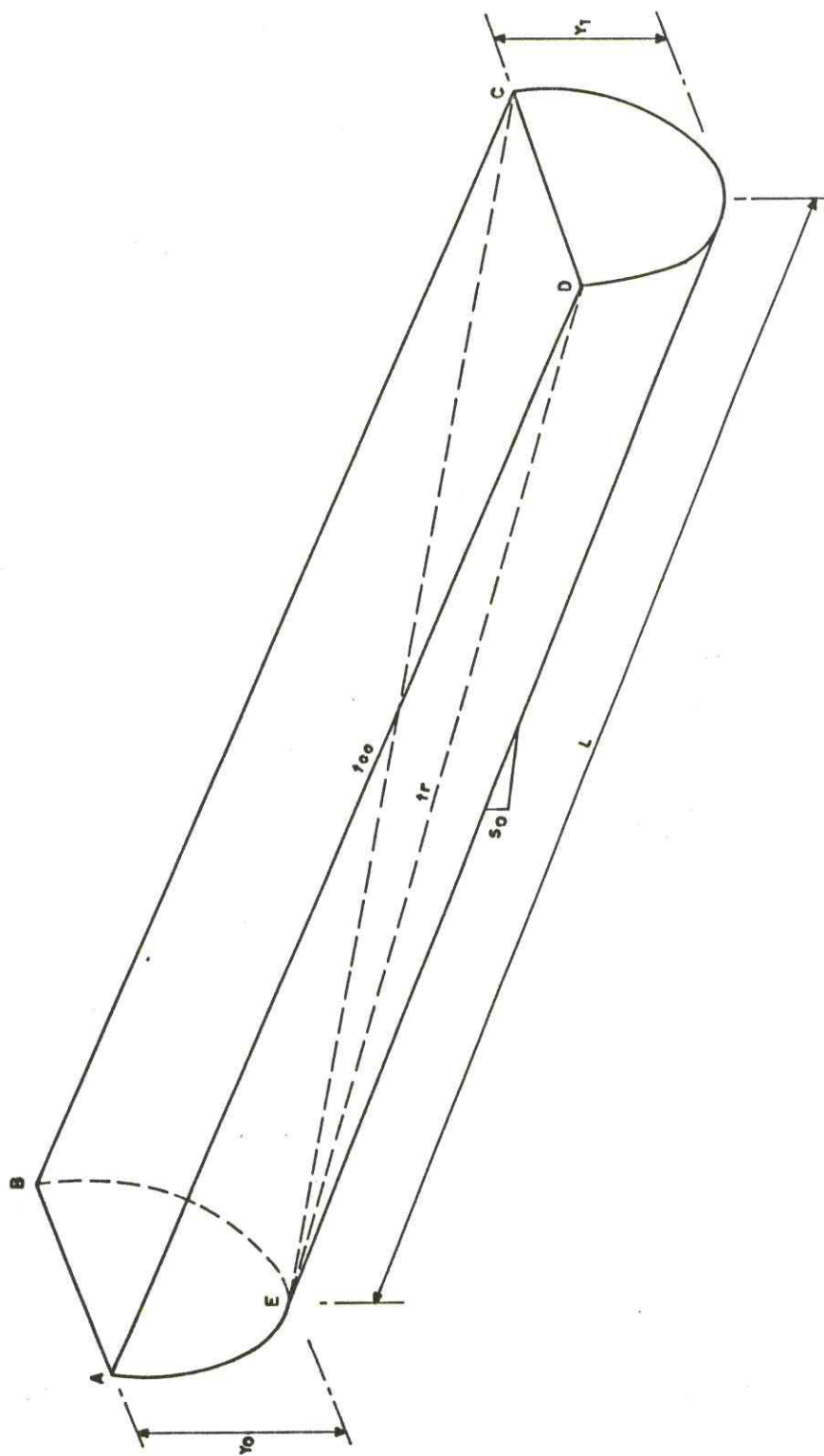


FIGURA 4 - Volume superficial esquemático: fase de depleção.

tempo  $t_r$ , marcando o fim da fase de depleção e o início da recessão;

2. A taxa de escoamento superficial somada a taxa de infiltração é igual a  $Q_0$ , ou seja,

$$Q_l + Q_{inf} = Q_0$$

3. Os perfis superficiais em  $t_r$  e em  $t_{co}$  são planos (CDE e ABCD), como representado na FIGURA 4.

Na cabeceira do sulco a lâmina  $Y_0$  decresce à medida que o volume de água superficial diminui para suprir a infiltração e o escoamento superficial.

Essas hipóteses estabeleceram os meios necessários para LEVIEN (1985) estimar o tempo,  $t_r$ , no qual a lâmina da cabeceira do sulco é reduzida a zero e começa a recessão. A recessão,  $t_r$ , é o tempo requerido para remover o volume ABCDE da FIGURA 4.

Integrando a área da seção transversal, função da lâmina  $y$ , no intervalo  $0 - L$  LEVIEN (1985) obteve para o início da recessão a seguinte equação:

$$t_r = t_{co} + \frac{A_0}{(M + 1)} \cdot \frac{L}{Q_0} \quad (26)$$

onde:  $t_{co}$  = tempo de aplicação d'água;

$A_0$  = área de seção transversal na cabeceira do sulco;

$M$  = constante empírica dependente da forma do sulco;

$L$  = comprimento do sulco;

$Q_o$  = vazão da entrada.

LEVIEN (1985) assumindo a hipótese segundo a qual no início da fase de recessão, a variação da lâmina com a distância é uniforme, ou seja,

$$S_y = \frac{Y_1(t_r)}{L} = \frac{1}{L} Y_n(Q_o) \quad (27)$$

obteve para a curva de recessão a seguinte equação:

$$t = t_r + \frac{S_y}{(M+1) \bar{I} G} \left\{ \left[ 3 (G^{3/2} L)^{1/3} - 3 \text{ ATN } (G^{3/2} L)^{1/3} \right] - \left[ 3 (G^{3/2} \ell)^{1/3} - 3 \text{ ATN } (G^{3/2} \ell)^{1/3} \right] \right\} \quad (28)$$

ONDE:  $t_r$  = início da recessão (recessão na cabeceira do sulco)

$S_y$  = declividade da superfície d'água

$M$  = expoente da equação da superfície livre de água

$\bar{I}$  = taxa de infiltração média do sulco

$G$  = constante

$L$  = comprimento do sulco

$\ell$  = porção inundada do sulco

O dimensionamento de sistemas de irrigação por superfície pode ser desenvolvido através de testes de campo, ou através de simulação, utilizando-se modelos matemáticos usualmente processados em computadores:

Recentemente WALKER (1987) desenvolveu uma metodologia racional e computadorizada de elaboração de projeto de irrigação por superfície. O método racional está fundamentado no conceito de balanço de volume. Segundo RODRIGUEZ (1989), este tem grande vantagem sobre os atuais conceitos teóricos mais avançados hidrodinâmicos e zero-inércia, porque prova a visão dos procedimentos de projetos sem as complicações dessas teorias.

Com a escolha da vazão e tempo de irrigação este método projeta a máxima eficiência de aplicação. A influência de outras variáveis, tais como declividade, comprimento e rugosidade de sulco, e características de infiltração, podem ser determinadas facilmente.

Com base na teoria atualmente publicada na literatura, sobre a elaboração e avaliação de projetos de irrigação superficial, o modelo algébrico apresenta as vantagens de sua simplicidade de aplicação, comparada aos modelos mais avançados, e quanto mais representativos forem os valores atribuídos aos fatores de forma,  $r_y$  e  $r_z$ , ao perímetro molhado,  $P_m$ , e uma boa representação da recessão, este modelo, aproxima-se aos mais complexos como o hidrodinâmico e zero-inércia.

### 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada no presente trabalho para analisar os seguintes aspectos: a) a influência dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial no avanço; b) a influência da recessão sobre a distribuição do perfil de infiltração, e conseqüentemente, na eficiência de aplicação e distribuição da água na irrigação por sulcos; c) a utilização de uma equação para calcular o perímetro molhado e verificar sua influência na avaliação da irrigação por sulcos.

No cálculo do avanço, utilizou-se a equação do balanço de volume para sulcos, apresentada por SOUZA (1981 e 1983). Para tanto, foram utilizados os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, valores estimados e valores calculados de acordo com equações apresentadas por SOUZA (1981) e por FOK e BISHOP (1965).

No estudo da fase de recessão três hipóteses foram analisadas: (1) hipótese I: a recessão ocorre logo que se suspende a aplicação da água no sulco; (2) hipótese II: a recessão ocorre depois de um certo tempo após a suspensão da aplicação de água; (3) hipótese III: a recessão ao longo do sulco ocorre de maneira sequencial nas várias estações de acordo com a equação desenvolvida por LEVIEN (1985).

Na irrigação por sulcos, a área de infiltração é

definida em função da superfície do solo que fica em contato com a água, ou seja, do perímetro molhado. Dependente portanto, da lâmina líquida superficial. Considerando este fato, neste trabalho, foram utilizadas três equações para o cálculo do perímetro molhado: a) caso I: o perímetro molhado é considerado igual a largura da superfície livre da água,  $B = C y^M$ ; b) caso II: o perímetro molhado é calculado pela equação adotada pelo S.C.S - USDA (1980); c) caso III: o perímetro molhado é calculado por uma equação do arco da parábola em função da lâmina normal na cabeceira do sulco e da largura da superfície livre da água do sulco. Estas equações são apresentadas no item (3.3).

Para o cálculo do volume infiltrado, foi considerado que: o volume d'água infiltrado é determinado através do produto da lâmina infiltrada média pelo perímetro molhado e pelo comprimento do sulco.

### 3.1 - Fase de Avanço

No método do balanço de volume, de acordo com KARMELI et. al. (1978), o princípio da conservação da energia é substituído pela hipótese segundo a qual a lâmina superficial é constante. Segundo SOUZA (1981), a equação básica do balanço de volume é expressa do seguinte modo:

$$Q.t = V_y + V_z \quad (34)$$

Onde:  $Q.t$  = volume aplicado, durante o tempo  $t$ ;  
 $V_y$  = volume armazenado na superfície do solo no tempo  $t$ ;  
 $V_z$  = volume infiltrado no tempo  $t$ ;

de modo que:

$$V_y = A_o r_y x_a \quad (35)$$

$$V_z = A_{zo} r_z x_a \quad (36)$$

sendo:  $A_o$  = área da seção transversal do fluxo na entrada do sulco;

$A_{zo}$  = volume infiltrado na cabeceira do sulco por unidade de comprimento;

$r_y, r_z$  = fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial;

$x_a$  = distância para a qual a água avança durante o intervalo de tempo  $t$ ;

substituindo as equações (35) e (36) em (34) e desenvolvendo, SOUZA obteve uma nova expressão que estima o avanço,  $x_a$ , em função dos demais parâmetros:

$$x_a = \frac{Q.t}{A_o.r_y + A_{zo}.r_z} \quad (37)$$

Esta equação será utilizada para estimar o avanço da água. Nos itens seguintes será demonstrado como os diversos parâmetros da equação (37) são calculados.

### 3.1.1 - Fatores de Forma do Perfil Superficial e subsuperficial.

#### a) Estimativa dos fatores de forma

Os valores de  $r_y$  e  $r_z$  são empíricos, sendo estimados para cada condição. Na literatura encontram-se valores entre 0,7 e 0,80 atribuídos a  $r_y$  e  $r_z$ .

Neste trabalho, baseando-se na literatura, atribuí-se dois valores para cada fator de forma,  $r_y$  e  $r_z$ .

$$1. \quad r_{y1} = 0,70 \quad (38)$$

$$r_{z1} = 0,75 \quad (39)$$

$$2. \quad r_{y2} = 0,75 \quad (40)$$

$$r_{z2} = 0,80 \quad (41)$$

Com estes valores foi estudado o efeito das variações dos fatores de forma superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço da água nos sulcos.

#### b) Cálculo dos fatores de forma segundo SOUZA (1981)

Souza, no modelo hidrodinâmico, considera que as equações seguintes podem ser utilizadas para calcular os fatores  $r_y$  e  $r_z$  para a célula situada na extremidade de frente de avanço da água nos sulcos.

$$r_{y3} = \frac{1}{\beta (M + 1) + 1} \quad (14)$$

$$r_{z3} = \frac{1}{\beta M + a + 1} \quad (15)$$

onde:  $\beta$  = constante = 3/7;  
 M = expoente da equação da forma do sulco;  
 a = expoente da equação de infiltração de Kostiakov.

Estes fatores de forma, neste trabalho, são assumidos para toda frente de avanço da água nos sulcos. Isto é, para toda a extensão do sulco.

c) Cálculo dos fatores de forma segundo FOK -BISHOP (1965)

FOK E BISHOP, usaram em sua técnica de balanço de volume para estimar a taxa de avanço em faixa e sulcos, as seguintes equações para os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial,

$$r_{y4} = \frac{1}{1 + h} \quad (8)$$

$$r_{z4} = \frac{F}{a + 1} = h \left[ \frac{1}{h} - \frac{a}{1 + h} + \frac{a(a - 1)}{(2 + h)2!} - \frac{a(a - 1)(a - 2)}{(3 + h)3!} + \dots \right]$$

onde:  $h$  = constante empírica da equação de avanço de FOK - BISHOP (1965)

$$h = e^{-0,6a} \quad (10)$$

sendo:  $a$  = expoente da equação de infiltração de Kostiaikov  
 $F$  = valor obtido do monograma de KIEFER (FIGURA 5)

No presente trabalho, os valores obtidos com estas equações são utilizados para avaliar sua influência sobre o avanço da água nos sulcos.

Para apresentação e análise dos efeitos dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço da água nos sulcos, foram traçados gráficos, onde os seguintes parâmetros foram mantidos constantes, para facilidade da análise: vazão de entrada, tempo, área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco e área infiltrada acumulada. Para o cálculo da área infiltrada acumulada considerou-se o perímetro molhado igual a superfície livre de água,  $B = CY^m$ .

### 3.1.2 - Área da Seção Transversal do fluxo

Para sulcos de forma parabólica (FIGURA 6), a área da seção transversal,  $A_o$ , é dada pela expressão:

$$A_o = \frac{B \cdot Y_n}{(M + 1)} \quad (42)$$

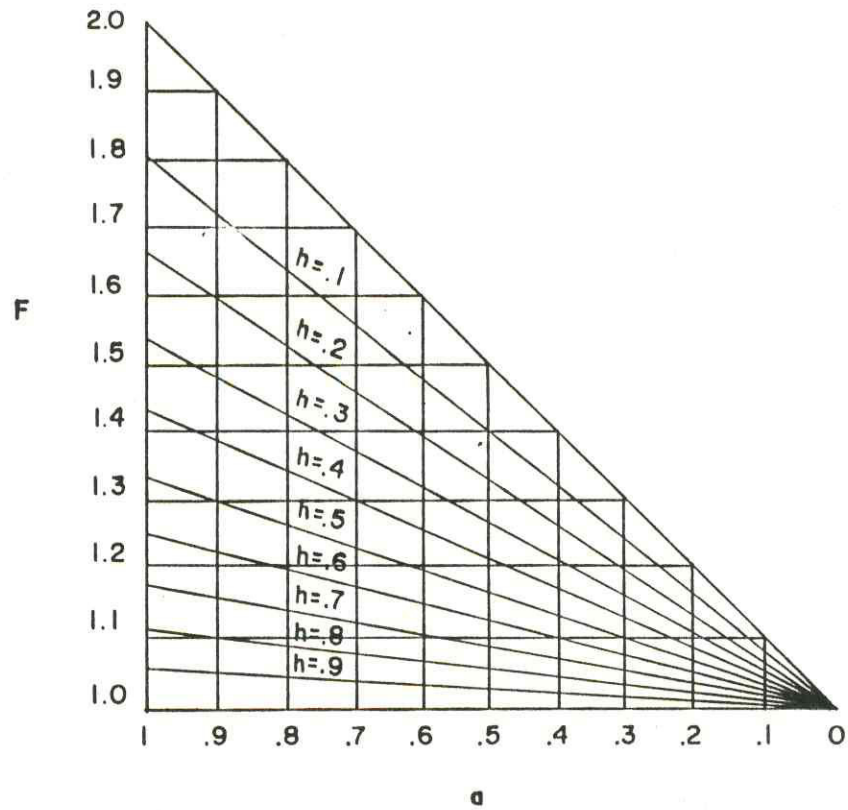


FIGURA 5 - Monograma de Kiefer para obter o F da equação do fator de forma subsuperficial,  $r_z$ .

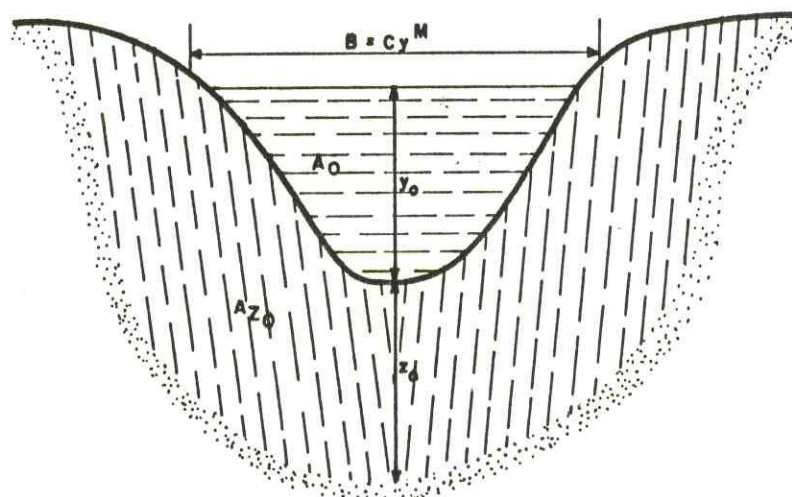


FIGURA 6 - Elemento geométrico da seção transversal parabólica de um sulco de irrigação (após SOUZA, 1983).

em que: 
$$B = c y_n^M \quad (19)$$

onde: B = largura da superfície livre da água

C e M = constantes

$y_n$  = lâmina normal na cabeceira do sulco

A lâmina normal,  $y_n$ , que para um dado sulco é função da vazão Q, ou seja,  $y_n = y_n(Q)$ , é dada pela seguinte expressão baseada na equação de Manning, apresentada por Karmeli, et.al. (1978).

$$y_n = \left[ \frac{Q \cdot n}{C_u S_o} \cdot \frac{(M + 1)^{5/3}}{C} \right]^{\frac{3}{(3M + 5)}} \quad (43)$$

Na qual:

Q = vazão

n = coeficiente de Manning

$S_o$  = declividade do fundo do sulco

$C_u$  = coeficiente dependente do sistema de unidade usando:  $C_u = 1,0$  m/s, no sistema métrico e  $C_u = 1,486$  ft/seg, no sistema inglês.

### 3.1.3 - Área Infiltrada Acumulada

A área infiltrada acumulada foi calculada pela expressão seguinte:

$$A_{ZO} = P_m \cdot z(t) \quad (44)$$

onde:  $P_m$  = perímetro molhado

$z(t)$  = lâmina filtrada acumulada expressa pela equação de Kostiaikov:

$$z(t) = K t^a \quad (45)$$

sendo:  $K$  e  $a$  = são constantes para um dado e um determinado nível de umidade;

$t$  = tempo de infiltração (o tempo que a água esteve em contato com o solo).

O perímetro molhado da equação (44) é estimado de três maneiras diferentes, (casos I, II e III), como dito anteriormente.

### 3.2 - Fase de Recessão

A fase de recessão é marcada pelo desaparecimento da água da superfície do solo. Para alguns autores a recessão ocorre logo que a aplicação da água termina. É possível que a recessão ocorra algum tempo após o término da aplicação de água. LEVIEN (1985) desenvolveu uma equação que determina a recessão na cabeceira do sulco, isto é, o início da curva de recessão. Este autor apresentou também uma equação que determina a recessão para as várias estações ao longo do sulco  $x_t$ . Nos itens seguintes de mostra-se as três hipóteses utilizadas para o cálculo da recessão.

3.2.1 - Tempo de Recessão Igual ao Tempo de Aplicação da Água (Hipótese I).

$$t_r = t_{co} \quad (46)$$

Considera-se que o tempo de recessão é igual ao tempo de aplicação da água, o que significa que a curva de recessão é uma reta paralela ao eixo das abcissas.

3.2.2 - Tempo de Recessão Superior ao Tempo de Aplicação (Hipótese II)

Na cabeceira do sulco, a lâmina  $Y_0$  decresce a medida que o volume de água superficial decresce para suprir a infiltração e o escoamento superficial. Baseando-se nestas hipóteses, LEVIEN (1985) estabeleceu os meios necessários para estimar o tempo,  $t_r$ , no qual a lâmina na cabeceira do sulco reduz-se a zero, e começa a recessão.

Considerando a duração entre o tempo de corte da água,  $t_{co}$ , e o tempo de recessão,  $t_r$ , e admitindo que este seria o tempo necessário para remover o volume ABCDE da FIGURA 4. LEVIEN assumiu que  $y$  varia linear e inversamente com  $x$ , de acordo com a seguinte expressão:

$$y = S_y (L - x) \quad (47)$$

sendo:  $S_y = \frac{Y_o}{L} = \text{constante}$  (48)

Integrando a área da seção transversal,  $A_o$ , nos intervalos de 0 a  $Y_o$ , Levien (1985) obteve a seguinte equação de V (ABCDE):

$$V = \frac{C}{(M+1)} \cdot \frac{L}{Y_o} \cdot \frac{Y^{M+2}}{(M+2)} =$$

$$= \frac{C}{(M+1)(M+2)} Y_o^{M+1} \cdot L \quad (49)$$

Considerando o volume superficial, V, calculado pela equação (49), volume ABCDE da FIGURA 4, e admitindo que o volume drenado e infiltrado entre o tempo de corte,  $t_{co}$  e  $t_r$ , como o volume drenado e infiltrado durante  $(t_r - t_{co})$ , Levien (1985) chegou a seguinte expressão:

Substituindo a equação (50) na equação (49) e reescrevendo tem-se:

$$t_r = t_{co} + \frac{A_o}{(M+2)} \cdot \frac{L}{Q_o} \quad (26)$$

Esta é a equação que determina o início da recessão, ou seja, a recessão na cabeceira do sulco, é considerada neste trabalho como a segunda maneira de estimar a recessão, admitindo que graficamente forma uma reta paralela ao eixo das abcissas.

## 3.2.3 - Curva de Recessão (Hipótese III)

A seguinte equação foi desenvolvida por LEVIEN (1985), para a determinação da curva de recessão. Ele assumiu que a variação da lâmina com a distância é uniforme, e a taxa de infiltração média do sulco igual a média aritmética das taxas de infiltração do início e do final do sulco.

$$t = t_r + \frac{S_y}{(M + 1) \bar{I} \cdot G^{3/2}} \left\{ \left[ 3(G^{3/2} \cdot L)^{1/3} - 3 \text{ ATN}(G^{3/2} \cdot L)^{1/3} \right] - \left[ 3(G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} - 3 \text{ ATN}(G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} \right] \right\} \quad (28)$$

Sendo:

$t$  = tempo no qual a água desaparece no ponto  $x_r$

$L$  = comprimento do sulco

$t_r$  = tempo de início da recessão

$\bar{I}$  = taxa de infiltração média

$S_y$  = declividade da superfície da água

$$\bar{I} = \frac{I(t_r) + I(t_r - t_{av})}{2} \quad (51)$$

$\ell$  = porção inundada da faixa

$G$  = constante

$$G = \frac{C_{u s_o}^{1/2} \cdot S_y^{5/3}}{n \cdot \bar{I}}$$

A equação (28) foi utilizada para o cálculo da curva de recessão, que é a hipótese III do presente trabalho.

### 3.3 - Perímetro Molhado

Como foi estabelecido anteriormente, devido a complexidade da geometria do sulco, neste trabalho foram consideradas três equações para o cálculo do perímetro molhado.

Considera-se que o sulco é de forma parabólica, FIGURA 6, definida pela equação:

$$B = C y^M \quad (19)$$

na qual B é a largura do sulco na superfície livre da água, C e M são duas constantes. M é um fator que pode representar a seção retangular, parabólica e triangular, se  $M = 0$ ,  $0 < M < 1$  e  $M = 1$ , respectivamente.

#### 3.3.1 - Perímetro Molhado igual a Superfície Livre da Água (Caso I)

Segundo alguns autores, quando a lâmina d'água,  $y$ , for muito pequena em relação a  $B$ , o perímetro molhado pode ser aproximado por  $B$ . Logo,

$$P_m \cong B = Cy^M \quad (18)$$

### 3.3.2 - Perímetro Molhado Calculado pela Equação do S.C.S- USDA (Caso II)

O perímetro molhado é calculado pela seguinte equação:

$$P_m = 0,265(Q.n/S^{0,5})^{0,425} + 0,227 \quad (16)$$

onde:  $P_m$  = perímetro molhado ajustado, em m;

$Q$  = vazão  $\ell/s$ ;

$S$  = gradiente hidráulico, m/m;

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning.

### 3.3.3 - Perímetro Molhado igual ao Arco de Uma Parábola (Caso III)

Assume-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola.

Como o sulco é de forma parabólica; pode-se determinar o comprimento do arco da parábola e assumir que este é

o perímetro molhado do sulco. Seja a seguinte FIGURA 7 parabólica:

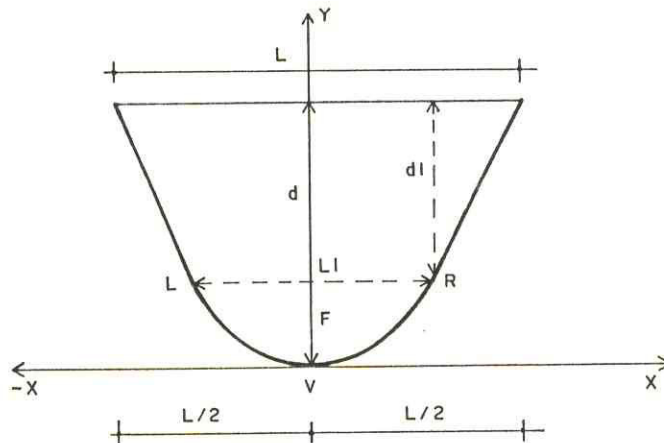


FIGURA 7 - Arco de uma Parábola

sendo :  $x^2 = a y$  (53)

A distância do vértice ao foco, é  $VF = \frac{1}{4}a$ ; a corda focal mínima é  $LR = a$ .

O comprimento do arco,  $s$ , pode ser calculado como:

$$s = \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (54)$$

como,  $a \cdot y = x^2$  então  $y' = \frac{2 \cdot x}{a}$  (55)

utilizando a identidade,

$$\sec^2 \theta = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} \quad (56)$$

no intervalo,  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$

e considerando  $u = \operatorname{tg} \theta = \frac{2 \cdot x}{a}$ , cuja derivada é (57)

$$dx = \frac{a}{2} \sec^2 \theta \, d\theta, \quad (58)$$

tem-se,

$$s = \int_0^{\ell/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} \, dx = \frac{a}{2} \int \sec^3 \theta \, d\theta \quad (59)$$

Integrando por partes e admitindo os dois lados do arco, obtem-se a seguinte equação:

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{\ell^2 + 16d^2} + \frac{\ell^2}{8d} \operatorname{Ln} \left( \frac{4d + \sqrt{\ell^2 + 16d^2}}{\ell} \right) \quad (60)$$

Para o comprimento do arco da parábola determina-se, admitindo-se  $d = y_0$  e a largura  $\ell = B$ , e substituindo esses valores na equação (60), resulta a equação do perímetro molhado função da lâmina normal ( $y_0$ ) e da superfície livre da água B.

$$P_m = 1/2 \sqrt{B^2 + 16y_0^2} + \frac{B^2}{8y_0} \operatorname{Ln} \left( \frac{4y_0 + \sqrt{B^2 + 16y_0^2}}{B} \right) \quad (61)$$

onde:  $P_m$  = perímetro molhado função de B e  $y_0$ ;  
 B = superfície livre da água,  $B = C y^M$ ;  
 $y_0$  = lâmina normal na cabeceira do sulco.

### 3.4 - Volume Infiltrado

O volume infiltrado é obtido pela seguinte equação:

$$V_z = \frac{z(t_r) + z(t_r - t_{av})}{2} P_m \cdot L \quad (62)$$

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar o efeito dos fatores de forma de perfil superficial ( $r_{y1}$ ,  $r_{y2}$ ,  $r_{y3}$ ,  $r_{y4}$ ) e subsuperficial ( $r_{z1}$ ,  $r_{z2}$ ,  $r_{z3}$  e  $r_{z4}$ ), da curva de recessão, e do perímetro molhado sobre a performance de um sistema de irrigação por sulcos abertos em declive, foram utilizados dados de campo obtidos em experimentos realizados por Ramsey (1976), e pelo Departamento de Agricultura e Engenharia Química do Estado do Colorado (1979), em três diferentes localidades (Horticulture, Stieben e Benson). Estes dados foram escolhidos pela acuracidade com que foram obtidos e por representarem condições diversas em relação aos vários parâmetros. A TABELA 1 apresenta os dados de vazão ( $Q_0$ ), declividade ( $S_0$ ), comprimento de sulco (L), tempo de irrigação ( $t_{co}$ ), características de infiltração (k e a), rugosidade (fator de Manning, n) e espaçamento dos sulcos (E), as constantes C e M da equação da largura da superfície livre d'água.

Alguns dos parâmetros para a análise nos exemplos 1 e 2 foram citados por SOUZA (1981) a partir das informações de campo. Os parâmetros estimados são as constantes C e M da equação da largura da superfície livre d'água,  $B = C y^M$ , o coeficiente n de Manning, e as constantes a e K da equação de infiltração de Kostiakov. No exemplo 3 alguns

TABELA 1 - Dados de campo utilizados na análise da irrigação por sulcos.

Parâmetros	E X E M P L O S			
	Nº 1 Ramsey	Nº 2 Horticulture	Nº 3 Stieben	Nº 4 Benson
$Q_o$ (l/s)	1,33	0,81	0,59	1,61
$S_o$ (m/m)	0,001032	0,0036	0,0098	0,0045
L (m)	100	175	350	625
$t_{co}$ (min)	208	202	696	698
$K$ (cm/min <sup>a</sup> )	0,98	0,77	$8,17 \times 10^{-3}$	0,39
a	0,50	0,55	0,87	0,44
n	0,022	0,020	0,15	0,25
E (m)	1,00	1,12	1,12	1,54
C	1,091	0,61	1,9087	1,307
M	0,4539	0,22	0,5445	0,4498

dados foram estimados pelo autor com as informações de campo. Os parâmetros estimados são as constantes K e a da equação de infiltração de Kostiaikov, os quais foram processados pela metodologia estabelecida por CRIDDLE et. al. (1956). Outros parâmetros foram calculados por LEVIEN (1985) como as constantes C e M da equação que expressa a forma do sulco, e o coeficiente de rugosidade de Manning n. No exemplo 4 o autor estimou através de informações obtidas no campo as constantes C e M da equação da forma do sulco, e as constantes K e a da equação de infiltração de Kostiaikov, foram determinadas pelo mesmo processo que no exemplo 3. Para o coeficiente de rugosidade de Manning, n, foi utilizado o valor 0,25 baseado em tabela fornecida pelo S.C.S - USDA, para culturas cultivadas em linhas relativamente próximas (TABELA 2).

#### 4.1 - Efeito dos Fatores de Forma do Perfil Superficial e Subsuperficial Sobre o Avanço

Para estudar a influência dos fatores de forma sobre a curva de avanço foram utilizados valores estimados e calculados, os quais são apresentados na TABELA 3. Os fatores de forma estimados são constantes para os quatro exemplos analisados, isto é,  $r_{y1} = 0,70$ ;  $r_{z1} = 0,75$ ;  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ .

Os fatores de forma calculados  $r_{y3}$  e  $r_{z3}$  (equações

TABELA 2 - Valores de n em função da condição da superfície de escoamento (S.C.S, 1974)

n	Condições de Superfície de escoamento (*)
0,04	Sistematizada com boa acabamento superficial e culturas em linhas relativamente espaçadas irrigadas por faixas em nível.
0,10	Cereais cultivados em linhas relativamente próximas dispostas longitudinalmente à direção de escoamento.
0,15	Cereais cultivados a lanço, alfafa e outras culturas semelhantes.
0,25	Cereais cultivados em linhas relativamente próximas dispostas transversalmente a direção de escoamento, culturas forrageiras com crescimento rasteiro, e outras culturas semelhantes.

(\*) extraído do Programa Nacional de Irrigação. Curso de elaboração de projetos de irrigação. Brasília, PNI/Fundação CTH, 1986.

TABELA 3 - Fatores de Forma superficial ( $r_y$ ) e subsuperficial ( $r_z$ ) estimados, e os encontrados com a equação de SOUZA, e com a equação de FOK-BISHOP.

Exemplos	ESTIMADOS				(SOUZA, 1981)		(FOK-BISHOP, 1965)	
	$r_{y1}$	$r_{z1}$	$r_{y2}$	$r_{z2}$	$r_{y3}$	$r_{z3}$	$r_{y4}$	$r_{z4}$
(Ramsey)	0,70	0,75	0,75	0,80	0,61	0,59	0,54	0,77
(Horticulture)	0,70	0,75	0,75	0,80	0,66	0,61	0,57	0,74
(Stieben)	0,70	0,75	0,75	0,80	0,60	0,48	0,53	0,57
(Benson)	0,70	0,75	0,75	0,80	0,62	0,61	0,51	0,71

14 e 15) apresentaram valores semelhantes para os diferentes exemplos, porém muito inferiores aos valores estimados. Neste caso,  $r_{y3}$  variou entre 0,60 e 0,66, enquanto  $r_{z3}$  variou entre 0,48 e 0,61.

Os fatores calculados com as equações 8 e 9,  $r_{y4}$  e  $r_{z4}$  (propostas por FOK e BISHOP, 1965) apresentaram valores aproximados nos quatro exemplos, para o perfil superficial,  $r_{y4}$ , porém muito inferiores aos valores estimados. No entanto, os valores do perfil subsuperficial,  $r_{z4}$  tendem a ser comparáveis aos valores estimados.

Há uma excessão para o exemplo 3. Neste caso,  $r_{y4}$  variou entre 0,51 e 0,57, enquanto  $r_{z4}$  variou entre 0,57 e 0,77.

O fator de forma  $r_y$  representa a relação entre a área (ou o volume de água) do perfil superficial e o respectivo retângulo circunscrito, enquanto que o fator de forma  $r_z$  é a relação entre a área (volume infiltrado) do perfil subsuperficial e o retângulo circunscrito. Desse modo, um valor de  $r_y$  igual a 0,50, por exemplo, representaria uma forma triangular para o avanço da água, enquanto se  $r_y$  fosse igual a 1,0, o avanço seria retangular, o que é fisicamente impossível.

Da TABELA 3, observa-se que os valores de  $r_{y3}$  e  $r_{z3}$  obtidos para o exemplo 3, são, respectivamente, 0,60 e 0,48. Isto indica que a utilização da equação 14 para calcular  $r_{y3}$ , implica em que o avanço apresenta uma forma próxima a triangular. Por outro lado, o perfil de infiltração deveria ser triangular. A consequência fundamental deste resultado é que as distâncias de avanço calculadas pelo

modelo de LEVIEN, com  $r_{y3}$  e  $r_{z3}$ , deverão ser muito maiores considerando o mesmo tempo, quando comparados com aqueles calculados com os valores estimados,  $r_{y1}$  e  $r_{z1}$ . Este fato baseia-se no princípio do balanço de volume, que é o fundamento do modelo algébrico (LEVIEN, 1985).

É importante observar que as equações 14 e 15 foram impostas por SOUZA (1981) para calcular os fatores de forma para a célula na extremidade da frente de avanço de um modelo hidrodinâmico, cuja solução matemática é baseada no cálculo numérico, para intervalos de tempo muito pequenos.

No presente caso, estas equações estão sendo utilizadas para todo o perfil de um avanço em um tempo relativamente grande.

A aplicação da equação 8 para o cálculo de  $r_{y4}$  mostra que o perfil superficial é, aproximadamente, triangular. No entanto, a equação 9 apresenta uma melhor estimativa para a forma do perfil infiltrado. Apenas no caso do exemplo 3 ( $r_{z4} = 0,57$ ; TABELA 3) o perfil infiltrado se aproxima da forma triangular.

É importante observar que os valores de  $r_{y3}$  e  $r_{y4}$ ,  $r_{z3}$  e  $r_{z4}$  calculados para os vários exemplos são menores do que os valores estimados ( $r_{y1} = 0,70$  e  $r_{z1} = 0,75$ ;  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ ) adotados pelo autor. Isto implica em distâncias de avanço maiores, para o mesmo tempo, devido ao princípio de balanço de volume.

As FIGURAS 8, 9, 10 e 11 apresentam as curvas de avanço medidas no campo e calculadas para os quatro

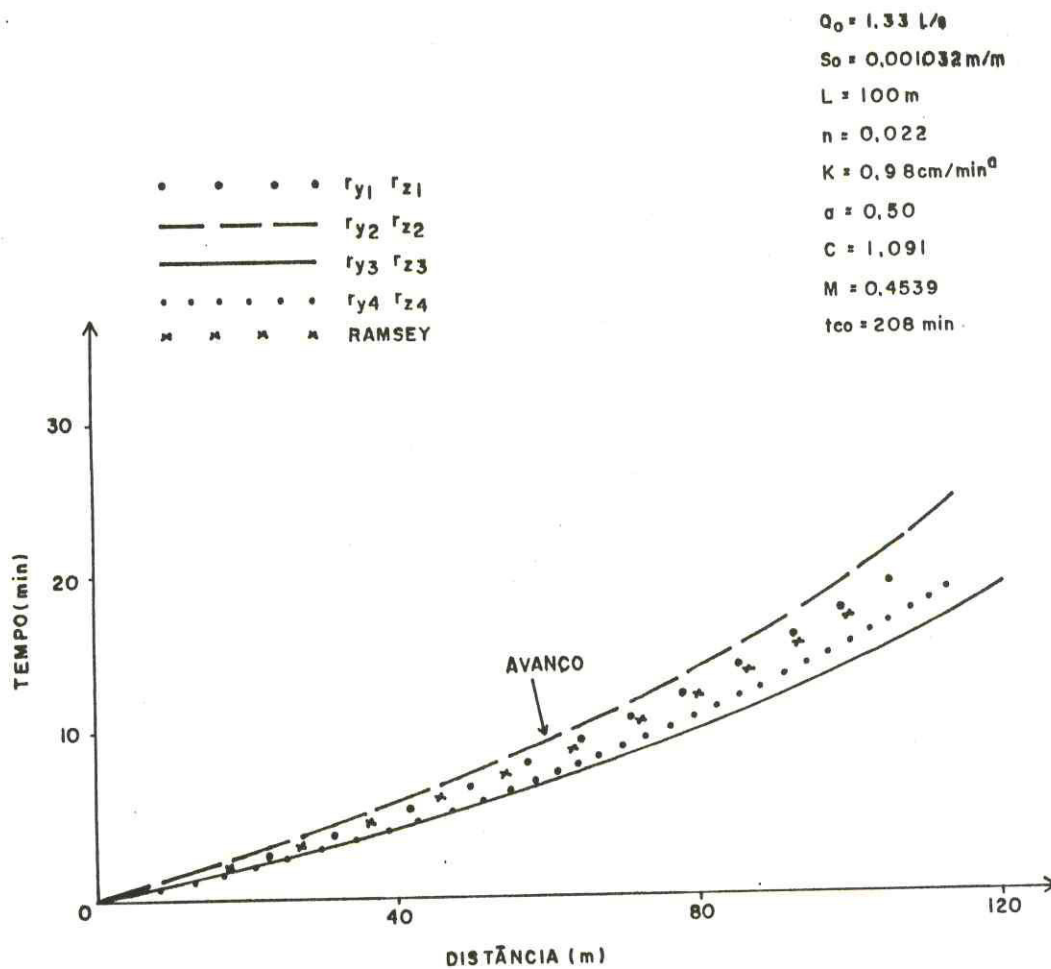


FIGURA 8 - Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico, com fatores de forma variados comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulco com comprimento de 100m.

TABELA 4 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y1} = 0,70$  e  $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Ramsey).

Distância (m)	Avanço (min)
9,72	1,0
17,67	2,0
31,32	4,0
37,43	5,0
48,70	7,0
63,87	10,0
86,11	15,0
98,16	18,0
100,10	18,5

TABELA 5 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Ramsey).

Distância (m)	Avanço (min)
9,08	1,0
16,52	2,0
29,28	4,0
35,00	5,0
45,54	7,0
59,75	10,0
80,57	15,0
98,99	20,0
115,73	25,0

TABELA 6 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos utilizando  $r_{y3} = 0,616$  e  $r_{z3} = 0,590$ . (dados de Ransey).

Distância (m)	Avanço (min)
11,33	1,0
20,76	2,0
37,12	4,0
44,50	5,0
58,16	7,0
76,66	10,0
103,94	15,0

TABELA 7 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos utilizando  $r_{y4} = 0,54$  e  $r_{z4} = 0,77$ . (dados de Ramsey).

Distância (m)	Avanço (min)
11,67	1,0
20,78	2,0
35,78	4,0
42,66	5,0
54,84	7,0
71,02	10,0
94,39	15,0
98,67	16,0
100,77	16,5
114,82	20,0
133,24	25,0

TABELA 8 - Dados de avanço e recessão de Ramsey.

---

---

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0,00	0,00	215,0
9,09	1,05	225,0
18,18	2,35	230,0
27,27	3,60	230,0
36,36	5,00	230,0
45,45	6,50	231,0
54,54	8,05	232,0
63,64	9,65	233,0
72,73	11,55	234,0
81,82	13,60	233,0
90,91	15,65	233,0
100,00	17,95	234,0

---

TABELA 9 - Avanço e recessão calculado pelo modelo hidrodinâmico não linear da irrigação por sulco (dados de Ramsey).

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0,00	0,0	218,0
10,59	1,0	221,0
20,08	2,0	224,0
27,05	3,0	225,0
32,88	4,0	228,0
38,54	5,0	230,0
43,97	6,0	232,0
49,24	7,0	233,5
54,24	8,0	235,0
59,09	9,0	236,0
63,64	10,0	237,0
68,33	11,0	238,0
72,79	12,0	239,0
77,06	13,0	240,0
81,27	14,0	241,0
85,36	15,0	242,0
89,39	16,0	243,0
93,33	17,0	244,0
100,97	19,0	244,0

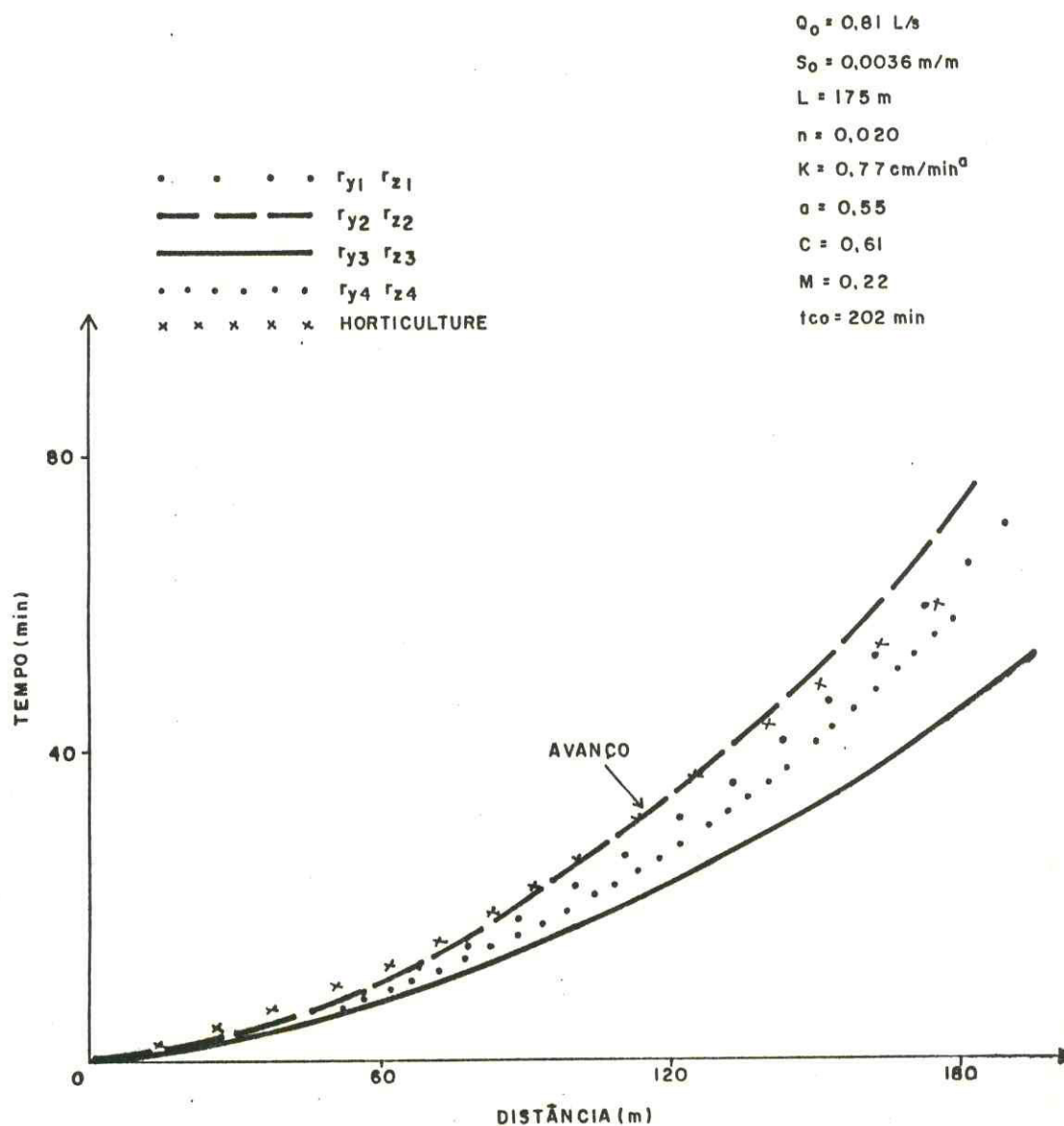


FIGURA 9 - Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico, com fatores de forma variados, comparados com dados observados (dados de Horticulture), sulco com com primento de 175m.

TABELA 10 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos utilizando  $r_{y1} = 0,70$  e  $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Horticulture).

Distância (m)	Avanço (min)
31,76	4,0
46,80	7,0
59,22	10,0
76,56	15,0
91,26	20,0
115,93	30,0
136,62	40,0
154,75	50,0
171,03	60,0
175,25	63,0
176,74	64,0
178,24	65,0
185,93	70,0

TABELA 11 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos utilizando  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ , (dados de Horticulture).

Distância (m)	Avanço (min)
17,77	2,0
29,71	4,0
43,80	7,0
55,43	10,0
71,67	15,0
85,45	20,0
97,60	25,0
108,57	30,0
118,63	35,0
127,97	40,0
136,71	45,0
144,95	50,0
152,77	55,0
160,22	60,0
167,34	65,0
174,18	70,0
180,76	75,0

TABELA - 12 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y3} = 0,66$  e  $r_{z3} = 0,61$ . (dados de Horticulture).

Distância (m)	Avanço (min)
21,41	2,0
36,27	4,0
54,06	7,0
68,88	10,0
89,72	15,0
107,48	20,0
123,20	25,0
137,42	30,0
150,48	35,0
162,63	40,0
174,01	45,0
184,75	50,0

TABELA 13 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y4} = 0,57$  e  $r_{z4} = 0,74$ . (dados de Horticulture).

Distância (m)	Avanço (min)
21,42	2,0
35,13	4,0
51,04	7,0
64,03	10,0
82,02	15,0
97,18	20,0
122,50	30,0
143,66	40,0
162,14	50,0
178,73	60,0

TABELA 14 - Dados de avanço e recessão do Colorado.

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

TABELA 15 - Avanço e recessão calculados pelo modelo hidrodinâmico não linear da irrigação por sulcos. (dados do Colorado - "Horticulture- Farm").

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0,00	0,0	206,0
15,46	2,0	206,0
28,76	4,0	206,0
39,33	6,0	206,0
48,27	8,0	206,0
57,05	10,0	206,0
64,98	12,0	206,0
72,10	14,0	206,0
78,68	16,0	206,0
84,94	18,0	206,0
90,81	20,0	206,0
96,35	22,0	206,0
101,60	24,0	206,0
106,70	26,0	206,0
111,50	28,0	206,0
116,20	30,0	206,0
120,70	32,0	206,0
125,00	34,0	206,0
129,20	36,0	206,0
133,20	38,0	206,0
137,20	40,0	206,0
141,00	42,0	206,0
144,80	44,0	206,0
148,40	46,0	206,0
152,00	48,0	206,0
155,00	50,0	206,0
158,90	52,0	206,0
162,20	54,0	206,0
165,40	56,0	206,0
168,60	58,0	206,0
171,80	60,0	206,0
174,80	62,0	206,0
177,90	64,0	206,0

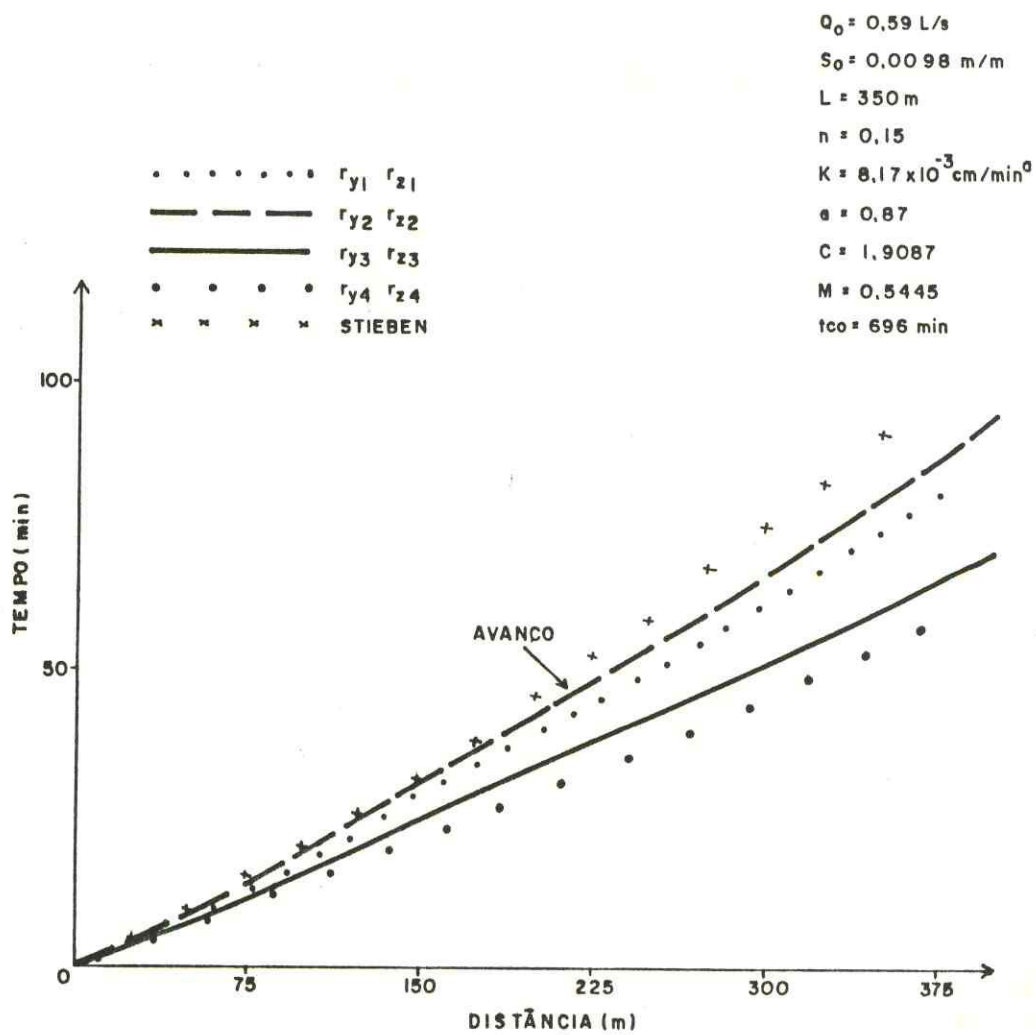


FIGURA 10 - Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico com fatores de forma variados comparados com dados observados ( dados de Stieben), sulcos com comprimento de 350m.

TABELA 16 - Avanço calculado pelo modelo algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y1} = 0,70$  e  $r_{z1} = 0,75$ . (dados de Stieben).

Distância (m)	Avanço (min)
25,63	5,0
50,74	10,0
99,62	20,0
146,92	30,0
192,79	40,0
237,34	50,0
280,69	60,0
322,90	70,0
364,04	80,0
367,86	81,0
371,90	82,0
376,06	83,0

TABELA 17 - Avanço calculado pelo modelo algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ . (dados de Stieben).

---

---

Distância (m)	Avanço (min)
4,82	1,0
23,81	5,0
46,95	10,0
69,50	15,0
91,54	20,0
113,08	25,0
134,17	30,0
154,82	35,0
175,06	40,0
214,39	50,0
252,29	60,0
288,86	70,0
324,21	80,0
358,43	90,0

---

TABELA 18 - Avanço calculado pelo método algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y3} = 0,602$  e  $r_{z3} = 0,476$  (dados de Stieben).

Distância (m)	Avanço (min)
6,02	1,0
29,79	5,0
58,96	10,0
87,58	15,0
115,70	20,0
143,35	25,0
170,55	30,0
197,33	35,0
223,70	40,0
275,29	50,0
325,44	60,0
374,24	70,0

TABELA 19 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irri  
ção por sulcos utilizando  $r_{y4} = 0,53$  e  $r_{z4} = 0,57$ .  
(dados de Stieben).

Distância (m)	Avanço (min)
6,83	1,0
33,85	5,0
67,01	10,0
99,56	15,0
131,55	20,0
163,02	25,0
194,00	30,0
224,50	35,0
254,56	40,0
313,38	50,0
370,59	60,0

TABELA 20 - Dados de avanço e recessão de "Stieben Farm".

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0,0	0,0	698,0
25,0	5,0	703,0
50,0	10,0	705,0
75,0	16,0	708,0
100,0	21,0	712,0
125,0	27,0	716,0
150,0	33,0	718,0
175,0	40,0	720,5
200,0	48,0	722,5
225,0	55,0	723,5
250,0	61,0	724,5
275,0	70,0	725,5
300,0	77,0	727,0
325,0	85,0	729,0
350,0	94,0	731,0

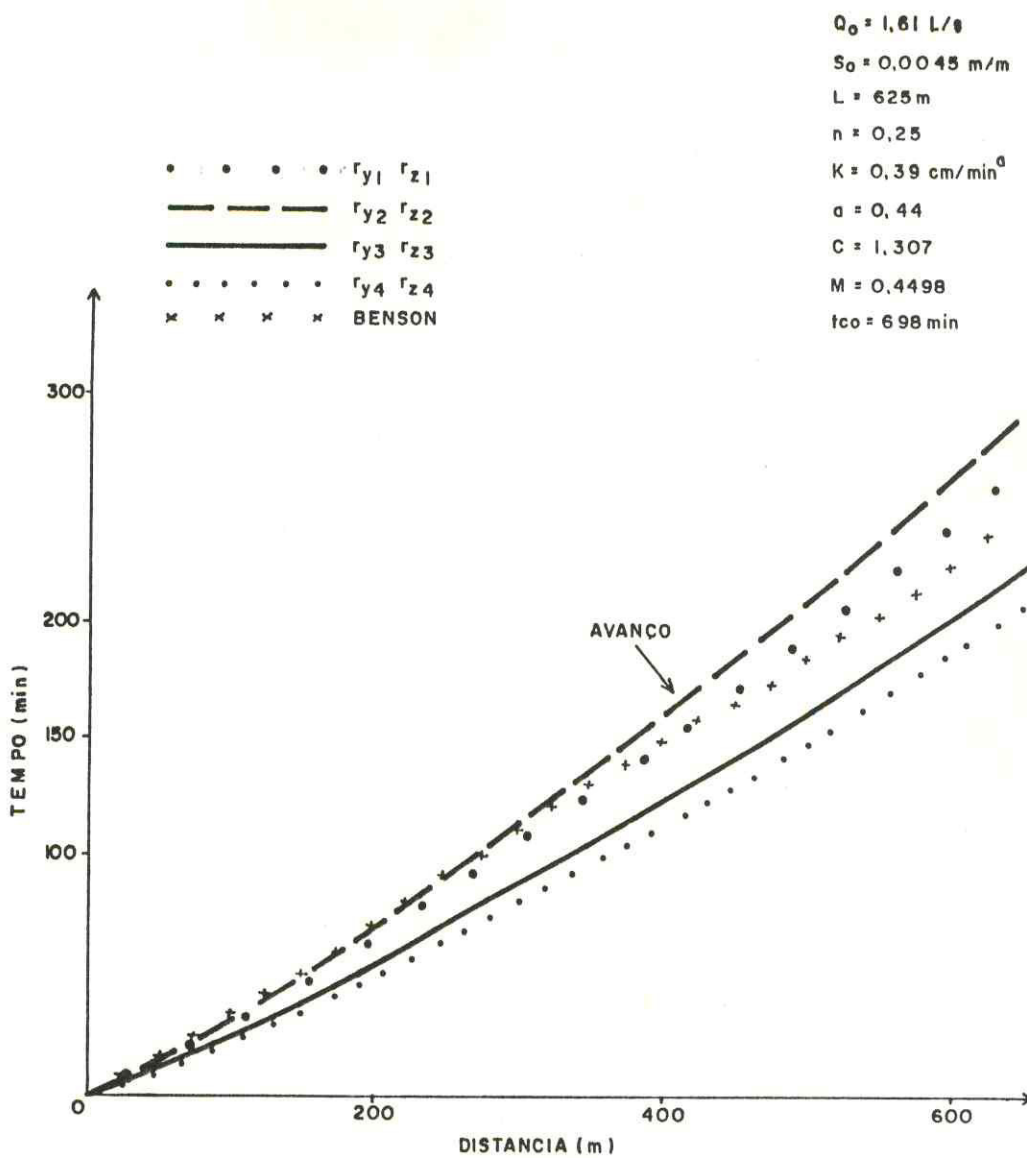


FIGURA 11 - Curvas de avanço calculadas pelo modelo algébrico com fatores de forma variados comparados com dados observados ( dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m.

TABELA 21 - Avanço calculado pelo modelo algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y1} = 0,70$  e  $r_{z1} = 0,75$ , (dados de Benson)

Distância (m)	Avanço (min)
17,91	5,0
34,52	10,0
65,80	20,0
123,71	40,0
177,63	60,0
228,77	80,0
277,73	100,0
324,92	120,0
370,62	140,0
415,01	160,0
458,25	180,0
500,48	200,0
541,78	220,0
582,23	240,0
621,92	260,0
621,83	261,0

TABELA 22 - Avanço calculado pelo modelo algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$  (dados de Benson).

Distância (m)	Avanço (min)
10,25	-
16,72	5,0
32,24	10,0
61,46	20,0
115,56	40,0
165,98	60,0
213,79	80,0
259,57	100,0
303,70	120,0
346,43	140,0
387,94	160,0
428,40	180,0
467,89	200,0
506,52	220,0
544,37	240,0
581,50	260,0
617,96	280,0
635,96	290,0

TABELA 23 - Avanço calculado pelo modelo algébrico de irrigação por sulcos, utilizando  $r_{y3} = 0,617$  e  $r_{z3} = 0,611$ . (dados de Benson).

---

---

Distância (m)	Avanço (min)
20,48	5,0
39,57	10,0
75,67	20,0
142,80	40,0
205,58	60,0
265,27	80,0
322,56	100,0
377,88	120,0
431,53	140,0
483,71	160,0
534,62	180,0
584,37	200,0
633,09	220,0

---

TABELA 24 - Avanço calculado pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, utilizando  $r_{z4} = 0,71$  e  $r_{y4} = 0,51$ , (dados de Benson).

Distância (m)	Avanço (min)
23,83	5,0
45,51	10,0
85,76	20,0
159,0	40,0
226,21	60,0
289,31	80,0
349,25	100,0
406,65	120,0
461,93	140,0
515,38	160,0
567,25	180,0
617,70	200,0
666,89	220,0

TABELA - 25 - Dados de Avanço e Recessão de Benson Farm.

Distância (m)	Avanço (min)	Recessão (min)
0,0	0,0	698,6
25,0	9,0	-
50,0	18,3	707,0
75,0	27,6	-
100,0	36,3	713,0
125,0	45,0	-
150,0	53,3	717,8
175,0	62,6	-
200,0	73,5	722,5
225,0	83,2	-
250,0	93,3	725,5
275,0	103,7	-
300,0	115,0	728,5
325,0	125,4	-
350,0	135,3	732,5
375,0	144,0	-
400,0	153,3	734,5
425,0	162,0	-
450,0	171,1	737,0
475,0	179,3	-
500,0	188,8	739,9
525,0	199,2	-
550,0	208,5	741,3
575,0	218,4	-
600,0	229,3	744,5
625,0	243,5	746,6

exemplos estudados, e servem para mostrar o efeito dos fatores de forma do perfil superficial ( $r_{y1}$ ,  $r_{y2}$ ,  $r_{y3}$  e  $r_{y4}$ ) e subsuperficial ( $r_{z1}$ ,  $r_{z2}$ ,  $r_{z3}$  e  $r_{z4}$ ) sobre a distância de avanço da água nos sulcos abertos em declive.

Observando-se estas figuras nota-se que o tempo final de avanço tende a superestimar os dados de campo, quando utiliza-se a equação da distância de avanço de LEVIEN (1985), com os fatores estimados,  $r_{y1}$ ,  $r_{z1}$  e  $r_{y2}$ ,  $r_{z2}$ . Entretanto, nota-se que essa diferença diminui gradualmente com a redução da distância.

Com relação a distância de avanço calculada com  $r_{y3}$  e  $r_{z3}$ , nota-se nas FIGURAS 8, 9, 10 e 11 que o tempo do avanço é subestimado quando comparado aos dados obtidos em campo. Observa-se que a medida que se aproxima-se da cabeceira do sulco essa diferença decresce mas sempre com valores subestimados de tempo para uma mesma distância.

No caso dos exemplos 1 e 2 pode-se observar que o tempo final do avanço calculado com  $r_{y4}$  e  $r_{z4}$ , propostos por FOK-BISHOP (1965), é subestimado em 8,6% e 5,7%, respectivamente. Enquanto que nos exemplos 3 e 4 o tempo final do avanço é subestimado em aproximadamente 39% e 15%, respectivamente.

Com relação as quatro curvas de avanço calculadas com o modelo de LEVIEN (1985), para os quatro exemplos estudados as que mais se aproximam aos dados de campo são as obtidas com os fatores de forma estimados ( $r_{y1} = 0,70$ ;  $r_{z1} = 0,75$ ;  $r_{y2} = 0,75$  e  $r_{z2} = 0,80$ ).

Os melhores resultados são obtidos com  $r_{y1} = 0,70$

e  $r_{z1} = 0,75$ . Os valores estimados para os fatores de forma são muito utilizados na literatura e de acordo com SCALOPPI o valor de  $r_y$  deve situar-se entre 0,70 e 0,80.

Deve-se continuar estudando o efeito dos fatores de forma sobre o avanço da água em sulcos.

#### 4.2 - Efeito da Recessão Sobre o Perfil de Infiltração da Irrigação por Sulcos

No estudo da influência da recessão sobre a distribuição do perfil de infiltração, e, conseqüentemente, sobre a eficiência de irrigação foram utilizados três hipóteses, aqui tratadas do seguinte modo:  $R_1$ , a recessão é uma reta paralela ao eixo das abscissas, sendo  $t_r = t_{co}$ , onde  $t_{co}$  é o tempo de aplicação;  $R_2$ , é a recessão na cabeceira do sulco dada pela equação 26, sendo, portanto, uma reta paralela ao eixo das abscissas; e  $R_3$ , a recessão é uma curva de acordo com a equação 26 apresentada por LEVIEN (1985). Na TABELA 26 são apresentados valores de recessão no início e no final do sulco e também valores de recessão obtidos em campo para o início e final do sulco.

Nas figuras 12, 13, 14 e 15 traçou-se as três hipóteses assumidas para a recessão, ou seja,  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , as curvas de avanço da água, assumindo-se fatores de forma do perfil superficial e subsuperficial igual a 0,75 e 0,80, respectivamente, e os três perfis de

TABELA - 26 - Valores dos tempos de recessão encontrados com as três hipóteses, e os dados de campo. Tempo de recessão em minutos.

Exemplos	Hipótese I		Hipótese II		Hipótese III		Campo	
	sulco		sulco		sulco		sulco	
	início	final	início	final	início	final	início	final
1 (Ramsey)	208	208	212,6	212,6	212,6	233	215	235
2 (Hortic.)	202	202	208,8	208,8	208,8	223,5	202	222
3 (Stibien)	696	696	733,8	733,8	733,8	913,5	698	731
4 (Benson)	698	698	789,1	789,1	789,1	1.165,0	698,6	746,6

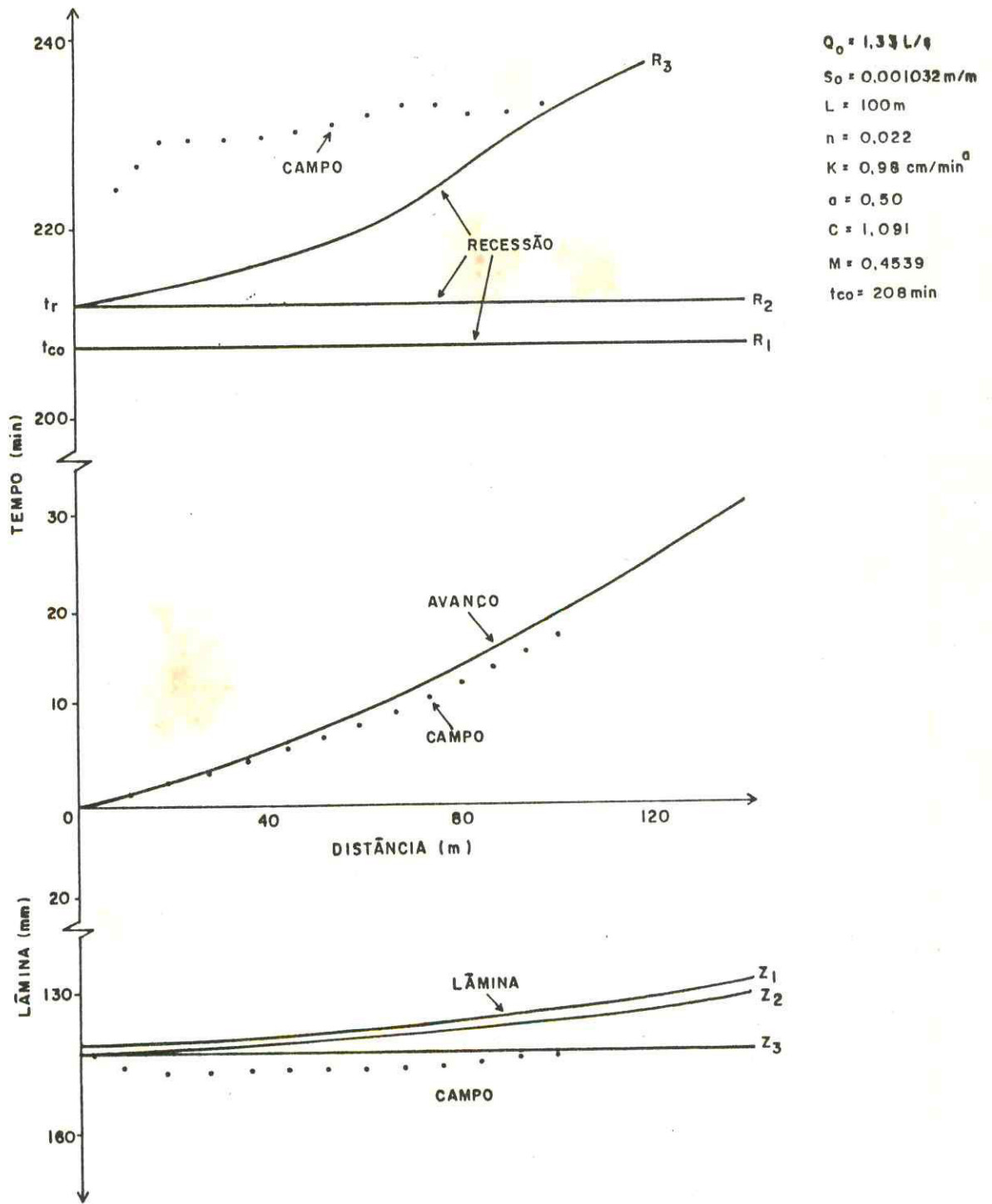


FIGURA 12 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulcos com comprimento de 100m.

TABELA 27 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipótese I (dados de Ramsey)

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0	208	139,5
9,08	1	208	139,2
16,52	2	208	138,8
29,28	4	208	138,2
35,00	5	208	137,8
45,54	7	208	137,1
59,75	10	208	136,1
80,57	15	208	134,4
98,99	20	208	132,6
100,00	20,2	208	132,5

TABELA 28 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II, (dados de Ramsey).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LAMINA INF. (min)
0,00	0,0	212,55	141,02
9,08	1,0	212,55	140,69
16,52	2,0	212,55	140,36
29,28	4,0	212,55	139,69
35,00	5,0	212,55	139,35
45,54	7,0	212,55	138,68
59,75	10,0	212,55	137,67
80,57	15,0	212,55	135,96
98,99	20,0	212,55	134,22
100,00	20,2	212,55	134,22

TABELA 29 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão uma curva, hipótese III, (dados de Ransey).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
9,08	1,0	213,58	141,03
16,52	2,0	214,48	141,00
29,28	4,0	216,32	140,95
35,00	5,0	216,97	140,83
45,54	7,0	218,60	140,71
59,75	10,0	221,15	140,56
80,57	15,0	226,18	140,57
98,99	20,0	232,84	141,12
100,00	20,2	232,89	141,07

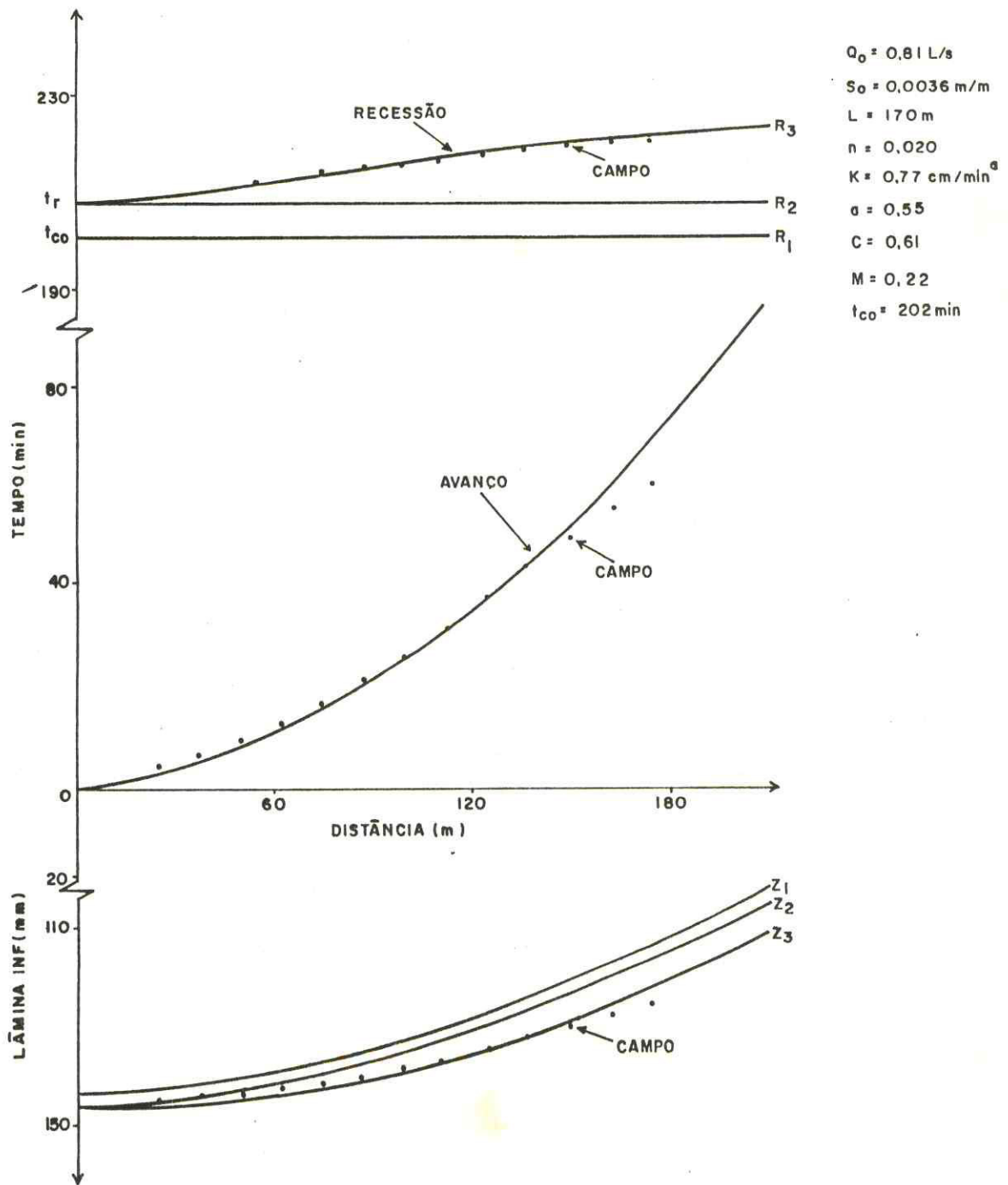


FIGURA 13 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculados pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, comparados com dados observados, (dados de Horticultrice), sulcos com comprimento de 175m.

TABELA 30 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão igual ao tempo de aplicação, hipótese I, (dados de Horticulture).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	202	142,32
17,77	2,0	202	141,55
29,71	4,0	202	140,77
43,80	7,0	202	139,59
55,43	10,0	202	138,41
71,67	15,0	202	136,41
85,45	20,0	202	134,39
97,60	25,0	202	132,35
108,57	30,0	202	130,28
118,63	35,0	202	128,18
127,97	40,0	202	126,06
136,71	45,0	202	123,90
144,95	50,0	202	121,72
152,77	56,0	202	119,50
160,22	60,0	202	117,25
167,34	66,0	202	114,96
174,18	70,0	202	112,63
175,00	71,0	202	112,16

TABELA 31 - Avanço, recessão e infiltração acumulados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II, (dados de Horticulture).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	208,82	144,95
17,77	2,0	208,82	144,18
29,71	4,0	208,82	143,41
43,80	7,0	208,82	142,26
55,43	10,0	208,82	141,09
71,67	15,0	208,82	139,13
85,45	20,0	208,82	137,14
97,60	25,0	208,82	135,13
108,57	30,0	208,82	133,10
118,63	35,0	208,82	131,04
127,97	40,0	208,82	128,95
136,71	45,0	208,82	126,84
144,95	50,0	208,82	124,69
152,77	55,0	208,82	122,52
160,22	60,0	208,82	120,31
167,34	65,0	208,82	118,07
174,18	70,0	208,82	115,79
175,00	75,0	208,82	115,33

TABELA 32 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipótese III, (dados de Horituculture.

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
17,77	2,0	210,21	144,72
29,71	4,0	211,15	144,31
43,80	7,0	212,38	143,69
55,43	10,0	213,40	142,87
71,67	15,0	214,89	141,51
85,45	20,0	216,20	140,06
97,60	25,0	217,40	138,56
108,57	30,0	218,50	137,01
118,63	35,0	219,50	135,41
127,97	40,0	220,40	133,74
136,71	45,0	221,20	132,02
144,95	50,0	221,89	130,23
152,77	55,0	222,39	128,35
160,22	60,0	222,76	126,38
167,34	65,0	222,94	124,31
174,18	70,0	223,00	122,16
175,00	71,0	223,00	121,72

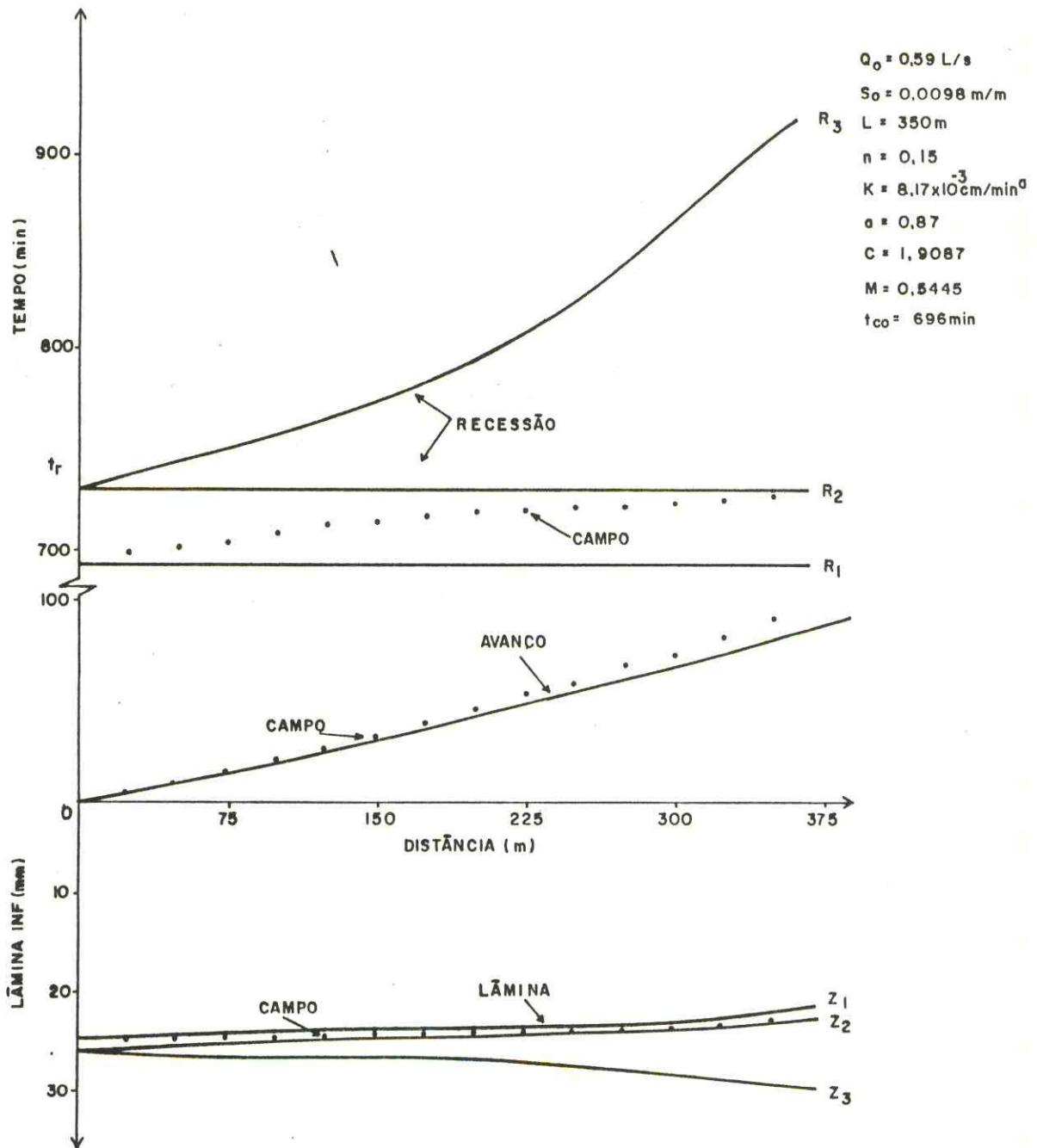


FIGURA 14 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão, com parados com dados observados (dados de Stieben), sulcos com comprimento de 350m.

TABELA 33 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão igual ao tempo de aplicação, hipótese I, (dados de Stieben).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	696,0	23,94
4,83	1,0	696,0	23,91
23,92	5,0	696,0	23,79
47,36	10,0	696,0	23,64
70,38	15,0	696,0	23,49
93,00	20,0	696,0	23,34
115,25	25,0	696,0	23,19
137,16	30,0	696,0	23,04
158,73	35,0	696,0	22,89
180,00	40,0	696,0	22,74
221,61	50,0	696,0	22,44
262,09	60,0	696,0	22,13
301,52	70,0	696,0	21,83
340,00	80,0	696,0	21,53
350,00	85,0	696,0	21,38

TABELA 34 - Avanço, recessão e infiltração acumulados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II, (dados de Stieben).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	733,85	25,06
4,83	1,0	733,85	25,03
23,92	5,0	733,85	24,92
47,36	10,0	733,85	24,77
70,38	15,0	733,85	24,62
93,00	20,0	733,85	24,47
115,25	25,0	733,85	24,32
137,16	30,0	733,85	24,17
158,73	35,0	733,85	24,02
180,00	40,0	733,85	23,87
221,61	50,0	733,85	23,57
262,09	60,0	733,85	23,27
301,52	70,0	733,85	22,97
340,00	80,0	733,85	22,67
350,00	85,0	733,85	22,52

TABELA 35 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipótese III, (dados de Stieben).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
4,83	1,0	735,19	25,07
23,92	5,0	740,56	25,11
47,36	10,0	747,45	25,17
70,38	15,0	754,56	25,23
93,00	20,0	761,94	25,30
115,25	25,0	769,61	25,38
137,16	30,0	777,65	25,47
158,73	35,0	786,10	25,57
180,00	40,0	795,05	25,69
221,61	50,0	814,88	25,98
262,09	60,0	843,21	26,52
301,52	70,0	868,78	26,98
340,00	80,0	910,40	27,90
350,00	85,0	915,76	27,92

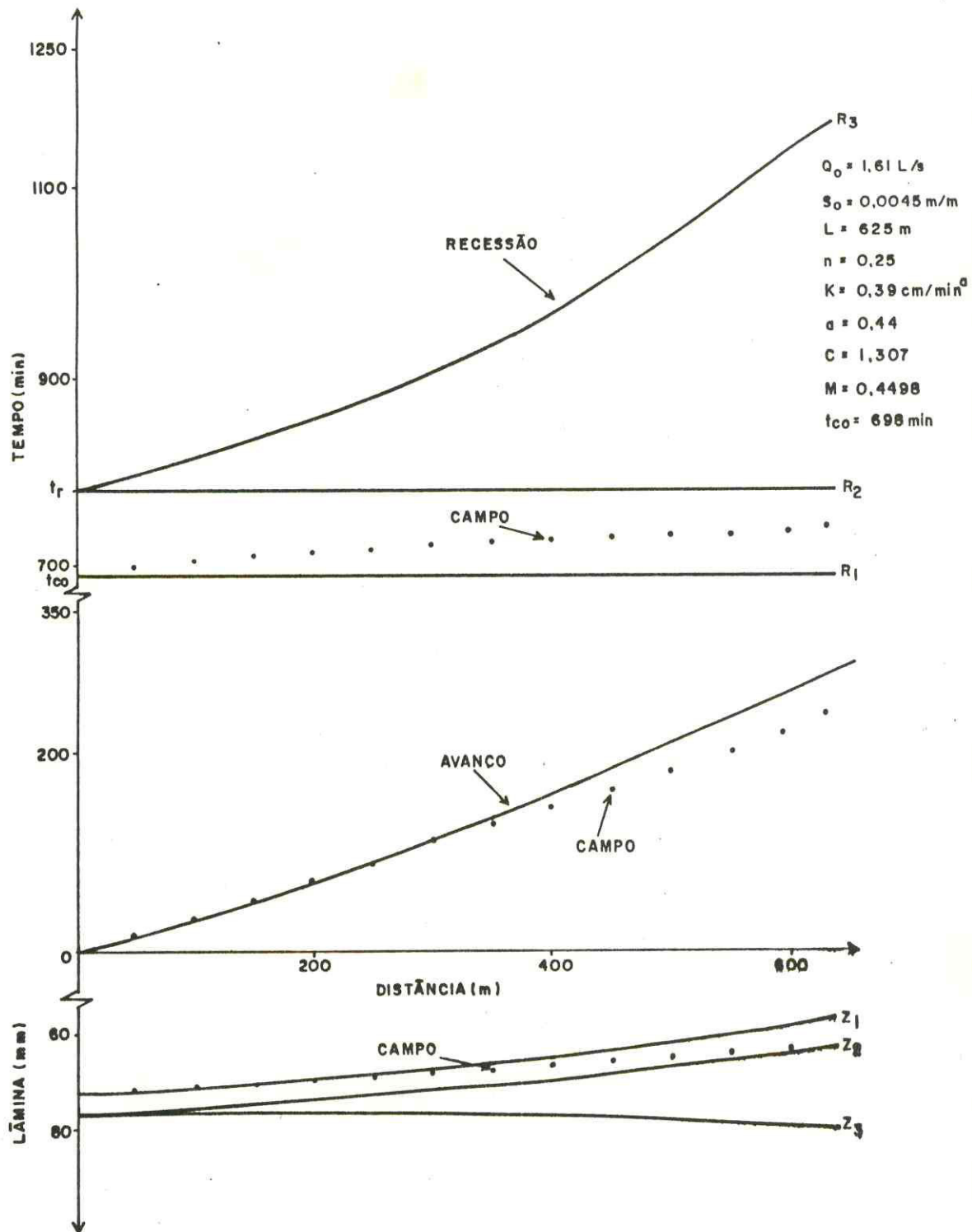


FIGURA 15 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando três casos de recessão comparados com dados observados (dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m.

TABELA 36 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculada pelo modelo algébrico da irrigação por sícos, considerando-se o tempo de recessão igual ao tempo de aplicação, hipótese I, (dados de Benson).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	698,0	70,58
10,25	3,0	698,0	70,44
16,72	5,0	698,0	70,35
32,24	10,0	698,0	70,13
47,09	15,0	698,0	69,90
61,46	20,0	698,0	69,68
89,09	30,0	698,0	69,22
115,56	40,0	698,0	68,76
141,16	50,0	698,0	68,29
165,98	60,0	698,0	67,82
190,17	70,0	698,0	67,35
213,79	80,0	698,0	66,87
236,90	90,0	698,0	66,39
259,57	100,0	698,0	65,91
281,82	110,0	698,0	65,42
303,70	120,0	698,0	64,92
325,22	130,0	698,0	64,42
346,43	140,0	698,0	63,92
367,33	150,0	698,0	63,40
387,94	160,0	698,0	62,89
408,30	170,0	698,0	62,37
428,40	180,0	698,0	61,84
448,25	190,0	698,0	61,31
467,89	200,0	698,0	60,77
487,31	210,0	698,0	60,23
506,52	220,0	698,0	59,68
525,54	230,0	698,0	59,12
544,37	240,0	698,0	58,56
563,02	250,0	698,0	57,99
581,50	260,0	698,0	57,41
599,81	270,0	698,0	56,83
617,96	280,0	698,0	56,24
625,00	285,0	698,0	55,94

TABELA 37 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculada pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o tempo de recessão superior ao tempo de aplicação, hipótese II, (dados de Benson).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0	801,0	75,02
61,46	20	801,0	74,18
115,56	40	801,0	73,33
165,98	60	801,0	72,47
213,79	80	801,0	71,60
259,57	100	801,0	70,71
303,70	120	801,0	69,81
346,43	140	801,0	68,90
387,94	160	801,0	67,96
428,40	180	801,0	67,02
467,89	200	801,0	66,05
506,52	220	801,0	65,07
544,37	240	801,0	64,07
581,50	260	801,0	63,04
617,96	280	801,0	62,00
625,00	285	801,0	61,74

TABELA 38 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se a recessão, hipótese III, (dados de Benson).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	801,00	75,02
61,46	20,0	811,41	74,62
115,56	40,0	832,37	74,66
165,98	60,0	853,21	74,69
213,79	80,0	874,36	74,74
259,57	100,0	896,12	74,81
303,70	120,0	918,75	74,92
346,43	140,0	942,55	75,08
387,94	160,0	967,85	75,30
428,40	180,0	995,12	75,60
467,89	200,0	1.024,91	76,00
506,52	220,0	1.057,97	76,53
544,37	240,0	1.095,08	77,22
581,50	260,0	1.135,32	78,02
617,96	280,0	1.163,25	78,34
625,00	285,0	1.163,90	78,17

infiltração assumindo-se o perímetro molhado igual a  $B$ , obtidos para cada uma das hipóteses assumidas, e também, plotou-se os valores de avanço e recessão obtidos no campo.

A recessão igual ao tempo de aplicação,  $R_1$ , apresenta valores inferiores ao de campo nos diferentes exemplos estudados. Nos exemplos 3 e 4 a recessão no início do sulco aproxima-se dos dados de campo, no entanto a medida que distancia-se da cabeceira essa diferença cresce.

Com a recessão  $R_1$ , o perfil de infiltração é substituído nos quatro exemplos estudados.

A recessão na cabeceira,  $R_2$ , obtida com a equação 26, apresenta valor inferior ao de campo nos exemplos 1 e 2, e valores superiores ao de campo nos exemplos 3 e 4, no entanto, a medida que aproxima-se do final do sulco, a diferença desta recessão, para os dados de campo decresce. O perfil de infiltração obtido com a recessão  $R_2$  apresenta valor inferior ao obtido no campo nos exemplos 1 e 2, e nos exemplos 3 e 4 o perfil de infiltração apresenta valores semelhantes aos obtidos no campo.

No caso da hipótese 3, em que a recessão é uma curva,  $R_3$ , os resultados aproximam-se aos de campo nos exemplos 1 e 2; no entanto, nos exemplos 3 e 4 a curva de recessão apresenta grande diferença para os valores de campo. Com a recessão  $R_3$ , o perfil de infiltração apresenta grande diferença para o perfil obtido no campo, no final dos sulcos esta diferença é bem acentuada.

A recessão é definida como a fase da irrigação marcada pelo desaparecimento da água da superfície do solo, ou seja, o tempo que a água desaparece do solo. Este tempo é afetado pela vazão, comprimento, forma do sulco e declividade.

Na TABELA 26, bem como nas FIGURAS 12, 13, 14 e 15 pode-se verificar que,  $R_1$ , recessão igual ao tempo de aplicação, nos quatro exemplos estudados subestima o início da recessão com valores entre 0,29 a 3,3% e o final com 4,8% a 11,1%. Conseqüentemente, o perfil de infiltração é subestimado nos quatro exemplos.

Para a recessão igual a recessão na cabeceira do sulco,  $R_2$ , na TABELA 26, bem como nas FIGURAS 12, 13, 14 e 15 observa-se que o início da recessão é subestimado com valor de 1,14% e superestimado com valor máximo de aproximadamente 13%, enquanto que, o final da recessão é subestimado com valor de até 9,2% e superestimado com valor de aproximadamente 5,7%, com relação aos dados de campo. No entanto o perfil de infiltração obtida admitindo  $R_2$ , é subestimado nos exemplos 1 e 2, e nos exemplos 3 e 4 apresenta valores que expressam os dados de campo.

Com a recessão uma curva,  $R_3$ , observa-se na TABELA 26 e portanto nas FIGURAS 12, 13 14 e 15, que a recessão nos exemplos estudados apresentam diferença dos valores de campo, sendo, da seguinte forma; com o início sendo subestimado em, aproximadamente, 1,14% e superestimado em 13%, enquanto que, o final é subestimado em menos de meio por cento e superestimado em cerca de 56%

aproximadamente. Com essa variação na recessão, pode-se observar nas FIGURAS 12, 13, 14 e 15, seus efeitos no perfil de infiltração. Apresentando valores que assemelham-se aos dados de campo nos exemplos 1 e 2, enquanto nos exemplos 3 e 4 apresenta lâminas no final do sulco maiores que as lâminas infiltradas na cabeceira do sulco.

Segundo a literatura geralmente ocorre deficit no final do sulco, ou seja, as lâminas infiltradas no final dos sulcos tendem a ser menor que as lâminas infiltradas na cabeceira do sulco. Segundo ISRAELSEN (1965), ao usar sulcos longos demais se produzem perdas excessivas por percolação e erosão na cabeceira.

Com relação as três maneiras de calcular a recessão neste trabalho,  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , pode-se observar que dos quatro exemplos estudados, há duas observações importantes a fazer.

Para sulcos pequenos, menores de 200m (Ramsey e Horticulture) os melhores resultados são para a hipótese  $R_3$ , em que a curva de recessão é dada pela equação 28, do modelo de LEVIEN (1985). Para sulcos mais longos, é aparente que a melhor representação da recessão é a hipótese  $R_2$ , na qual a recessão na cabeceira do sulco é dada pela equação 26 e o resultado da curva, é uma reta paralela ao eixo das abscissas.

#### 4.3 - Influência do Perímetro Molhado nos Parâmetros da Irrigação por Sulcos

Para estudar a influência do perímetro molhado sobre o avanço, lâmina infiltrada e conseqüentemente volume infiltrado, foram consideradas três equações para o cálculo do mesmo, representadas aqui da seguinte maneira:  $P_1$ , o perímetro molhado é igual a superfície livre da água,  $B$ , dada pela equação 18;  $P_2$ , o perímetro molhado recomendado pelo S.C.S - USDA, dada pela equação 16; e,  $P_3$ , o perímetro molhado é igual ao arco completo de uma parábola, dada pela equação 61. Na TABELA 39 são apresentados os valores dos perímetros para os quatro exemplos estudados. Conhecidos os perímetros, calculou-se os seguintes parâmetros: avanço da água nos sulcos, lâmina infiltrada ao longo dos sulcos e volume infiltrado.

Para uma melhor compreensão desta análise, os gráficos foram construídos da seguinte maneira: adotou-se o tempo de recessão constante e igual a  $R_2$  (recessão na cabeceira do sulco); para as curvas de avanço adotou-se os fatores de forma  $r_{y2}$  e  $r_{z2}$ ; e conseqüentemente, os perfis de infiltração, resultante da diferença entre a recessão e a curva de avanço. Também traçou-se curva de avanço de campo e curva de avanço obtida com o modelo hidrodinâmico.

Na TABELA 39, observa-se que o perímetro molhado calculado com a equação 18,  $P_1$ , apresentou valores entre 0,258m e 0,475m, enquanto que com a equação 61,  $P_3$ , apresentou valores entre 0,262m e 0,531m. Já o perímetro calculado com a equação 16, apresenta valores bastante diferentes, sendo seus valores entre 0,379 e 0,794.

O perímetro molhado é a parte da seção transversal

TABELA 39 - Valores de Perímetro Molhado em metros,  $P_m$ , encontrados para os três casos estudados.

Exemplos	EQUAÇÃO 18	EQUAÇÃO 16	EQUAÇÃO 61
	$P_1$	$P_2$	$P_3$
1. (RAMSEY)	0,273	0,482	0,294
2. (HORTICULTURE)	0,258	0,379	0,262
3. (STIBIEN)	0,342	0,477	0,356
4. (BENSON)	0,475	0,794	0,531

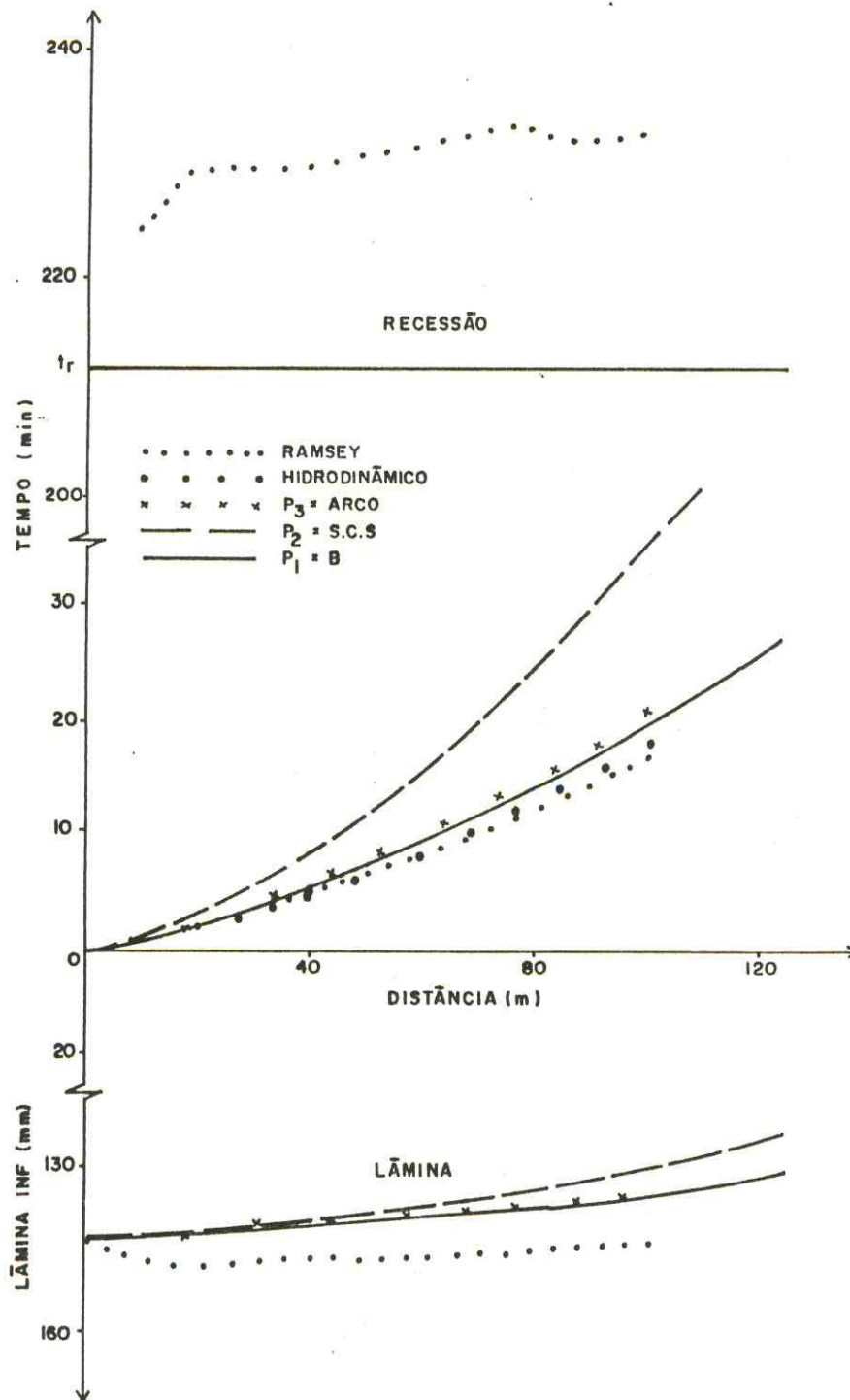


FIGURA 16 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Ramsey), sulcos com comprimento de 100m.

TABELA 40 - Avanço, recessão e infiltração calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I, (dados de Ramsey).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LAMINA INF. (min)
0,00	0,0	212,55	141,02
9,08	1,0	212,55	140,69
16,52	2,0	212,55	140,36
29,28	4,0	212,55	139,69
35,00	5,0	212,55	139,35
45,54	7,0	212,55	138,68
59,75	10,0	212,55	137,67
80,57	15,0	212,55	135,96
98,99	20,0	212,55	134,22
100,00	20,2	212,55	134,22

TABELA 41 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S - USDA, caso II ( dados de Ramsey).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0,0	0,0	212,55	141,02
7,67	1,0	212,55	140,69
13,36	2,0	212,55	140,36
22,59	4,0	212,55	139,69
26,58	5,0	212,55	139,35
33,58	7,0	212,55	138,68
43,22	10,0	212,55	137,67
56,70	15,0	212,55	135,96
68,36	20,0	212,55	134,22
78,81	25,0	212,55	132,47
97,22	35,0	212,55	128,89
105,52	40,0	212,55	128,34

TABELA 42 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III, (dados de Ramsey).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0,00	0,0	212,55	141,02
8,92	1,0	212,55	140,69
16,14	2,0	212,55	140,36
28,45	4,0	212,55	139,69
33,94	5,0	212,55	139,35
44,03	7,0	212,55	138,69
57,58	10,0	212,55	137,67
77,36	15,0	212,55	135,96
94,80	20,0	212,55	134,22
100,00	21,7	212,55	133,63

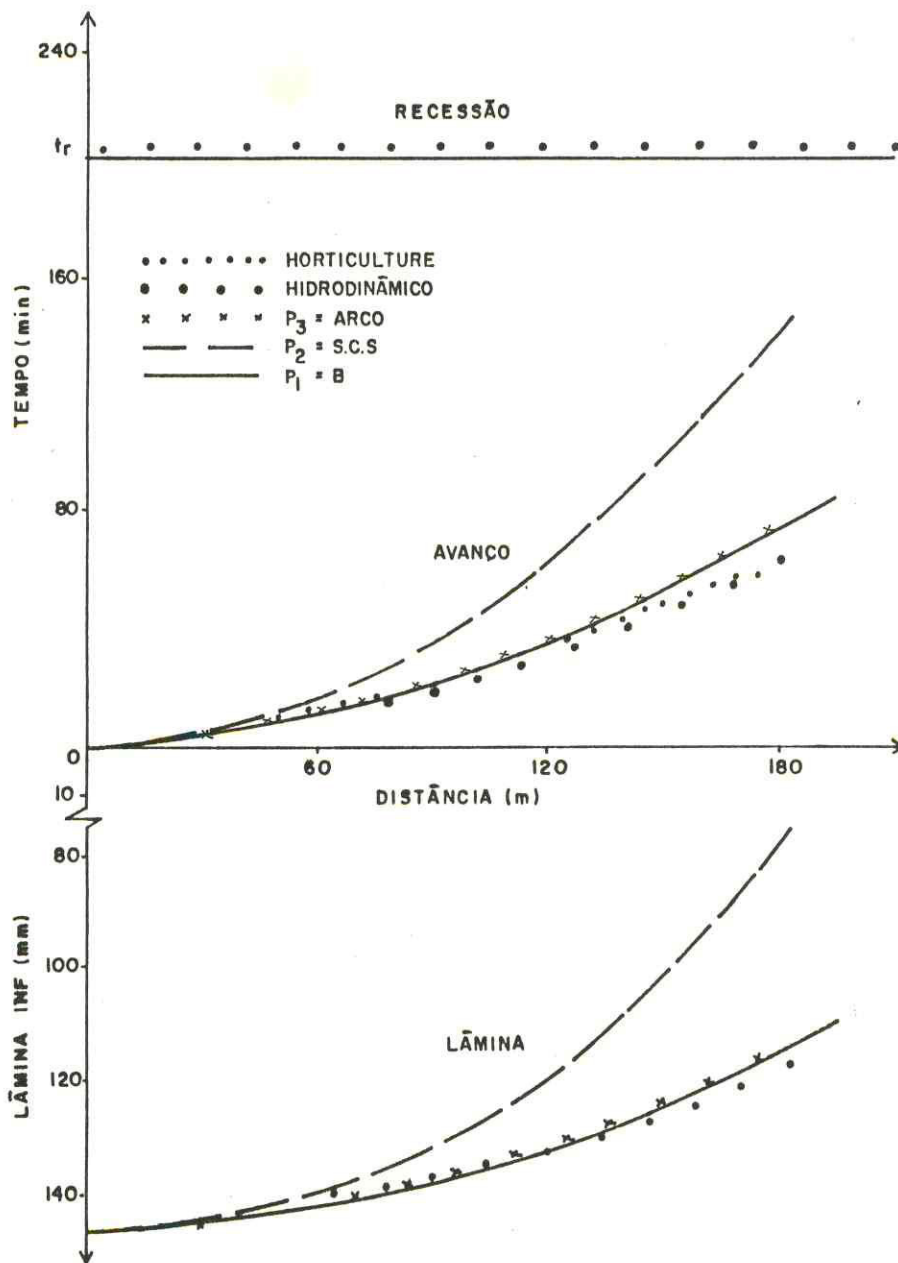


FIGURA 17 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Horticulture), sulcos com comprimento de 175m.

TABELA 43 - Avanço, recessão e infiltração acumulados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I, (dados de Horticulure).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	208,82	144,95
17,77	2,0	208,82	144,18
29,71	4,0	208,82	143,41
43,80	7,0	208,82	142,26
55,43	10,0	208,82	141,09
71,67	15,0	208,82	139,13
85,45	20,0	208,82	137,14
97,60	25,0	208,82	135,13
108,57	30,0	208,82	133,10
118,63	35,0	208,82	131,04
127,97	40,0	208,82	128,95
136,71	45,0	208,82	126,84
144,95	50,0	208,82	124,69
152,77	55,0	208,82	122,52
160,22	60,0	208,82	120,31
167,34	65,0	208,82	118,07
174,18	70,0	208,82	115,79
175,00	75,0	208,82	115,33

TABELA 44 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S - USDA, caso II, (dados de Horticulture).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	208,81	144,94
14,82	2,0	208,81	144,18
23,88	4,0	208,81	143,41
34,23	7,0	208,81	142,25
42,60	10,0	208,81	141,08
54,11	15,0	208,81	139,12
72,23	25,0	208,81	135,13
86,78	35,0	208,81	131,03
99,23	45,0	208,81	126,83
110,25	55,0	208,81	122,51
120,23	65,0	208,81	118,06
129,41	75,0	208,81	113,48
137,93	85,0	208,81	108,73
145,92	95,0	208,81	103,81
153,46	105,0	208,81	98,69
160,61	115,0	208,81	93,34
170,73	130,0	208,81	84,81
175,00	136,0	208,81	81,20

TABELA 45 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III. (dados de Horticulture).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	208,81	144,94
17,66	2,0	208,81	144,18
29,47	4,0	208,81	143,41
43,40	7,0	208,81	142,25
54,88	10,0	208,81	141,08
70,91	15,0	208,81	139,12
96,47	25,0	208,81	135,13
117,20	35,0	208,81	131,03
135,01	45,0	208,81	126,83
150,83	55,0	208,81	122,51
165,19	65,0	208,81	118,06
175,00	72,0	208,81	114,87

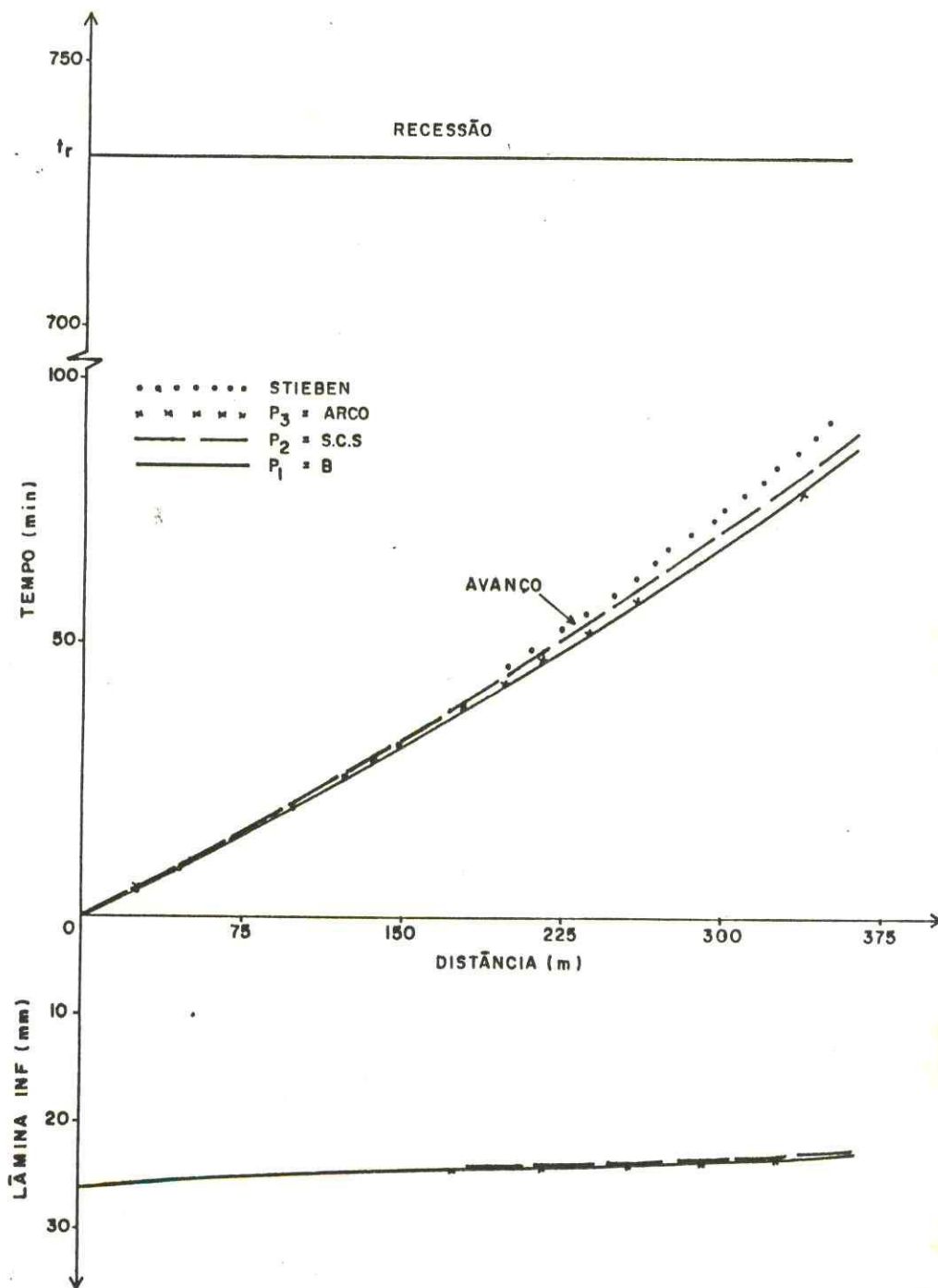


FIGURA 18 - Curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados, (dados de Stieben), sulcos com comprimento de 350m.

TABELA 46 - Avanço, recessão e infiltração acumulados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado, caso I, (dados de Stieben).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	LÂMINA INF. (min)
0	0,0	733,85	25,06
4,83	1,0	733,85	25,03
23,92	5,0	733,85	24,92
47,36	10,0	733,85	24,77
70,38	15,0	733,85	24,62
93,00	20,0	733,85	24,47
115,25	25,0	733,85	24,32
137,16	30,0	733,85	24,17
158,73	35,0	733,85	24,02
180,00	40,0	733,85	23,87
221,61	50,0	733,85	23,57
262,09	60,0	733,85	23,27
301,52	70,0	733,85	22,97
340,00	80,0	733,85	22,67
350,00	85,0	733,85	22,52

TABELA 47 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculada pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S - USDA.Caso III, (dados de STIEBEN).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0	733,85	25,06
4,82	1	733,85	25,03
23,81	5	733,85	24,92
46,95	10	733,85	24,77
69,50	15	733,85	24,62
91,54	20	733,85	24,47
113,08	25	733,85	24,32
134,17	30	733,85	24,17
154,82	35	733,85	24,02
175,06	40	733,85	23,87
214,39	50	733,85	23,57
252,39	60	733,85	23,27
288,86	70	733,85	22,97
324,21	80	733,85	22,67
350,00	87,6	733,85	22,44

TABELA 48 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III, (dados de Stieben).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	733,85	25,06
4,83	1,0	733,85	25,03
23,91	5,0	733,85	24,92
47,32	10,0	733,85	24,77
70,28	15,0	733,85	24,62
92,84	20,0	733,85	24,47
115,02	25,0	733,85	24,32
136,84	30,0	733,85	24,17
158,32	35,0	733,85	24,02
179,47	40,0	733,85	23,87
220,84	50,0	733,85	23,57
261,04	60,0	733,85	23,27
300,16	70,0	733,85	22,97
338,25	80,0	733,85	22,67
350,00	85,0	733,85	22,58

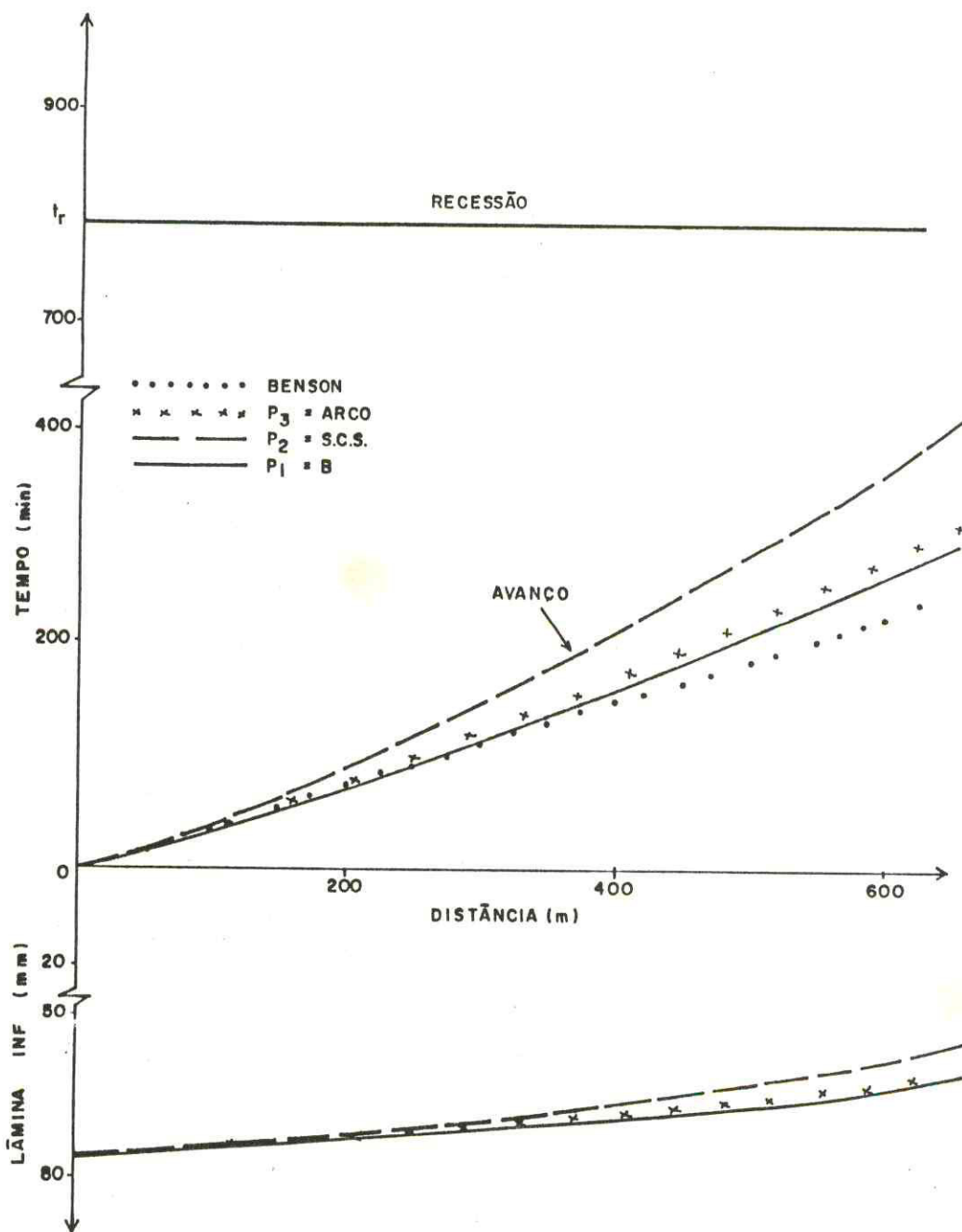


FIGURA 19 - Curvas de avanço; recessão e perfil de infiltração calculadas pelo modelo algébrico considerando as três hipóteses para o perímetro molhado, comparados com dados observados (dados de Benson), sulcos com comprimento de 625m.

TABELA 49 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculada pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado caso I, (dados de Benson).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0	801,0	75,02
61,46	20	801,0	74,18
115,56	40	801,0	73,33
165,98	60	801,0	72,47
213,79	80	801,0	71,60
259,57	100	801,0	70,71
303,70	120	801,0	69,81
346,43	140	801,0	68,90
387,94	160	801,0	67,96
428,40	180	801,0	67,02
467,89	200	801,0	66,05
506,52	220	801,0	65,07
544,37	240	801,0	64,07
581,50	260	801,0	63,04
617,96	280	801,0	62,00
625,00	285	801,0	61,74

TABELA 50 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado calculado pela equação do S.C.S - USDA, caso II. (dados de Benson).

DISTÂNCIA (min)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	801,0	75,02
26,48	10,0	801,0	74,60
49,44	20,0	801,0	74,18
90,67	40,0	801,0	73,33
145,81	70,0	801,0	72,03
242,54	130,0	801,0	69,36
328,33	190,0	801,0	66,54
503,73	323,0	801,0	59,68
625,00	438,0	801,0	52,83

TABELA 51 - Avanço, recessão e infiltração acumulada calculados pelo modelo algébrico da irrigação por sulcos, considerando-se o perímetro molhado igual ao arco de uma parábola, caso III (dados de Benson).

DISTÂNCIA (m)	AVANÇO (min)	RECESSÃO (min)	INFILTRAÇÃO ACUMULADA (min)
0	0,0	801,0	75,02
14,74	5,0	801,0	74,81
28,37	10,0	801,0	74,60
41,41	15,0	801,0	74,39
54,01	20,0	801,0	74,18
78,22	30,0	801,0	73,76
101,39	40,0	801,0	73,33
123,74	50,0	801,0	72,90
166,53	70,0	801,0	72,04
207,29	90,0	801,0	71,16
246,42	110,0	801,0	70,26
284,20	130,0	801,0	69,36
320,82	150,0	801,0	68,43
356,44	170,0	801,0	67,49
391,16	190,0	801,0	66,54
425,08	210,0	801,0	65,56
458,27	230,0	801,0	64,57
490,79	250,0	801,0	63,56
522,70	270,0	801,0	62,53
554,04	290,0	801,0	61,47
584,87	310,0	801,0	60,39
615,19	330,0	801,0	59,29
625,00	335,0	801,0	59,01

do sulco que está em contato com a água. De acordo com o S.C.S - USDA (1980), a água infiltrada por unidade de comprimento de sulco é diretamente proporcional a superfície do solo em contato com a água.

Comparando as FIGURAS 16 a 19, observa-se que as curvas de avanço obtidas quando se utiliza o perímetro molhado igual a  $P_1$ , apresenta boa compactação com os dados de campo. Nas FIGURAS 17 e 18, com relação ao perfil infiltrado, observa-se um perfil semelhante ao de campo, enquanto na FIGURA 16 o perfil dado por  $P_m = B$  subestima o de campo. É importante observar que na FIGURA 16 a recessão calculada com  $R_2$  subestima a recessão observada no campo.

Para o perímetro molhado  $P_2$ , nas FIGURAS 16 a 19 observa-se que as curvas de avanço superestimam os dados de campo, havendo no entanto uma excessão. No perfil de infiltração, os valores obtidos subestimam os dados de campo.

Nas FIGURAS 16 a 19, observa-se que as curvas de avanço obtidas com o perímetro  $P_3$ , apresenta boa comparação, com dados de campo, observe-se nas FIGURAS 17 e 18 que o perfil obtido com  $P_3$  assemelha-se aos de campo, enquanto na FIGURA 16 o perfil obtido com  $P_3$  subestima o de campo. Neste caso, também, deve-se considerar que a recessão considerada subestima a recessão de campo.

No cálculo do volume infiltrado,  $V_z$ , obtido com a equação 62, considerou-se os três perímetros molhado, ou seja,  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , obtendo-se consecutivamente,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ . Na TABELA 52 são apresentados valores de volume

TABELA 52 - Valores de volumes infiltrado  $V_a$  ( $m^3$ ), encontrados com os três casos de perímetro molhados estudados dados de campo e encontrado com o modelo hidrodinâmico.

Exemplos	$V(P_1)$	$V(P_a)$	$V(P_3)$	CAMPO	HIDROD,
1 (RAMSEY)	3,757	6,488	4,032	4.230	-
2 (HORTICULTURE)	5,869	7,497	5,950	-	6,200

infiltrado para dois exemplos estudados.

Na TABELA 52 observa-se que, no exemplo 1 quando utiliza-se o perímetro molhado  $P_1$ , o volume infiltrado foi de  $3,757 \text{ m}^3$ , enquanto o  $V_z$  de RAMSEY foi  $4,230 \text{ m}^3$ , ou seja o  $V_z$  é subestimado em aproximadamente 11%. No exemplo 2 o  $V_z$  obtido quando assume-se  $P_1$  foi  $5,869 \text{ m}^3$ , enquanto com o modelo hidrodinâmico foi  $6,200 \text{ m}^3$ , ou seja, o  $V_z$  foi subestimado em 5,3% usando o modelo hidrodinâmico como padrão.

Analisando a TABELA 52, observa-se que no exemplo 1, quando considera-se o perímetro molhado igual a  $P_2$ , o valor de  $V_z$  foi  $6,488 \text{ m}^3$ , enquanto o  $V_z$  obtido de RAMSEY foi  $4,230 \text{ m}^3$ , ou seja, o  $V_z$  foi superestimado em aproximadamente 53,4%. Já no exemplo 2, o  $V_z$  calculado com  $P_2$  foi  $7,497 \text{ m}^3$ , enquanto com o modelo hidrodinâmico o  $V_z$  foi  $6,200 \text{ m}^3$ . Ou seja, o  $V_z$  foi superestimado em 21%, usando o modelo hidrodinâmico como padrão.

Na TABELA 52 observe-se que, no exemplo 1 quando adota-se  $P_3$  no cálculo de  $V_z$  o valor encontrado foi de  $4,032 \text{ m}^3$ , enquanto o  $V_z$  obtido em RAMSEY foi  $4,230 \text{ m}^3$ , ou seja, o  $V_z$  foi subestimado em 4,7%. No exemplo 2 o  $V_z$  obtido com o perímetro  $P_3$  foi  $5,950 \text{ m}^3$ , enquanto o modelo hidrodinâmico de SOUZA (1981) o  $V_z$  foi  $6,200 \text{ m}^3$ . Ou seja, o  $V_z$  foi subestimado em aproximadamente 4%, usando o modelo hidrodinâmico como padrão.

Considerando no exemplo 1, uma lâmina de aplicação de 130mm e assumindo-se o perímetro molhado igual a superfície livre da água,  $P_1$ , o modelo algébrico de LEVIEN (1985), prediz uma eficiência de aplicação de água igual a

22,6% e uma eficiência de armazenamento de 28,9%, enquanto que no mesmo exemplo assumindo-se o perímetro molhado igual ao arco da parábola calcula  $E_a = 24,3\%$  e  $E_s = 31\%$ .

No exemplo 2 assumindo-se uma lâmina de aplicação igual a 100 mm e admitindo-se o perímetro molhado igual a superfície livre da água,  $P_1$ , o modelo algébrico prediz uma eficiência de aplicação igual a 60% e uma eficiência de armazenamento de 30%, no entanto considerando o perímetro molhado igual ao arco da parábola,  $P_3$ , calcula  $E_a = 61\%$  e  $E_s = 30,4\%$ , enquanto o modelo hidrodinâmico prediz  $E_a = 63\%$  e  $E_s = 31\%$ .

Com relação aos três perímetros molhado considerados,  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  nos cálculos de avanço, perfil de infiltração e volume infiltrado, o que apresentou melhor resultado, ou seja, o que melhor aproximou-se aos dados de campo foi  $P_3$ , o perímetro molhado igual ao arco da parábola apresentado neste trabalho. Com relação ao perímetro recomendado pelo S.C.S - USDA (1980), deve-se observar que o mesmo é utilizado com equações das famílias de infiltração proposta pelo S.C.S - USDA, no caso estudado a equação utilizada para a infiltração, foi a de KOSTIAKOV.

## 5 - CONCLUSÕES

Com base nos resultados do presente trabalho ob  
tem-se as seguintes conclusões:

1 - Na utilização de modelos para simular a  
irrigação por sulcos, como o modelo de LEVIEN, é possível  
calcular o perímetro molhado através da equação do arco  
da parábola;

2 - Os fatores de forma dos perfis superficial e  
subsuperficial são bem representados por valores já consa  
grados na literatura, tais como,  $r_y = 0,70$  e  $r_z = 0,75$ ;

3 - Nos sulcos menores de 200 m a melhor represen  
tação para a recessão é a hipótese 3, na qual a recessão  
na cabeceira do sulco é dada pela equação 28, e represen  
tada graficamente como uma curva;

4 - Nos sulcos longos a melhor representação para  
a recessão é a hipótese 2, na qual a recessão na cabeceira  
do sulco é dada pela equação 26, e o resultado é uma reta  
paralela ao eixo das abscissas.

## 6 - RECOMENDAÇÕES

1 - Deve-se continuar estudando o efeito dos fatores de forma sobre o avanço da água em sulcos, através de uma versão computadorizada do modelo LEVIEN;

2 - Estudar as recessões, hipótese 2 e 3, em sulcos de mesmo comprimento, mas com declividade variável;

3 - Testar a equação do arco da parábola em condições extremas de lâmina;

4 - Comparar o modelo algébrico de LEVIEN adotando-se o perímetro molhado igual ao arco da parábola com o modelo S.C.S - ISDA, adotando-se neste as famílias de infiltração;

5 - Realizar outros estudos com tipos de solos diferentes.

7 - LITERATURA CITADA

AMIN, S.L - 1985 - Análise Comparativa das Técnicas de Determinação das Características de Infiltração na Irrigação por Sulcos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 136 p.

AUGUSTO, S.G. - 1984 - Estudo da Eficiência e da Uniformidade de Distribuição de Água na Irrigação por Sulcos em Declive. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 130 p.

BASSET, D.L. & FITZSMONS, D. W. - 1976 - Simulating Overland Flow in Border Irrigations. Transactions of the ASAE. 19 (4): 674-680.

BERNARDO, S. - 1982 - Manual de Irrigação. Imprensa Universitária. Universidade Federal de Viçosa, 488 p.

FLYNN, LAWRENCE E & MARINO, MIGUEL A - 1987 - Canal Design -Optimal Cross Seltions. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Asce. 113 (IR.3): 335-341

FOK, YU-Si. - 1988 - Principles and Sesign of Forrow Irrigation Systems. Water Resources/Enviromental. Civil Engeneering Practice. Vol 5. Chapter 16: 489 - 504 p.

- KATOPODES, N.D. & STRELKOFF, T. - Hydrodynamics of Border Irrigation - Complete Model. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 103 (IR 3): 309 - 324.
- KARMELI, D.; SALAZAR, J.L. & WALKER, W.R. - 1978 - Asses sing the Spatial Variability of Irrigation Water Appli cations. Department of Agricultural and Chemical Engi neering. Colorado State University, Fort Collins, USA, 201 p.
- KINCAID, D.C.; HEERMANN, D. F. & KRUSE, E.G. - 1972 - Hy drodynãmica of Border Irrigations Advance. Transations of the ASAE. 15 (4): 674 - 680.
- HART, W. E.; BASSETT, D.L. & STRELKOFF, T. - 1968 -Surface Irrigation Hidraulics - Kinematics. Journal of the Irri gation and Drainage Division. ASCE. 94 (IR 4) : 419-440.
- LEVIEN, S.L. - 1985 - Desenvolvimento de um Modelo Matemã tico Simplificado da Irrigação Superficial por Sulcos Aberto em Declive. Dissertação de Mestrado.Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 91 p.
- MERRIAN, J.L. KELLER, J. - 1978- Farm Irrigation System Evaluation. A Guide for Managemet. Utah State Univer sity, Logan, USA. 271 p.

- OLITTA, A.F. - 1977 - Os Métodos de Irrigação. Livraria Nobel S.A., São Paulo, Brasil. 267 p.
- SCALOPPI, J. E. - 1986 - Projeto de Irrigação Superficial. Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Programa Nacional de Irrigação, Brasília, Brasil.T9.1-T9.55.
- SCS-USDA - 1980 - Furrow Irrigations.Chapter 5,Section 15, National Engineering handbook, Unedited Draft.110 p,
- SOUZA, F. de. - 1981 - Nonlinear Hydrodynamic Model of Furrow Irrigation. Sissertation of Doctor of Phylosophy, University of California, Davis, USA. 172 USA p.
- SOUZA, F. de. - 1983 - Hidráulica da Irrigação por Superfície. Apostila, 54 p.
- SOUZA, F. de. - 1984 - Modelo Matemático da Irrigação por sulcos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19 (9): 1135-1143.
- STRELKOFF. T. - 1977 - Algebraic Computation of Flow in Border Irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 103 (IR.3): 357-377.
- STRELKOFF, T. & SOUZA, F. - 1984- Modeling Efect of Depth on Furrow Infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 110 (4): 375 - 387.

- VILLASANTE, A.L. - 1987 - Riegos por Gravedad. Curso de Especialização em Engenharia de Irrigação. Universidade Politécnica de Madrid, Madrid. 73 p.
- TELLES, D.D. - 1986 - Métodos de Irrigação. Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Programa Nacional de Irrigação, Brasília, Brasil. T3.1-T3.100.
- HALL, W.E. - 1956 - Warimating Irrigation Border Flow. Agricultural Engineering, 37(4):263-265.
- BASSET, D.L. - 1972 - A Mathematical Model of Water Advance in Border Irrigation. Transactions of the ASAE. 15 (5): 992-995.
- SAKKAS, J. G. & STRELKOFF, T. - 1974 - Hydrodynamics of surface Irrigation. Advance Phase. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, 100 (LR1):31-48.
- WALKER, W.R.; and SKOGERBOE, G.V. - 1987 - Surface Irrigation. Theory and Prática. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 386 p.
- RODRIGUEZ, J.A. - 1989 - Determinação de Critérios de Irrigação Superficial Utilizando o Método do SCS- USDA para o Vale do Jaguaribe. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 180 p.

8 - ANEXOS

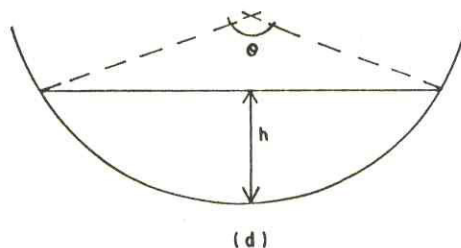
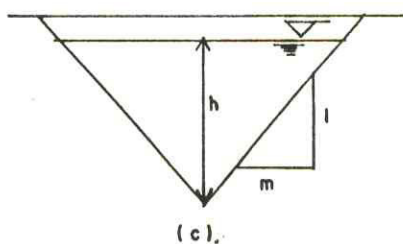
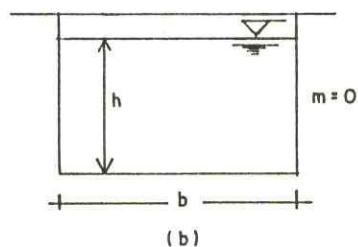
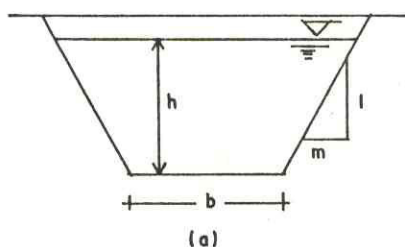
## ANEXO A

DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DO ARCO DA  
PARÁBOLA PARA CALCULAR O PERÍMETRO  
MOLHADO EM IRRIGAÇÃO POR SULCO.

ANEXO A - DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DO ARCO DA PARÁBOLA  
PARA CALCULAR O PERÍMETRO MOLHADO EM IRRIGAÇÃO  
POR SULCO.

FORMA GEOMÉTRICA DOS SULCOS

Quanto à forma geométrica, existem quatro tipos de sulcos: retangular, triangular, trapezoidal e parabólico. Pode-se considerar somente três tipos já que na prática os sulcos de forma trapezoidal tendem a forma parabólica.



A superfície livre de água em um sulco é:

$$B = C \cdot y^M$$

onde C e M são constantes, e y é a profundidade do fluxo, do ponto central do sulco e a superfície livre d'água. Para as formas retangular e triangular o valor de M é 0 e 1

respectivamente, para a forma parabólica o valor de M deve ser maior que zero (0) e menor que um (1).

Após definida a forma da seção transversal do sulco, a preocupação seguinte é conhecer as relações métricas envolvidas com suas dimensões e sua área, perímetro molhado e raio hidráulico. De uma forma genérica tem-se as relações mostrada no quadro abaixo para os três primeiros tipos.

Relações métricas entre as dimensões do sulco e a área da seção transversal, perímetro molhado e raio hidráulico.

Forma de Seção Transversal	Área	Perímetro Molhado	Raio Hidráulico
Trapezoidal	$A = h(b+mh)$	$P = b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{h(b+mh)}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$
Retangular	$A = b \cdot h$	$P = b + 2h$	$\frac{b \cdot h}{b + 2h}$
Triangular	$A = m \cdot h^2$	$P = 2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{m \cdot h^2}{2h\sqrt{1+m^2}}$

onde:  $h$  = altura da lâmina d'água no sulco  
 $b$  = largura do fundo do sulco  
 $m$  = inverso da declividade das faces laterais

A = área da seção transversal

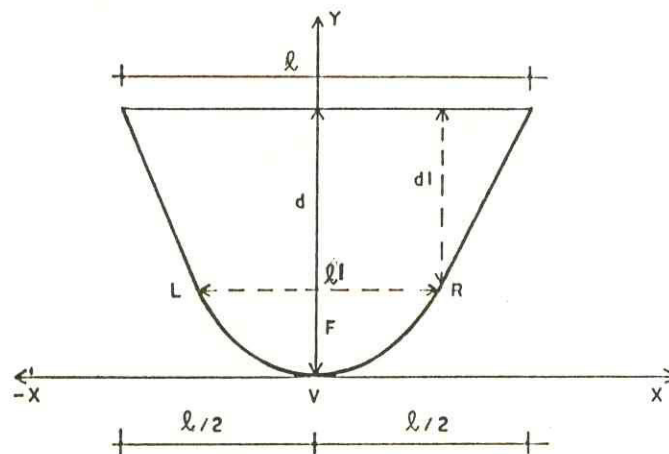
P = perímetro molhado

R = Raio Hidráulico

Para a forma parabólica, que foi a utilizada por LEVIEN (1985) em seu modelo matemático algébrico para sulcos abertos em declive, foi considerado o perímetro molhado igual a  $B = C y_n^M$ , onde  $y_n$  é a lâmina normal na cabeceira do sulco.

Como a forma do sulco é parabólica, podemos determinar o comprimento do arco da parábola e assumir que é o perímetro molhado.

Seja a seguinte parábola:



$$x^2 = a \cdot y$$

$$\text{Distância do vértice ao foco} = VF = \frac{1}{4} a$$

$$\text{Corda focal mínima} = LR = a$$

$$\begin{aligned} \text{o comprimento do arco} = s &= \int_0^{l/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \\ &= \int_0^{l/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dy \\ s &= \int_0^{l/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad \text{a. } y = x^2 \Rightarrow y' = \frac{2x}{a} \end{aligned}$$

utilizando a identidade,

$$\sec \theta = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} \quad \text{e fazendo}$$

$$\text{para } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$u = \operatorname{tg} \theta = \frac{2x}{a}, \text{ logo derivando}$$

$$dx = \frac{a}{2} \sec^2 \theta d\theta,$$

temos,

$$\begin{aligned} \int_0^{l/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} dx &= \int \sec \theta \cdot \frac{a}{2} \sec^2 \theta d\theta \\ &= \frac{a}{2} \int \sec^3 \theta d\theta \end{aligned}$$

Resolvendo por partes temos,

$$\int \sec^3 \theta d\theta = \int \sec \theta \cdot \sec^2 \theta d\theta$$

$$\begin{aligned} \int u \cdot dv &= \int \sec \theta \cdot \sec^2 \theta d\theta = \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta - \int \operatorname{tg}^2 \theta \cdot \\ &\cdot \sec \theta d\theta \end{aligned}$$

$$u = \sec \theta \quad du = \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$dv = \sec^2 \theta \, d\theta \quad v = \operatorname{tg} \theta$$

$$\int \sec^3 \theta \, d\theta = \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta - \int (\sec^2 \theta - 1) \sec \theta \cdot d\theta$$

$$\int \sec^3 \theta \, d\theta = \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta - \int \sec^3 \theta \, d\theta + \int \sec \theta \, d\theta$$

$$2 \int \sec^3 \theta \, d\theta = \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta + \operatorname{Ln} (\sec \theta + \operatorname{tg} \theta)$$

$$\int \sec^3 \theta \, d\theta = \frac{1}{2} \sec \theta \cdot \operatorname{tg} \theta + \frac{1}{2} \operatorname{Ln} (\sec \theta + \operatorname{tg} \theta); \text{ logo}$$

$$\int_0^{\ell/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} \, dx = \frac{a}{4} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} \cdot \frac{2x}{a} + \operatorname{Ln} (\sec \theta + \operatorname{tg} \theta) \right]$$

Como temos os dois lados do arco para formar a parábola, o comprimento total é:

$$\begin{aligned} S &= 2 \cdot \bar{s} = 2 \int_0^{\ell/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} \, dx \\ S &= 2 \int_0^{\ell/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} \, dx = \frac{a}{4} \left[ \frac{2x}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} + \operatorname{Ln} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} + \frac{2x}{a} \right) \right] \\ &= \frac{a}{4} \left[ \frac{\ell}{a} \sqrt{1 + \frac{\ell^2}{a^2}} + \operatorname{Ln} \left( \sqrt{1 + \frac{\ell^2}{a^2}} + \frac{\ell}{a} \right) \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{a}{4} \left[ \frac{\frac{l}{2}}{4d} \sqrt{1 + \frac{\frac{l^2}{4}}{16d^2}} + \text{Ln} \left( \sqrt{1 + \frac{\frac{l^2}{4}}{16d^2}} + \frac{\frac{l}{2}}{4d} \right) \right]$$

$$= \frac{a}{4} \left[ \frac{4d}{l} \sqrt{1 + \frac{16d^2}{l^2}} + \text{Ln} \left( \sqrt{1 + \frac{16d^2}{l^2}} + \frac{4d}{l} \right) \right]$$

$$= \frac{a}{4} \left[ \frac{4d}{l} \sqrt{\frac{l^2 + 16d^2}{l^2}} + \text{Ln} \left( \sqrt{\frac{l^2 + 16d^2}{l^2}} + \frac{4d}{l} \right) \right]$$

$$2 \int \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} dx = \frac{l^2}{16d} \left[ \frac{4d}{l} \sqrt{l^2 + 16d^2} + \right. \\ \left. + \text{Ln} \left( \frac{\sqrt{l^2 + 16d^2} + 4d}{l} \right) \right]$$

$$s = 2 \int \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} dx = \frac{l^2}{8d} \left[ \frac{4d}{l} \sqrt{l^2 + 16d^2} + \right. \\ \left. + \text{Ln} \left( \frac{\sqrt{l^2 + 16d^2} + 4d}{l} \right) \right]$$

$$s = \int \sqrt{1 + \left(\frac{2x}{a}\right)^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{l^2 + 16d^2} + \\ + \frac{l^2}{8d} \text{Ln} \left( \frac{\sqrt{l^2 + 16d^2} + 4d}{l} \right)$$

fazendo,

$$l = 2x \quad (i)$$

$$l_1 = a$$

$$d_1 = d - \frac{a}{4}$$

quando,  $y = d \Rightarrow x^2 = ad$

elevando a equação (i) ao quadrado e desenvolvendo, teremos:

$$l^2 = 4ad \quad a = (l^2/4d)$$

$$l^4 = 16a^2d^2 \quad a^2 = l^4/16d^2$$

$$l^2 = a^2$$

$$\frac{l_1}{4} = d - d_1 \Rightarrow l_1 = 4(d - d_1), \text{ multiplicando os}$$

dois termos por  $(l_1 d)$  teremos:

$$l_1^2 \cdot d = 4 l_1 d (d - d_1) \text{ substituindo o valor de}$$

$4 l_1 d$ , teremos:

$$l_1^2 \cdot d = l^2 (d - d_1) \quad (I)$$

logo,

$$\ell_1 = \ell \sqrt{\frac{d - d_1}{d}}$$

$\ell_1$  = corda do segmento

o valor de  $d_1$  é obtido da equação (I)

$$\ell_1^2 \cdot d = \ell^2 (d - d_1)$$

$$\ell_1^2 d = \ell^2 d - \ell^2 d_1 \Rightarrow \ell^2 d_1 = \ell^2 d - \ell_1^2 d$$

$$\ell^2 d_1 = d (\ell^2 - \ell_1^2)$$

$$d_1 = \frac{d}{\ell} (\ell^2 - \ell_1^2), \text{ altura do segmento.}$$

Para o comprimento do arco da parábola determinado podemos observar que a profundidade  $d$  é  $y_n$  e a largura  $\ell$  é  $B$ . Substituindo esses valores obtemos a seguinte equação para o arco da parábola:

$$s = P_m = \frac{1}{2} \sqrt{B^2 + 16y_n^2} + \frac{B^2}{8y_n} \text{Ln} \left( \frac{4y_n + \sqrt{B^2 + 16y_n^2}}{B} \right)$$

O perímetro molhado na cabeceira do sulco, admitindo as hipóteses assumida por LEVIEN (1985) deve ser assumido igual ao arco da parábola.

Onde:

$y_n$  = Lâmina normal, determinado pela equação,

$$y_n = \left\{ \frac{Q \cdot n^{0,5}}{C_u \cdot S_o} \cdot \frac{(M + 1)^{5/3}}{C} \right\}^{\frac{3}{3M + 5}}$$

onde:

- $Q$  = vazão de entrada
- $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning
- $C_u$  = unidade que depende do sistema métrico ou inglês.  $C_u = 1,0$  SMD;  $C_u = 1,465$  no sistema inglês.

$C$  e  $M$  = constante da equação que expressa a geometria do sulco.

$$B(y_n) = C \cdot y_n^M \quad (\text{superfície livre de água})$$

ANEXO B

NOTAÇÕES

## ANEXO B - NOTAÇÕES

a	= expoente da equação de infiltração de Kostiakov;
$A_0$	= área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco;
ATN	= arco Tangente;
$\bar{A}_Y$	= área média da seção transversal do sulco;
$A(y_n)$	= área da seção transversal de fluxo, função de $y_n$ ;
$A_z$	= volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco;
$\bar{A}_z$	= área média infiltrada;
$A_{z_0}$	= área infiltrada acumulada;
$A_{z_r}$	= área infiltrada requerida;
$B^1$	= largura da superfície livre da água no sulco;
$B(y_0)$	= largura da superfície livre da água, função de $y_0$ ;
$B(y_1)$	= largura da superfície livre da água, função de $y_1$ ;
C	= coeficiente da equação da largura da superfície livre da água no sulco;
$C_u$	= coeficiente dependente do sistema de unidades usado;
E	= espaçamento entre sulcos;

$E_a$	= eficiência de aplicação da água;
$E_s$	= eficiência de armazenamento;
$G$	= constante;
$\bar{I}$	= taxa de infiltração média do sulco;
$I(t_r)$	= taxa de infiltração, função de $t_r$ ;
$I(t_r - t_{av})$	= taxa de infiltração, função de $(t_r - t_{av})$ ;
$I(t)$	= taxa de infiltração, função de ;
$k$	= coeficiente da equação de infiltração de Kostiakov;
$l$	= porção inundada do sulco;
$L$	= comprimento do sulco
$M$	= expoente da equação da superfície livre da água;
$n$	= coeficiente de Manning;
$P_m$	= perímetro molhado;
$Q$	= vazão;
$Q_o$	= vazão de entrada do sulco;
$Q_{inf}$	= vazão infiltrada no sulco;
$Q_1$	= vazão no início do sulco;
$Q_1(t_r)$	= vazão no final do sulco, função de $t_r$ ;
$r_y$	= fator de forma do perfil superficial;
$r_z$	= fator de forma do perfil subsuperficial;
$S$	= comprimento de duas metades do arco da parábola;
$s$	= metade de um arco de parábola;
$S_o$	= declividade do sulco;

- $S_y$  = declividade da superfície da água;  
 $t_{av}$  = tempo de avanço da água no sulco;  
 $t_{co}$  = tempo de aplicação de água no sulco;  
 $t_C$  = tempo no qual a irrigação termina;  
 $t_r$  = tempo no qual a recessão começa;  
 $V$  = volume;  
 $V_o$  = volume aplicado no sulco;  
 $V_{ro}$  = volume escoado superficialmente;  
 $V_u$  = volume útil;  
 $V_z$  = volume infiltrado no solo;  
 $V_y$  = volume armazenado na superfície do solo;  
 $V_{ro}(t)$  = volume de escoamento superficial no tempo  $t$ ;  
 $V_{ro}(t_r)$  = volume de escoamento superficial em  $t_r$ ;  
 $V_{ro}(t_e)$  = volume total de escoamento superficial no tempo  $t_e$ ;  
 $V_y(t_r)$  = volume superficial no tempo  $t_r$ ;  
 $V_z(t_r)$  = volume infiltrado no tempo  $t_r$ ;  
 $x_a$  = distância de avanço da água durante o intervalo de tempo  $t$ ;  
 $Y_o$  = lâmina d'água na cabeceira do sulco;  
 $Y_1$  = lâmina d'água no final do sulco;  
 $Y_1(t_r)$  = lâmina d'água no final do sulco, função de  $t_r$ ;  
 $Y_n(\partial)$  = lâmina normal, função de  $\partial$  ;  
 $Y_n(\partial_1)$  = lâmina normal, função de  $\partial_1$ ;

- $z_r$  = lâmina infiltrada requerida
- $z(t)$  = lâmina infiltrada acumulada, função de  $t$ ;
- $z(t_r)$  = lâmina infiltrada acumulada, função de  $t_r$ ;
- $z(t_r - t_{av})$  = lâmina infiltrada acumulada, função de  $(t_r - t_{av})$ ;
- $\tau$  = tempo de infiltração.