

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS  
ATRAVÉS DO MODELO SRFR**

**RUI RODRIGUES AGUIAR**

**BCT / UFC CATIVO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

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

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**FORTALEZA - 1994**

UFC/BU/BCT 23 Mai 1997



R598399  
C342378

Simulacao e analise da irrigacao por sul

C342378

T  
634.587  
A2323  
1994  
ex. 1

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A232s Aguiar, Rui Rodrigues.  
Simulação e análise da irrigação por sulcos através do modelo SRFR / Rui Rodrigues Aguiar. – 1994.  
130 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 1994.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Souza.

1. Engenharia Agrícola. I. Título.

CDD 630

---

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Irrigação e Drenagem, autorizado pela Universidade Federal do Ceará. Cópias deste trabalho encontram-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central e no Departamento de Engenharia Agrícola da referida universidade.

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

Rui Rodrigues Aguiar  
Engo Civil - CREA 10,075-D

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 27/12/94

Francisco de Souza, PhD  
Orientador da Dissertação

Antonio Nunes de Miranda, PhD  
Conselheiro

Moisés Custódio Saraiva Leão, PhD  
Conselheiro

Paulo Theodoro de Castro, Ms  
Conselheiro



Eis que um rei reinará conforme a justiça  
e os príncipes governarão segundo o direito.  
E cada um será como um abrigo contra o vento,  
como um esconderijo contra o temporal,  
como canais de água em terra seca,  
como a sombra de um enorme rochedo  
em uma terra árida.

Isaias 32, 1-2

## DEDICO

Este trabalho é dedicado especialmente aos meus avôs Francisco Feliciano Rodrigues e José Isidrio Sobrinho, que tiraram do sertão cearense as forças para a sobrevivência da suas famílias, e ao meu sogro José Victor Medeiros (*in memoriam*) que sempre foi e será para mim um referencial de dedicação e amor.

## AGRADECIMENTOS

Um galo sozinho não tece uma manhã:  
ele precisará sempre de outros galos.  
De um que apanhe esse grito que ele  
e o lance a outro; de um outro galo  
que apanhe o grito que um galo antes  
e o lance a outro; e de outros galos  
que com muitos outros galos se cruzem  
os fios de sol de seus gritos de galo,  
para que a manhã, desde uma teia tênue,  
se vá tecendo, entre todos os galos.

("Tecendo a Manhã"

João Cabral de Melo Neto)

Estes versos de João Cabral de Melo Neto me acompanham desde a adolescência e hoje são mais verdadeiros do que nunca. Agora, quando encerro os trabalhos desta dissertação de mestrado, percebo que muitas mãos são responsáveis por cada parcela e cada ponto dela. É difícil citar cada pessoa na sua dimensão correta de colaboração. Dentro de uma perspectiva cronológica, os primeiros co-autores são a minha esposa Cristiana Carla, Ana Flávia Tomás e Cônego Aluisio, que me incentivaram a fazer a seleção. Na seleção e em todo curso estiveram amigavelmente presentes Rogério Brito, Willa Sousa, Josanias Barbosa, Mauricio Rodrigues e Ivan Albuquerque do Departamento de Engenharia Agrícola. Durante o processo de seleção e nivelamento o encontro com três pesquisadores da irrigação mudou a minha vida e, de uma forma muito honrosa para mim, hoje integram a banca examinadora desta dissertação: Francisco de Souza, Moisés Custódio Saraiva e Paulo Theodoro de Castro. O

professor Francisco de Souza, com seu exemplo de dedicação e ética profissional, introduziu-me na pesquisa científica, dando-me os meios e a linguagem, além da visão sistêmica dos processos que envolvem a engenharia de irrigação. Os professores Moisés Custódio e Paulo Theodoro desmistificaram a elaboração de projetos, auxiliando sobremaneira um engenheiro civil na casa de engenheiros agrônomos. O cuidado com a forma e a precisão vem dos professores Luis Gonzaga Rebouças e Luis Carlos Saunders, a quem devo também os ensinamentos mais próximos da minha área de atuação. É marcante também e essencial a solidariedade e companheirismo dos amigos de turma e engenheiros agrônomos Berthier Peixoto, Diana Cely Albuquerque, Luis de França Cambuy, Marcos Bezerra, Odílio Câmara, Wanderlei Guimarães, Wellington Farias e Yuri Oliveira.

Na elaboração da tese foi imprescindível o apoio do professor Antonio Nunes de Miranda, que me abriu as portas do mercado de trabalho e me ensinou a projetar em engenharia, juntamente com os engenheiros José de Ribamar P. Barbosa, Luciano Gonçalves Scipião e Suetônio Mota. Os amigos Francisco Sérgio do Nascimento e Washington Campelo me ensinaram a trabalhar com computadores e muito deste trabalho é devido a eles, aos quais deve-se somar o nome de Paulo Casimiro. João Theodoro e Elidia, que apoiaram na montagem, diagramação, apresentação e defesa da dissertação. Sérgio Ricardo, Rebeca Furtado, Fábio Sobral e Adriana Eufrásio torceram de uma forma invejável, mudando o sentido da palavra amizade.

O pouco de "humanismo" que há neste trabalho estritamente técnico é devido aos professores Ozir Tesser, Sofia Lerche Vieira e Terezinha Maciel que têm me influenciado diariamente com suas idéias em educação.

Uma menção especial deve ser feita aos meus pais, Rui Isidoro e Socorro Rodrigues, e aos meus irmãos Rotsen, Patrícia, Cristina, Iara e Rafael, que me incentivaram e têm me cobrado o término para uma grande comemoração.

Finalmente, na outra ponta da cronologia a presença sempre constante de Cristiana, que sempre foi e sempre será o princípio e fim de tudo, acrescida agora da nossa pequena Gabriela, a quem dedico todos os esforços deste trabalho.

## SUMÁRIO

	página
LISTA DE TABELAS . . . . .	x
LISTA DE FIGURAS . . . . .	xv
RESUMO . . . . .	xvii
ABSTRACT . . . . .	xviii
1.0 INTRODUÇÃO . . . . .	1
2.0 REVISÃO DE LITERATURA . . . . .	4
2.1 HIDRÁULICA DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE . . . . .	4
2.1.1 Escoamento em Canais Abertos . . . . .	4
2.1.2 Princípios da Continuidade de Massa e Conservação do Momentum ou Energia . . . . .	7
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE . . . . .	11
2.2.1 Desenvolvimento da Hidráulica e dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície . . . . .	12
2.2.2 Classificação dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície . . . . .	12
2.2.3 Esquema Simplificado dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície (SOUZA, 1992) . . . . .	23
2.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS NO DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE . . . . .	23
2.3.1 Modelo Inércia Zero . . . . .	25
2.3.2 Modelo Onda Cinemática . . . . .	27

2.3.3 Modelos Conceituais (Balanço de Volume) . . . . .	27
2.3.4 Modelos Hidrodinâmicos . . . . .	28
2.3.5 Modelos Algébricos Completos . . . . .	29
2.3.6 Modelo Não-Linear de Otimização . . . . .	30
2.3.7 Modelos de Produção em Irrigação por Superfície . . . . .	30
2.4 DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO RELAÇÕES EMPÍRICAS . . . . .	30
2.5 UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA NA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE . .	34
2.5.1 Distribuição da Água na Irrigação Superficial . . . . .	35
3.0 METODOLOGIA . . . . .	38
3.1 RESUMO DO PROGRAMA SRFR - MODELO INÉRCIA-ZERO, PARA A SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE . . . . .	38
3.1.1 Entrada de Dados . . . . .	40
3.1.2 Saída de Dados . . . . .	45
3.1.3 Parâmetros de Uniformidade e Eficiência de Irrigação utilizados pelo SRFR . . . . .	49
3.2 HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO SUPERFICIAL ADOTADAS NA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA SRFR . . . . .	53
3.3 DADOS UTILIZADOS . . . . .	54
3.4 FLUXO DE ANÁLISES E SIMULAÇÕES . . . . .	56
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	60
4.1 RESULTADOS APRESENTADOS PARA OS DADOS DE RAMSEY (1976) .	60
4.1.1 Dados de Entrada . . . . .	60
4.1.2 Análise do Avanço, Recessão e Infiltração . . . . .	61
4.1.3 Parâmetros de Uniformidade . . . . .	73
4.1.4 Parâmetros de Eficiência . . . . .	80
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS SIMULAÇÕES FEITAS PARA DADOS DE RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) E ELLIOTT et alli (1980) COM O PROGRAMA SRFR . . . . .	89
4.2.1 Vazão Inicial Constante . . . . .	91

4.2.2 Vazão Inicial Reduzida quando $T = T_L$ . . . . .	99
4.3 OUTRAS APLICAÇÕES DO PROGRAMA SRFR. ESTUDO DE UM CASO .	103
5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .	109
6. BIBLIOGRAFIA . . . . .	112
7. ANEXOS . . . . .	118
ANEXO 01 RELATÓRIO DE SAÍDA DE DADOS (SRFR.OUT) PARA O CASO DE VAZÃO INICIAL CONSTANTE E RAZÃO DE AVANÇO 1/13 PARA DADOS DE RAMSEY (1976). . . . .	119
ANEXO 02 LISTA DE SIMBOLOS E NOTAÇÕES . . . . .	126

## LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁGINA
01	Desenvolvimento da hidráulica e modelos matemáticos da irrigação por superfície (1848-1965)	13
02	Desenvolvimento da hidráulica e modelos matemáticos da irrigação por superfície (1965-1979)	14
03	Classificação dos modelos matemáticos da irrigação por superfície (segundo STRELKOFF e CLEMMENS, 1984)	15
04	Equações do avanço da frente de onda , $s(t)$ , segundo TABUADA (1979)	17
05	Esquema simplificado dos modelos matemáticos da irrigação por superfície, segundo SOUZA (1992)	24
06	Comprimentos máximos sugeridos para sulcos para diferentes solos, declividades e lâminas de água a serem aplicadas (comprimentos em metros, lâminas em centímetros)	32
07	Formulário para entrada de dados destinados ao programa SRFR - Surface Furrow - (STRELKOFF, 1990). Exemplo de entrada de dados para simulação da vazão inicial constante e razão de avanço (TL/Tinf) igual a 1/13 para dados de RAMSEY (1976).	40
08	Descrição dos parâmetros de entrada de dados e listagem do arquivo SRFR.DAT do programa SRFR - Surface Furrow - (STRELKOFF, 1990). Exemplo de entrada de dados para simulação da vazão inicial constante e razão de avanço (TL/Tinf) igual a 1/13 para dados de RAMSEY (1976).	45

- 09 Dados de campo para simulação da irrigação por sulcos através do programa SRFR - Surface Furrow - (STRELKOFF, 1990). 46
- 10 Dados de entrada para simulação da irrigação por sulcos para RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT et alli (fazendas Stieben e Benson, 1980). 53
- 11 Dados de entrada para simulação da irrigação por sulcos para RAMSEY (1976). 59
- 12 Resultados obtidos por RAMSEY (1976) confrontados com os dados obtidos pelo programa SRFR para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razão de avanço 1/13. 62
- 13 Perfil de distribuição da água infiltrada após a irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13. 64
- 14 Perfil de distribuição da água infiltrada após a irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13. 69
- 15 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante, igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13. 72
- 16 Parâmetros de uniformidade para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante, igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13. 74

- 17 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13. 76
- 18 Parâmetros de uniformidade para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13. 78
- 19 Parâmetros de eficiência para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante, igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13. 79
- 20 Parâmetros de eficiência para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13. 83
- 21 Dados de entrada para simulação da irrigação por sulcos para RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT et alli ( fazendas Stieben e Benson, 1980). 88
- 22 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de SOUZA et alli (1987) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 1,00 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 4,80 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/11. 90
- 23 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Stieben,1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 0,59 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 2,43 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/6.1. 91

- 24 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson,1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 1,61 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 5,58 cm e razões de avanço 1/1.53, 1/2, 1/4 e 1/6. 92
- 25 Parâmetros de uniformidade e fração de escoamento superficial em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos ( RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos ( ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial constante. 93
- 26 Parâmetros de eficiência em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos ( RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos ( ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial constante. 95
- 27 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de SOUZA et alli (1987) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,00 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 4,80 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/11. 97
- 28 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Stieben,1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 0,59 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 2,43 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/6.1. 98
- 29 Sinopse dos resultados da irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson,1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,61 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 5,58 cm e razões de avanço 1/1.53, 1/2, 1/4 e 1/6. 99

- 30 Parâmetros de uniformidade e fração de escoamento superficial em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos ( RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos ( ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial reduzida à metade ao final da fase de avanço. 101
- 31 Parâmetros de eficiência em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos ( RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos ( ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial reduzida à metade ao final da fase de avanço. 102
- 32 Uniformidade de distribuição (DU), escoamento superficial (RP), eficiência de irrigação (IE) e eficiência de armazenamento (SE) para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson, 1980), variando-se o comprimento do sulco (L), tempo de avanço (TL), declividade do sulco (So) e rugosidade (constante "n" - NMAN - da fórmula de Manning), mantendo-se constante a lâmina requerida de infiltração (ZREQ), obtidos através do programa SRFR. 103

## LISTA DE FIGURAS

TABELA	PÁGINA
01 Elemento de fluido dentro de um sulco com fluxo não permanente e variado, segundo WALKER e SKOGERBOE (1987).	8
02 Visão magnificada do elemento de fluido em um sulco, com fluxo não permanente e variado, segundo WALKER e SKOGERBOE (1987).	10
03 Perfil esquemático com os elementos básicos do modelo balanço de volume, segundo TABUADA (1989).	22
04 Perfil de distribuição da água na irrigação superficial, segundo KARMELI, 1978.	36
05 Fluxo de análises e simulações.	58
06 Gráfico de avanço, recessão e infiltração a partir do perfil de distribuição de água infiltrada utilizando-se vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) igual a 13,62 cm e razão de avanço (TL/Tinf) de 1/13, confrontando os resultados apresentados pelo programa SRFR e os resultados apresentados por RAMSEY(1976).	61
07 Gráfico de avanço, recessão e infiltração a partir do perfil de distribuição de água infiltrada utilizando-se vazão inicial ( $Q_0$ ) constante igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) igual a 13,62 cm e razão de avanço (TL/Tinf) de 1/4, para dados de RAMSEY (1976).	68
08 Gráfico razão de avanço vs. parâmetros de uniformidade (UCC, UCH, DU e DULQ) e fração de escoamento superficial (RP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976).	75

- 09 Gráfico razão de avanço vs. parâmetros de uniformidade (UCC, UCH, DU e DULQ) e fração de escoamento superficial (RP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/5, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 77
- 10 Gráfico razão de avanço vs. eficiência de irrigação (IE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 80
- 11 Gráfico razão de avanço vs. eficiência de armazenamento (SE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 81
- 12 Gráfico razão de avanço vs. percentagem de área adequadamente irrigada (AAP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 82
- 13 Gráfico razão de avanço vs. eficiência de irrigação (IE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 84
- 14 Gráfico razão de avanço vs. eficiência de armazenamento (SE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 85
- 15 Gráfico razão de avanço vs. percentagem de área adequadamente irrigada (AAP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33 l/s e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6, 1/13 para dados de RAMSEY (1976). 86

## RESUMO

Neste trabalho o programa de computador SRFR (Surface Furrow) - Versão 20, desenvolvido por STRELKOFF (1990) para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) e baseado nas equações hidráulicas da irrigação por superfície (particularmente o modelo zero-inércia), foi aplicado na simulação e na análise de quatro diferentes conjuntos de dados referentes a situações de campo.

Foram testadas duas hipóteses: uma com relação a variação da vazão aplicada ao sulco ( $Q_0$ ) e outra relativa ao tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ). Na primeira hipótese o programa SRFR foi utilizado para simular duas condições diferentes: vazão inicial constante e inicial reduzida ao final da fase de avanço. Na segunda hipótese o programa foi utilizado para simular a irrigação segundo o critério proposto por CRIDDLE et alli (1956), o qual estabelece que a irrigação é mais uniforme quando a razão de avanço é igual a 1/4. Para cada uma das hipóteses foram testadas quatro diferentes razões de avanço. Os resultados foram analisados em dois grupos: sulcos curtos e sulcos longos. Os resultados obtidos indicam que os sistemas cujos dados foram testados podem ter sido mau dimensionados, uma vez que os parâmetros de performance de irrigação alcançados estão abaixo dos limites recomendados. Por outro lado, os resultados obtidos com a hipótese de redução de vazão indicam que a redução de vazão proporciona um aumento substancial de eficiência de irrigação. Quanto ao comprimento do sulco, a performance alcançada pelos sulcos curtos é bastante superior à obtida nos testes com sulcos longos.

Ao final do trabalho, são recomendados estudos mais detalhados, na perspectiva do lançamento de uma versão interativa do programa. Estes estudos deverão analisar as performances obtidas com diferentes vazões, declividades, tempo de irrigação e dados de solo. A metodologia apresentada é recomendada, entre outras aplicações, para o ensino, pesquisa e dimensionamento de projetos de sistemas de irrigação por sulcos.

## ABSTRACT

A computer model SRFR (Surface Furrows), version 20 (STRELKOFF, 1990), based on the solution of the Saint-Venant equations, was applied to the analysis for four different set of field data.

Two situations were studied. In the first case, the streamflow was used as a constant inflow and as a cutback flow, at the end of advance phase. In the second case the program used applied to simulate irrigation based on CRIDDLE et alli (1956) 1/4 rule. For each case four different advance-ratios were used, both for short and large furrows.

Results indicate that the irrigation systems under analysis performed below recomended levels. On the other hand, it seems that cutback has a major role in incrementing irrigation efficiency. Besides, short furrows performed better thant long furrows.

Fynally, more detailed studies are recommended including a new interative version of the program. Such studies should relate to simulates with different parameters (streamflows, slope, cut-off time and soil parameters). The methodologie used herein is recommended to teaching and research as well as for desing purposes.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O nordeste brasileiro discute hoje o seu desenvolvimento sustentável, particularmente dentro das suas regiões semi-áridas, onde os conflitos de água têm sido intensificados pelo crescimento populacional, degradação ambiental e mau uso dos recursos hídricos escassos. Surgem como conflitos emergentes as políticas de eletrificação, irrigação e abastecimento humano. Cada setor desses, demanda uma quantidade de água que limita os demais, numa relação entre custos de oferta e custos de oportunidade. É importante notar que a irrigação demanda ao mesmo tempo grandes quantidades de água e potência instalada de energia elétrica, constituindo, deste modo, um desafio para os gestores e projetistas.

Neste cenário, o governo do Estado do Ceará tem implementado nos últimos anos uma política de gerenciamento de recursos hídricos baseada na divisão do território cearense em bacias hidrográficas, onde estão sendo estudados e monitorados os recursos hídricos disponíveis e potenciais. Essa política terá como desdobramento a construção de obras hídricas, aumento das áreas irrigadas e cobrança pelo uso da água, entre outras medidas de caráter institucional.

Os projetos de irrigação, em decorrência desta política de recursos hídricos, terão que ser adaptados à nova filosofia de gerenciamento, buscando a racionalização do uso de água e de energia elétrica, sem prejudicar o abastecimento humano. Dois caminhos podem ser vislumbrados como solução a este desafio: a implantação de novas práticas de manejo e a incorporação de novas metodologias de projeto. As palavras chaves nesse processo são: monitoramento, avaliação em tempo-real, "feed-back", análise, manejo racional e projetos auto-ajustáveis com o tempo. É preciso, desta forma, que os campos

de irrigação sejam monitorados e acompanhados diariamente para que se conheça os reais parâmetros de eficiência e distribuição da irrigação. Esses parâmetros devem ser avaliados com os parâmetros correntes e realimentar os bancos de dados das comunidades técnicas e científicas.

A irrigação pode ser feita por métodos pressurizados ou por métodos gravitacionais. No primeiro caso são restrições comuns os altos custos de capital inicial e o grande consumo de energia elétrica. No segundo caso a restrição é devida ao alto consumo de água. Cada grupo de métodos tem restrições culturais, topográficas e climáticas, havendo casos, no entanto, em que o projetista pode optar por um ou por outro grupo. No caso nordestino, há de se conciliar as necessidades de emprego de mão-de-obra e restrição de uso de água. Faz-se necessário, portanto, a perfeita compreensão dos fenômenos hidráulicos e climatológicos, não se podendo excluir o fenômeno social no momento em que se projeta um sistema de irrigação ou quando se monta uma política de recursos hídricos. A expansão da irrigação pressurizada tem sido responsável, nos últimos anos, pela dispensa de mão-de-obra agrícola, processo que tende a agravar-se com a mecanização. Por outro lado, os sistemas pressurizados não têm sido adequadamente avaliados. A irrigação por superfície, por seu turno, tem sido relegada a culturas de subsistência e, não muito raramente, com práticas de manejo ultrapassadas.

A pesquisa científica, em contra-ponto a tudo isto, tem se voltado para a determinação da modelagem matemática da hidráulica da irrigação superficial como uma forma de torná-la mais eficiente e viável economicamente nas regiões semi-áridas. Programas computacionais foram estruturados tomando como base os modelos zero-inércia, onde cinemática, balanço de volume e hidrodinâmico completo, tirando partido das velocidades de processamento das equações de Sain-Venant (princípios da conservação de massa e *momentum*) possibilitadas pela micro-informática. Estes programas permitem, com base em dados de campo confiáveis, a simulação e a análise da irrigação superficial em curto espaço de tempo. Deste modo, o projetista pode testar diversas alternativas de manejo e custo antes de definir o projeto executivo. A avaliação das alternativas é feita sobre parâmetros de eficiência e distribuição

fornecidos pelos "out-puts" dos programas.

O objetivo deste trabalho é aplicar um modelo matemático da hidráulica da irrigação por superfície, o SRFR (Surface Furrows) - Versão 20 - para a análise e a simulação da irrigação por sulcos. O programa foi desenvolvido por STRELKOFF (1990) e se destina também a faixas e bacias. A partir destas análises e simulações será traçada uma metodologia de trabalho voltada para a aplicação do modelo na verificação da performance de sistemas já dimensionados e na elaboração de novos sistemas de irrigação superficial por sulcos.

O segundo capítulo deste trabalho é dedicado à revisão de literatura no âmbito da modelagem matemática da irrigação por superfície, enquanto que no terceiro capítulo são fornecidos os caminhos metodológicos e materiais empregados nas simulações feitas com o programa SRFR; no quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nestas simulações. O quinto capítulo é dedicado às conclusões e considerações finais sobre os resultados obtidos.

## **2.0 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 HIDRÁULICA DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

#### **2.1.1 Escoamento em Canais Abertos**

O fluxo da água num conduto pode ser feito através de canais abertos ou fechados. Os dois tipos de fluxo são similares em muitos aspectos, mas diferem em um aspecto especial: o fluxo em canais abertos obrigatoriamente tem uma superfície livre, enquanto que o fluxo em canais fechados (ou tubulações) não apresenta esta particularidade, uma vez que a água pode preencher o conduto inteiramente. No caso de canais abertos a superfície livre é sujeita à pressão atmosférica. O fluxo em canais fechados, estando confinado, não está sujeito à pressão atmosférica diretamente, mas somente à pressão hidráulica.

Apesar das semelhanças entre os dois tipos de fluxo, é muito mais difícil resolver os problemas relacionados com o fluxo em canais abertos do que em tubulações sob pressão. Segundo CHOW (1973) as condições de fluxo em canais abertos são dificultadas pelo fato de que a posição da superfície livre é variável em relação ao tempo e ao espaço, e também porque a lâmina de fluxo, a vazão e as declividades do fundo do canal e da superfície livre são interdependentes. As condições físicas em canais abertos variam muito mais do que nos canais fechados dificultando a obtenção de dados de campo confiáveis. Nos canais abertos a superfície do conduto varia desde as superfícies de metais polidos usados em calhas medidoras de vazão até os leitos irregulares e rugosos dos rios. Além disso, a rugosidade em um canal aberto varia com a posição da superfície livre. Portanto, a escolha de coeficientes de

atrito é acompanhada por um grau de incerteza muito maior em canais abertos do que em condutos fechados. Em geral, o tratamento de fluxo em canais abertos é um tanto mais empírico do que o fluxo em condutos fechados. Os métodos empíricos são os melhores disponíveis no momento e, se cuidadosamente aplicados, podem dar bons resultados como valores práticos.

O fluxo em canais abertos pode ser classificado e descrito de várias maneiras. CHOW (1973) os classifica da seguinte forma:

a) Escoamento em Regime Permanente:

- fluxo uniforme;
- fluxo variado:
  - fluxo gradualmente variado;
  - fluxo rapidamente variado.

b) Escoamento em Regime Não-Permanente:

- escoamento não-permanente uniforme (raro);
- escoamento não-permanente (escoamento não-permanente variado):
  - escoamento gradualmente não-permanente;
  - escoamento rapidamente não-permanente variado.

O escoamento em canais abertos é dito "permanente" se a lâmina de vazão não mudar ou se puder considerá-la constante durante o intervalo de tempo em questão, e é dito não-permanente se a lâmina mudar com o tempo. Segundo CHEN (1973) a maioria dos problemas em canais abertos são tratados em condições de escoamento permanente. Se, entretanto, a mudança na condição do fluxo em relação ao tempo é mais expressiva, o escoamento deverá ser tratado como não-permanente. Em inundações e ondas de propagação de enchentes, que são exemplos típicos de escoamento não-permanente, as condições iniciais dos locais por onde o fluxo passa mudam instantaneamente, e o fator tempo torna-se vital no dimensionamento de estruturas de controle.

A vazão numa determinada seção do canal é expressa por:

$$Q = V.A \quad (1)$$

onde "V" é a velocidade média e "A" é a área da seção transversal normal à direção do fluxo.

No escoamento permanente a vazão é constante ao longo de todo o canal. Em outras palavras, o fluxo é contínuo. Então usando a EQUAÇÃO 2,

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2 = \dots \quad (2)$$

onde os índices subscritos indicam as diferentes seções do canal. Esta é a equação da continuidade para o escoamento permanente.

CHOW (1973) considera a EQUAÇÃO 1 inválida quando a vazão de um escoamento permanente é não-uniforme ao longo do canal, isto é, quando há perda d'água dentro ou fora do canal de escoamento. Este tipo de escoamento, conhecido como espacialmente variado ou descontínuo, ocorre em sarjetas de rodovias, canais de vertedouro, canais efluentes de estações de tratamento de esgotos, canais principais de drenagem e canais alimentadores em sistemas de irrigação.

A lei da continuidade no escoamento não-permanente considera o efeito do tempo. Como consequência a equação da continuidade para o escoamento não-permanente inclui o elemento tempo como variável.

A natureza do escoamento de um fluido real é complexa e as leis básicas que descrevem o movimento de um fluido não são de fácil formulação, nem de fácil manejo matemático, requerendo recursos experimentais para serem estabelecidas.

Segundo SOUZA (1984), a irrigação por superfície, e mais especificamente a irrigação por sulcos, é feita através de canais abertos em regime de escoamento não-permanente e variado, onde a vazão num determinado ponto muda com o tempo devido à dependência que tem o comportamento do solo ao tempo. No final da frente de avanço da água, particularmente, a lâmina varia

com o tempo e o espaço (WALKER e SKOGERBOE, 1987).

Equações que descrevem a continuidade de massa, momentum e/ou energia para esta condição de escoamento são conhecidas comumente como "Equações de Saint-Venant" (CHOW, 1973) e serão descritas a seguir.

### 2.1.2 Princípios da Continuidade de Massa e Conservação do Momentum ou Energia

WALKER e SKOGERBOE (1987) apresentaram o desenvolvimento das equações de Saint-Venant e uma revisão dos princípios básicos da hidráulica dos canais abertos pertinentes à irrigação superficial e as bases para as simplificações subsequentes. As derivações são baseadas na hipótese de que o canal é prismático e a inclinação do seu leito é relativamente pequena.

#### a) Equação da Continuidade

O princípio da continuidade ou conservação de massa é descrito pela EQUAÇÃO 3,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + I = 0 \quad (3)$$

onde:

Q = vazão;

A = área da seção transversal do fluxo;

I = taxa de infiltração por unidade de comprimento;

t = tempo; e

x = distância ao longo da direção do fluxo de entrada.

Na FIGURA 1 é apresentado um elemento de fluido infinitesimal do escoamento em um sulco no tempo t, onde Q, y, B e I representam a vazão, lâmina, largura do sulco e taxa de infiltração por unidade de comprimento,

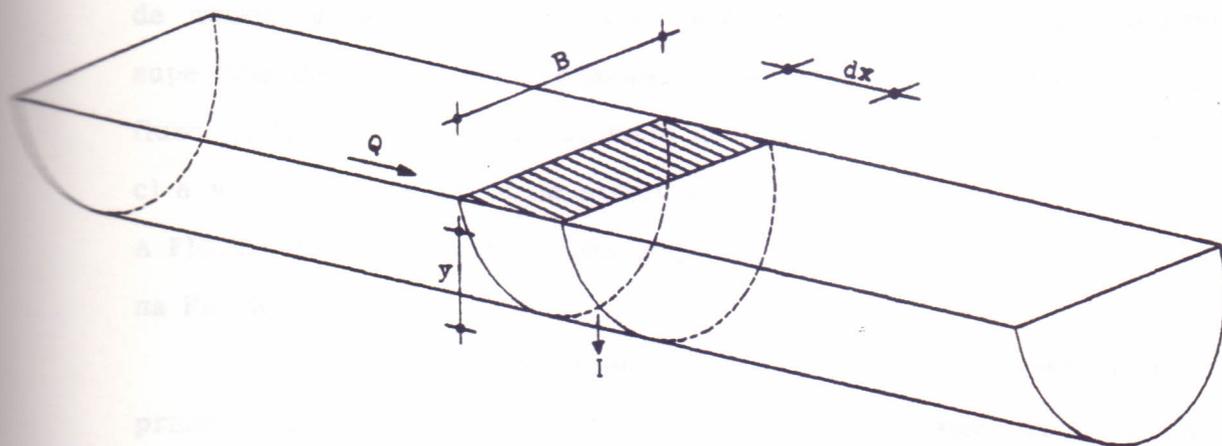


FIGURA 1 - Elemento de fluido dentro de um sulco com fluxo não permanente e variado segundo WALKER e SKOGERBOE (1987)

respectivamente, como condições de entrada neste tempo  $t$ .

#### b) Equação da Conservação do Momentum

O princípio da conservação da quantidade de movimento (*momentum*) em um determinado elemento de fluido (FIGURA 2) baseia-se na aplicação da Segunda Lei de Newton, a qual estabelece que "a resultante das forças que atuam sobre o elemento deve igualar-se ao produto de massa pela aceleração ( $F=m.a$ )", ou de outra forma, que o desbalanceamento de forças atuando no elemento de fluido deve ser compensado pela variação de tempo com a mudança de *momentum*. Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), três forças agem na superfície do elemento: a) componente da força peso, agindo na direção do fluxo; b) força de pressão, atuando no início e no final de cada elemento; e c) a viscosidade ou força de atrito, atuando ao longo do perímetro molhado. A FIGURA 2 apresenta uma vista ampliada do elemento de fluido apresentado na FIGURA 1.

WILKE (1968) desenvolveu a equação do *momentum* usando o princípio do *momentum* variado, que iguala a variação da quantidade de movimento de um elemento de fluido em movimento, passando em um ponto fixo, em comparação com a soma da variação da quantidade de movimento dentro do elemento e o fluxo da quantidade de movimento através dos limites do elemento. Desta forma, a equação da quantidade de movimento é expressa como:

$$\frac{\partial (m \cdot v)}{\partial t} + v \frac{\partial (m \cdot v)}{\partial x} = F_g + F_p - F_f \quad (4)$$

onde:

$m$  = massa

$v$  = velocidade

$mv$  = quantidade de movimento.

$\frac{\partial (m \cdot v)}{\partial t}$  = variação da quantidade de movimento dentro do elemento com o tempo

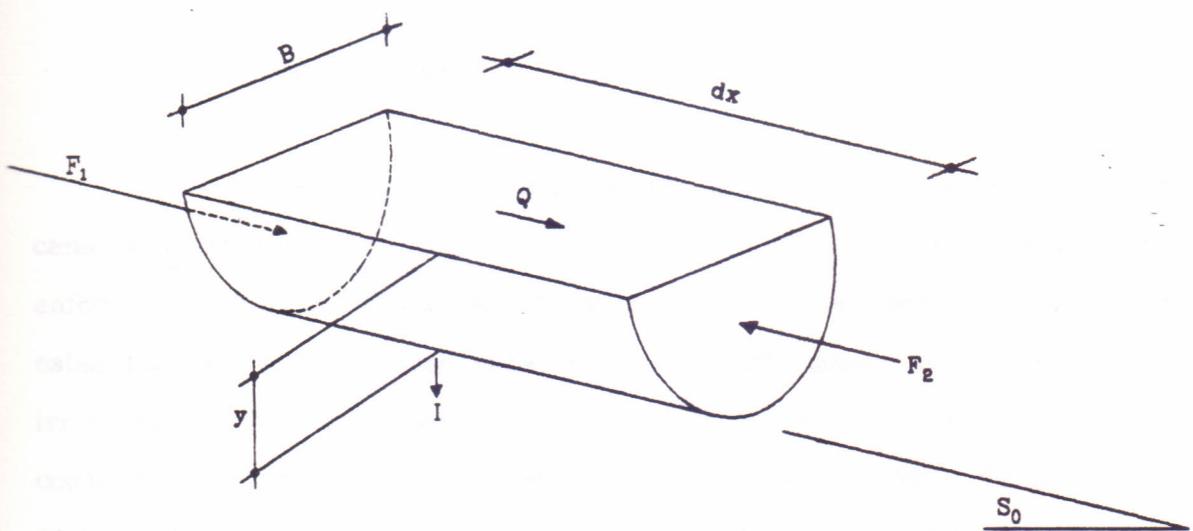


FIGURA 2 - Visão magnificada do elemento de fluido em um sulco, com fluxo não permanente e variado. Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987)

$\frac{v}{\partial x} \text{ (m.v)}$  = fluxo líquido da quantidade de movimentos através da faces anterior e posterior do elemento de fluido.

$F_g$  = componente da força peso =  $v.A.S_o.dx$ ;

$F_f$  = componente da força atrito =  $v.A.S_f.dx$ ;

$F_p$  = componente da força de pressão =  $v.A.\partial y/\partial x.dx$ ;

$r$  = peso específico;

$A$  = área média das seções de montante e jusante do elemento;

$S_o$  = declividade do fundo do elemento;

$d_x$  = comprimento do elemento;

$S_f$  = declividade média da linha de energia;

$y$  = lâmina d'água.

As derivações destas equações são baseadas na hipótese de que o canal é prismático e a declividade é relativamente pequena. Num primeiro enfoque, as equações são apresentadas na forma dimensional. Contudo, como estas relações são utilizadas para estudar a performance de um sistema de irrigação, o grande número de parâmetros torna difícil a avaliação do comportamento geral do modelo (WALKER e SKOGERBOE, 1987), STRELKOFF e CLEMMENS (1981) notaram que transformando as equações em formas adimensionais, havia redução no número de parâmetros independentes, tornando tratável o comportamento do modelo. Assim, as variáveis dimensionais na equação da continuidade e *momentum* podem ser adimensionalizadas pela divisão das mesmas por variáveis "características" que são representativas de algumas características básicas do sistema de irrigação.

## 2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE

SOUZA (1981) faz uma retrospectiva histórica do desenvolvimento da hidráulica da irrigação por superfície e dos modelos matemáticos desenvolvidos a partir das equações de Saint-Venant. Segundo SOUZA, estes modelos variam em complexidade, abrangendo desde modelos algébricos simples até modelos hidrodinâmicos completos.

### 2.2.1 Desenvolvimento da Hidráulica e dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície

A partir da revisão de literatura apresentada por SOUZA (1981), montou-se um esquema do desenvolvimento da hidráulica e modelos matemáticos da irrigação por superfície apresentado nas TABELA 1 (1848 - 1965) e TABELA 2 (1965 - 1979). Nestas TABELAS são listadas em ordem cronológica as descrições e características dos principais trabalhos na área, desde a publicação dos "Estudos Teóricos e Práticos sobre o Movimento das Águas Correntes" por SAINT-VENANT (1848) até a utilização do Modelo Inércia-Zero na avaliação do projeto pelo Método do Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (FANGMEIER-STRELKOFF, 1979).

KATAPODES e STREIKOFF (1977) estabeleceram os objetivos e perspectivas futuras da modelagem matemática em irrigação por superfície em quatro linhas básicas:

- a) Descrever os processos físicos em uma base teórica com o mínimo de parâmetros arbitrários ou experimentais;
- b) Avaliar numericamente o modelo matemático, até que se atinja precisão e estabilidade numérica;
- c) Incluir cada fase física da irrigação (ie, avanço, inundação, depleção e recessão);
- d) Alcançar estruturas computacionais simples e de execução rápida de dados a um custo mínimo.

### 2.2.2 Classificação dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície

A literatura apresenta diversas classificações dos modelos matemáticos. A seguir são apresentadas as classificações de STRELKOFF e CLEMMENS (1984) e TABUADA (1989), que sintetizam de uma forma didática o estado atual dos modelos matemáticos na irrigação por superfície.

TABELA 1 - Desenvolvimento da (1848 - 1965)

PERÍODO	AUTORES	CARACTERÍSTICAS
1848 1871	SAINT-VENANT	Princípio da Continuidade. $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial t} = 0$ <p>le <math>\partial A_z / \partial t = I</math></p> Princípio da Conservação de Momentum. $\frac{\partial (mg)}{\partial t} + \frac{v \partial (mg)}{\partial x} = F_t + F_p - F_f$
1913 1932	PARKER ISRAELSEN	
1938	LEWIS-MILNE	representação de soluções para duas formas particulares de função de infiltração propondo a primeira equação para taxa de avanço para o x na irrigação quando a taxa de infiltração é variável.
1953	PHILIP E McINTYRE	
1956	HALL	Lâmina normal. Perfil em forma de parábola, de grau variando entre 0,5 e 1,0
1968	HART et al.	
1960 1965 1965	OSTROMECKI FOX-BISHOP WILKE-SMERDON	
1960	DAVIS	Equação da Irrigação de Kostiakov: $Z = Kt_{INF}^a$ de: = volume infiltrado acumulado; a = constantes; = tempo de infiltração.
1965	WILKE-SMERDON	Proposição de uma série de equações de regressão linear, relacionando o avanço e o tempo para diferentes valores da constante "a" e a equação de Kostiakov. Chen (1966) demonstrou que a aproximação de Wilke-Smerdon para a solução de Philip-Farnell foi incorreta.

TABELA 2 - Desenvolvimento da K (1968 - 1979)

PERÍODO	AUTORES	CARACTERÍSTICAS
1968	WILKE	Perfil de fluxo obtido através deste método foi acurado devido a dificuldade em se determinar a lâmina de vazão e a velocidade em pontos próximos à frente de molhamento.
1968	HART et al	
1977	STRELKOFF	Número de hipóteses cresce substancialmente com a aplicação do modelo simplificado às outras condições da irrigação.
1972/73 1972 1974 1976	BASSETT KINCAID et al SARKAS-STRELKOFF BASSET-FITZSIMMONS	Aplicação dos Princípios de Conservação de Momentum e Massa levam a duas equações diferenciais parciais equações de Saint-Venant não podem ser resolvidos analiticamente. Métodos numéricos são aplicados para conseguir soluções aproximadas.
1972	BASSET	
1973	BASSET	Equação da infiltração de Kostiaikov; Coeficiente de rugosidade de Manning (n) ou de SAYRE ALBERTESON ( $\lambda$ ), que são
1976	BASSET-FITZIMMONS	convertidos para o "C" de Chezy para computações.
1972	KINCAID et al	Infiltração: função exponencial. Coeficiente de rugosidade "N" de Manning.
1974	SAKKAS E STRELKOFF	
1977	KATAPODES-STRELKOFF	
1977	STRELKOFF-KATAPODES	Velocidade da água sobre o solo na irrigação por faixas é geralmente pequena; Termo aceleração da equação da conservação do momentum.
1979	FANGMEIER-STRELKOFF	Modelo zero-inércia prediz com sucesso o fluxo da irrigação por faixas.

## A - CLASSIFICAÇÃO DE STRELKOFF e CLEMMENS (1984)

STRELKOFF e CLEMMENS (1984) apresentaram uma classificação dos modelos matemáticos da irrigação por superfície, como pode ser visto na TABELA 3.

TABELA 3 - Classificação dos modelos matemáticos da irrigação por superfície (segundo STRELKOFF e CLEMMENS, 1984)

a) Hidrodinâmico Completo (KATAPODES e STRELKOFF, 1977)	
Perfil Superficial	- Tamanho e forma computados assumindo o desbalanço de forças é igual a massa vezes a aceleração total convectiva + local) [ $\Sigma F = m.at$ ].
b) Quasi-Steady	
Perfil Superficial	- Tamanho e forma computados assumindo o desbalanço de forças é igual a massa vezes a aceleração convectiva, somente [ $\Sigma F = m.ac$ ].
c) Inércia-zero (STRELKOFF e CHEN, 1970)	
Perfil Superficial	- Tamanho e forma computados assumindo o equilíbrio das forças devido ao gradiente de lâmina, declividade de fundo $S_0$ e atrito [ $\Sigma F = 0$ ].
d) Onda Cinemática (CHEN, 1970)	
Perfil Superficial	- Tamanho e forma assumindo uma lâmina normal em qualquer seção ( $F_g = F_f = F_p$ ).
e) Lewis-Milne (LEWIS-MILNE, 1938)	
Perfil Superficial	- Forma arbitrária, tamanho fixado assumindo lâmina normal na seção de montante ( $F_g = F_f = F_p = 0$ ).
Perfil Subsuperficial	- Tamanho e forma computados baseados no avanço e na fórmula empírica da infiltração aplicada em qualquer seção.
f) Super Simples	
Perfil Superficial	- Forma arbitrária, tamanho fixado assumindo lâmina normal na seção de montante ( $F_g = F_f = F_p = 0$ ).
Perfil Subsuperficial	- Forma em base de avanço uniforme; tamanho fixado por fórmula de infiltração aplicada a seção de montante.

## B - CLASSIFICAÇÃO DE TABUADA (1989)

TABUADA (1989) classifica os modelos matemáticos da irrigação por superfície em função do tipo de equações que os integram e/ou os domínios

de aplicação para os quais foram inicialmente desenvolvidos. Assim, os modelos podem ser classificados como:

- a) Modelos Empíricos;
- b) Modelos Hidráulicos;
- c) Modelos Conceituais.

**Modelos Empíricos:** Os modelos empíricos procuram estabelecer o tempo de avanço e o processo da irrigação, levando-se em consideração que o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial (infiltração) são dois processos interdependentes. Diversos pesquisadores desenvolveram equações empíricas com base nos dados observados no campo para se determinar o tempo que a água leva para atingir a extremidade de jusante. Na TABELA 4 são apresentados as principais equações encontradas na literatura.

**Modelos Hidráulicos:** Baseiam-se na resolução por via numérica das equações de Saint-Venant, completas ou simplificadas, considerando-se também uma equação para quantificação da infiltração. Os modelos derivados das equações de Saint-Venant são classificados em função da simplificação introduzida a partir da equação dinâmica (equação da conservação do *momentum*) quando se desprezam alguns termos, e ao nível da equação da continuidade, no termo correspondente à infiltração. Assim têm-se quatro modelos hidráulicos:

- i) Modelo Hidrodinâmico Completo ou Determinístico;
- ii) Modelo Hidrodinâmico de Aproximação Simplificado;
- iii) Modelo de Inércia Nula (Inércia-zero);
- iv) Modelo da Onda Cinématica.

#### **Modelo Hidrodinâmico Completo**

Na modelagem hidrodinâmica as equações de Saint-Venant podem ser solucionadas por duas categorias de métodos matemáticos:

- a) Método das Características;
- b) Método do Volume de Controle Deformável (Integração Euleriana).

TABELA 4 - Equações do avanço da frente de onda, S(t), segundo TABUADA (1989)

REFERÊNCIA	EQUAÇÃO	PARÂMETROS
1964 - SHELL 1965 - FOX-BISHOP 1968 - hart ET AL 1973 - SING e CHAUHAN 1973 - WILKE	Equação Potência: $S(t) = a_3 t^{b_3}$	S(t) = Avanço da frente da onda, no intervalo de tempo t, expresso em metros; a <sub>3</sub> , b <sub>3</sub> = Coeficientes empíricos que dependem do tipo de solo e das condições em que se realiza a irrigação; parâmetros de ajustamento aos dados observados; t = tempo.
1987 - SHAFIQUE e SKOGERBOE	Equação Parabólica: $S(t) = a_4 t^2 + b_4 t$	S(t) = Avanço da frente da onda, no intervalo de tempo t, expresso em metros; a <sub>4</sub> , b <sub>4</sub> = parâmetros de ajustamento.
1967 - WILLARDIGON e BISHOP	Equação de WILLARDIGON e BISHOP $S(t) = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{t}{d} + 1 \right)$	S(t) = Avanço da frente da onda, no intervalo do tempo t, expresso em metros; c, d = Parâmetros empíricos de ajustamento; t = tempo.
1983 - SERVIÇO DE CONSERVAÇÃO DOS SOLOS (SCS) 1980 - HART et al.	Equação do Serviço de Conservação dos Solos (SCS): $S(t) = \frac{4,83 Q_0 \sqrt{S_0}}{t} \ln \left( \frac{0,00508 g^2}{S(t)} \cdot t \right)$	S(t) = Avanço da frente da onda, no intervalo de tempo t, expresso em metros; f, g <sup>2</sup> = Coeficientes empíricos dependentes da família de infiltração; Q <sub>0</sub> = Vazão (l/s); S <sub>0</sub> = Declividade (S <sub>0</sub> > 0,0005).

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), o método das características converte as equações da continuidade e do *momentum* em equações diferenciais, para as quais existem uma grande quantidade de informações. Como tanto uma como outra equação podem ser satisfeitas simultaneamente para cada coordenada, assume-se que a solução simultânea pode ser escrita como uma combinação linear das duas equações.

O enfoque da integração Euleriana é descrito como uma aproximação numérica das equações de Saint-Venant baseadas no conceito de volume de controle deformável, composto de células individuais deformáveis. A principal deformação pode ocorrer na entrada do sistema, quando as células movem-se para frente (sistema de Lagrange) ou pode ocorrer a jusante da fronteira, e as células são estacionárias (sistema Euleriano).

SOUZA (1981) desenvolveu um modelo hidrodinâmico da irrigação por sulcos baseado na solução das duas equações diferenciais parciais de Saint-Venant, usando o método da integração. Este modelo tornou possível o desenvolvimento de outros métodos devido a sua base matemática consistente e completa.

Segundo TABUADA (1989) o modelo hidrodinâmico considera o máximo de informação física da propagação da onda sobre o solo, quantificando a infiltração por uma das equações simplificadas, sendo a mais utilizada a equação empírica de Kostiakov ou a de Kostiakov-Lewis.

### **Modelo inércia-zero**

O modelo inércia-zero, aplicado no presente estudo, foi proposto por STRELKOFF e KATAPODES (1977), é uma solução simplificada do modelo hidrodinâmico, onde assume-se que os termos de inércia e aceleração na equação do momentum podem ser desprezados na maioria das situações em irrigação superficial. As duas equações do modelo zero-inércia são:

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

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (6)$$

Dado que na equação da continuidade aparece como variável a área (A) e nesta a altura da água (h), SALAZAR (1977) propôs uma relação entre a altura da água em cada seção e área molhada através de uma função empírica do tipo potência (EQUAÇÃO 7):

$$h = \alpha_2 A^{\alpha_3} \quad (7)$$

em que  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são parâmetros de ajustamento. A equação da conservação de *momentum* simplificada assume a forma parabólica. O método de solução das equações é similar a do modelo hidrodinâmico [TABUADA (1989)].

OWEIS e WALKER (1989) apresentaram uma forma linearizada do modelo zero inércia para irrigação superficial utilizando o sistema surge-flow.

### Modelo Onda Cinemática

O enfoque da onda cinemática é baseado na hipótese que existe uma única relação descrevendo a vazão como uma função da lâmina. Assim, o modelo de onda cinemática despreza, além dos termos de inércia, o terceiro termo da equação dinâmica, correspondente ao gradiente de pressão da água (TABUADA, 1989).

O modelo também é representado pela equação da continuidade e por uma das equações do fluxo uniforme, tais como a equação de Manning, Chezy e Darcy-Weisbach.

**Modelos Conceituais:** Os modelos conceituais são baseados no princípio da conservação da massa e integram coeficientes empíricos, e são

classificados basicamente como:

- i) Modelo de balanço volumétrico;
- ii) Modelo de balanço volumétrico do tipo Muskingum.

### Modelo Balanço de Volume

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) o enfoque do balanço de volume despreza toda a equação da conservação do *momentum* e substitui o comportamento dinâmico, o que pode ser chamado de uma hipótese grosseira no sentido matemático.

O modelo balanço de volume tem sido a base para a maioria dos procedimentos de projeto e avaliações de campo. O modelo permite uma definição rápida e confiável da taxa de infiltração no perfil subsuperficial, e é facilmente estendido para indicar parâmetros de uniformidade e eficiência.

No caso do balanço de volume, a equação da conservação da massa assume a fórmula:

$$Q_t = V_y(t) + V_z(t) \text{ para } t \leq T_L \quad (8)$$

onde:

$Q$  = Vazão que entra no sulco durante o tempo;

$t$  = tempo;

$T_L$  = tempo requerido para que a frente de avanço atinja o final do sulco (tempo de avanço);

$V_y(t)$  = volume de água na superfície do solo no tempo  $t$ ;

$V_z(t)$  = volume de água infiltrada no solo no tempo  $t$ .

O modelo balanço de volume assume que  $V_y$  é aproximado pelo produto da área média molhada ( $A$ ) pela distância ( $X$ ) da frente da onda à cabeceira da faixa ou sulco, segundo a EQUAÇÃO 9, descrita por JAMES (1988) como:

$$V_y(t) = \int_0^x A(x,t) dx = \bar{A}X = 0,77 (A_0) (X) \quad (9)$$

onde:

X = distância de avanço;

A(x,t) = área da seção transversal do fluxo;

x = distância da entrada do sulco;

t = tempo decorrido desde o início da irrigação;

$\bar{A}$  = área média da seção transversal do fluxo sobre a distância X.

A equação de Manning também é usada para estimar A para a vazão Q;

A<sub>0</sub> = área da seção transversal do fluxo na entrada do sulco.

O volume infiltração  $V_z(t)$ , é determinado pela integração do volume infiltrado por unidade de comprimento, expresso pela EQUAÇÃO 10

$$V_z(t) = \int_0^x Z(x, t - T_x) dx \quad (10)$$

onde:

Z(x, t - T<sub>x</sub>) = lâmina de infiltração à distância x da entrada, no tempo t;

T<sub>x</sub> = tempo requerido para que a água atinja a distância x.

Para se obter o volume na irrigação por sulcos, o lado direito da EQUAÇÃO 10 deve ser multiplicado pelo espaçamento entre sulcos. A FIGURA 3 ilustra os elementos básicos do modelo balanço de volume em um perfil esquemático.

LEVIEN e SOUZA (1987), apresentaram um modelo algébrico para computação do fluxo na irrigação por sulcos, que pode ser usado para analisar e prever a performance de sistema de irrigação por sulcos abertos, tendo sido testado através de dados de campo e um modelo hidrodinâmico completo.

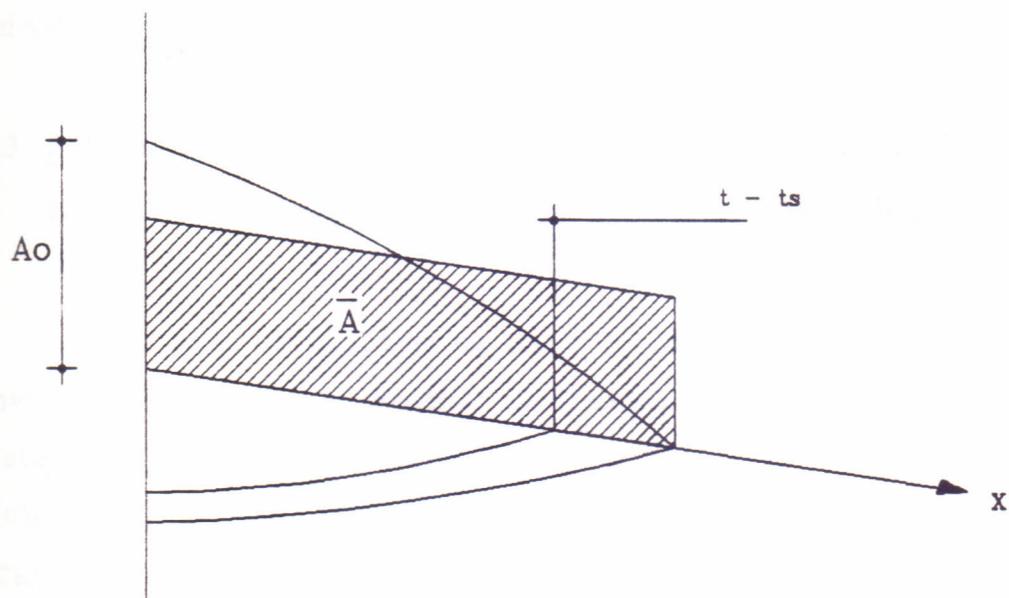


FIGURA 3 - Perfil esquemático com os elementos básicos do modelo balanço de volume, segundo TABUADA (1989)

### 2.2.3 Esquema Simplificado dos Modelos Matemáticos da Irrigação por Superfície (SOUZA, 1992)

Na TABELA 5 é apresentado um esquema simplificado dos modelos matemáticos da irrigação por superfície, onde são listados os princípios físicos, as equações, as hipóteses e as soluções matemáticas adotadas nos modelos hidrodinâmicos, inércia-zero, onda cinemática e balanço de volume.

## 2.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS NO DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE

A partir do trabalho de BASSET (1972) proliferaram as pesquisas envolvendo os modelos matemáticos da irrigação por superfície. Entre outros trabalhos citamos, nas TABELAS 1 e 2, BASSET (1973), BASSET e FITZIMMONS (1976), KINCAID et al (1972), SAKKAS e STRELKOFF (1977) e FANGMEIER e STRELKOFF (1979).

Segundo STRELKOFF e CLEMMENS (1984) o projeto em irrigação superficial pode ser feito a partir da modelagem matemática através da simulação dos resultados de qualquer combinação de parâmetros de projeto, levando a modificações nas características de campo (declividade e comprimento, por exemplo) e parâmetros de manejo (vazão e tempo de cut-off, por exemplo). Nenhum modelo, entretanto, por mais sofisticado e confiável que seja, pode determinar apropriadamente qualquer valor, dependendo fundamentalmente dos critérios e dados usados na simulação.

Os modelos matemáticos são usados alternativamente como uma forma mais barata, rápida e facilmente controlável aos modelos físicos, que monitoram o comportamento da água no campo através de testes demorados e caros.

HOLZAPFEL et al (1984) analisando a aplicação dos modelos matemáticos inércia zero, onda cinemática e balanço de volume nas fases de avanço e recessão da irrigação por faixas, verificaram os seguintes resultados:

- a) Todos os modelos simularam muito bem o avanço;

TABELA 5 - Esquema simplificado de COUZA (1992)

MODELO MATEMATICO	PRINCIPIO F	HIPOTESE	SOLUÇÃO MATEMATICA
1 - HIDRODINÂMICO	1.1 Conserv Massa 1.2 Conserv Energia		Equações diferen- ciais parciais hiperbólicas  Cálculo numérico  - Método das Características; - Método Euleriano
2 - INERCIA ZERO	2.1 Conserv Massa 2.2 Conserv Massa	2.2 Termos de aceleração são nulas	Equações diferenciais parabólicas  Solução por cálculo numérico com menor tempo de computação.
3 - ONDA CINEMÁTICA	3.1 Conserv Massa 3.2 Equaçã Fluxo U Manning <sup>2</sup> ou DAR <sup>4/3</sup> WEISBA	3.2 Hipótese que há uma relação única entre vazão e lâmina	Equações diferenciais parabólicas.  Solução por cálculo numérico com menor tempo de computação.
4 - BALANÇO DE VOLUME	4.1 Balanço sa	4.1 Hipótese que a seção transversal média de fluxo é constante e, portanto, independente de x e t	Equações Algébricas

- b) O modelo inércia-zero deu uma excelente estimativa do tempo de recessão;
- c) O modelo da onda cinemática simulou bem o avanço, mas foi ineficiente na simulação do tempo de recessão;
- d) O modelo balanço de volume estimou bem o tempo de recessão usando o método algébrico de STRELKOFF.

Segundo HOLZAPFEL et al (1984) o volume final de água infiltrada e sua distribuição longitudinal dependem do tempo de oportunidade: se o tempo de oportunidade é grande, os erros nas curvas de avanço e recessão terão pequeno efeito sobre a lâmina de infiltração computada, porque a taxa de infiltração é pequena em tempos longos.

No mesmo trabalho HOLZAPFEL et al (1984) acrescentaram que boas simulações (estimativas) da frente de avanço e tempo de recessão são importantes na determinação da qualidade da irrigação. A relação entre o tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ) e o tempo de avanço ( $T_I$ ), torna-se, assim, uma regra importante no projeto e manejo da irrigação por faixas.

A seguir são listados os principais trabalhos publicados após KATAPODES-STRELKOFF (1977), trabalho básico da modelagem matemática em irrigação, voltados para o dimensionamento da irrigação por superfície.

### 2.3.1 Modelo Inércia Zero

FANGMEIER e STRELKOFF (1979) usaram um modelo matemático de escoamento em irrigação por faixas assumindo a hipótese de inércia-zero para avaliar o critério de projeto do Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos (SCS-USA) para faixas em declive abertas ao final. Segundo estes autores, o modelo-inércia zero prevê com sucesso o escoamento em faixas, apresentando pequenas diferenças entre os dados de campo e os valores computados do tempo de recessão. Estas diferenças, entretanto, não são significativas, uma vez que as taxas de infiltração geralmente são baixas durante a recessão. A limitação do modelo está na ineficiência em medir

acuradamente ou descrever as condições de campo.

SCHIMITZ e SEUS (1989) apresentaram um modelo onde desenvolvem soluções analíticas para as equações do modelo inércia-zero, usando a hipótese de que durante a fase de avanço a velocidade de escoamento num certo ponto da frente de avanço (o centro de gravidade, por exemplo) pode ser relacionada somente ao perfil superficial da água (em movimento) e, portanto, a velocidade neste ponto é função apenas do tempo. Esta solução teve sua eficiência testada em três tipos de aplicação: (1) na simulação dos estágios iniciais do avanço e portanto, fornecendo uma série de dados para inicialização de computação numérica com o modelo hidrodinâmico completo; (2) utilização como um módulo no modelo hidrodinâmico completo descrevendo o escoamento na extremidade da frente de avanço, dispensando o uso de técnicas de balanço de volume e hipóteses de perfil superficial aplicadas quase que exclusivamente no modelo hidrodinâmico completo e (3) na esimulação da fase de avanço em faixas em nível e em pequenos declives.

SCHMITZ e SEUS (1990) desenvolveram um modelo matemático baseado na modelagem inércia-zero para avanço em faixas. Baseados nos resultados apresentados neste trabalho, SCHMITZ e SEUS (1992) lançaram o ZIFA - Inércia-zero Model por Irrigation Advance in Furrows (Modelo Inércia-zero para Avanço em Irrigação por Sulcos). O ZIFA é um modelo analítico preciso e econômico, tanto no tempo de processamento dos dados como no espaço requerido de memória, projetado para sulcos em nível e em declive, trabalhando com três diferentes abordagens para descrever os vários tipos de geometria dos sulcos. O modelo não faz qualquer restrição ao modelo de infiltração usado. Comparado com resultados de campo, o ZIFA mostrou-se bem ajustado, simulando muito bem com os dados de experimentos de campo, e favorável quando comparado com o modelo hidrodinâmico completo. Finalmente, o ZIFA foi usado para vencer dois problemas substanciais na modelagem matemática da irrigação por sulcos: (1) os valores iniciais necessários para inicializar as simulações numéricas com o objetivo de evitar as aproximações grosseiras inerentes à solução popular de WITHAM (WITHAM, 1955) e (2) as

técnicas trabalhosas de balanço de massa que, aliadas às hipóteses do perfil superficial da água, são usadas para descrever o escoamento na extremidade da frente de avanço.

OWEIS e WALKER (1990) desenvolveram um modelo linearizado aplicado à irrigação por sulcos através do método "SURGE FLOW", baseado no conceito de inércia-zero, desenvolvido originalmente por STRELKOFF e KATAPODES (1977) para irrigação por faixas e depois modificado para irrigação por sulcos contínuos (ELLIOTT et al, 1982). O modelo apresentou boa simulação da irrigação contínua e em "SURGE FLOW" quando comparados com dados de campo.

### **2.3.2 Modelo Onda Cinemática**

RAYEJ e WALLENDER (1988) desenvolveram um modelo em onda-cinemática, com solução em função do tempo e com infiltração variando espacialmente, para a irrigação por sulcos. A infiltração é medida em diversos locais ao longo do sulco e pode ser facilmente calculada em função do tempo de depleção (ponding time) e do perímetro molhado.

WALLENDER e YKOKURA (1991) desenvolveram um modelo com abordagem de onda-cinemática para sulcos no qual a variação de tempo pode ser ajustada para se diminuir os dados computacionais em locais específicos ao longo do sulco.

### **2.3.3 Modelos Conceituais (Balanço de Volume)**

A seguir são apresentados seis trabalhos dedicados à abordagem do balanço de volume: FANGMEIER e RAMSEY (1978), RAYEJ e WALLENDER (1987), YU e SINGH (1989), SINGH e HE (1988), SINGH e SCARLATOS (1988) e WILSON e ELLIOTT (1988), sendo que estes três últimos adotam o modelo de MUSKINGUM.

O objetivo do trabalho de FANGMEIER e RAMSEY (1978) era o de

determinar a influência da geometria do sulco nas funções de infiltração e características de entrada na irrigação por sulcos através do balanço de volume d'água. Sete irrigações foram conduzidas em sulcos de precisão em campo. A equação de Philip apresentou desempenho um pouco melhor do que a equação de Kostiakov, embora as constantes da equação de Philip sejam mais difíceis de se obter. A taxa de entrada foi relacionada linearmente com o perímetro molhado.

RAYEJ e WALLENDER (1987) desenvolveram um modelo de balanço de volume completo para todas as fases da irrigação por sulcos, usando intervalos de espaço específicos, e testaram-no com dados de avanço medidos em campo e com simulações feitas pelo método da onda cinemática. A precisão do modelo foi comparada com o modelo de balanço de volume de WALLENDER (1986) sob as condições de solo espacialmente homogêneo e heterogêneo.

#### **2.3.4 Modelos Hidrodinâmicos**

SOUZA (1981) apresentou um modelo hidrodinâmico completo que tornou possível o desenvolvimento de outros métodos devido a sua base matemática consistente e completa. A análise é baseada na solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. SOUZA demonstrou nesse trabalho que as condições de inércia zero (aceleração da água desprezível) podem ocorrer na irrigação por sulcos. A abordagem matemática foi feita através da análise dimensional, para reduzir o número de parâmetros que governam as equações. O desempenho do modelo foi avaliado pela comparação de dados de campo e os resultados mostraram que o modelo simula satisfatoriamente a irrigação por sulcos.

BAUTISTA e WALLENDER (1992) apresentaram um modelo hidrodinâmico completo desenvolvido para encontrar o tempo de avanço em função da distância. Segundo estes autores, tem havido um interesse recente em simular a irrigação com as propriedades de infiltração variando com o espaço, motivado pelo desenvolvimento de algoritmos nos quais, alternativamente, o tempo de avanço é a variável a ser determinada para

valores específicos da distância de avanço. Essa abordagem foi utilizada por WALLENDER (1986), RAYEJ e WALLENDER (1988) e SCHAWANKL e WALLENDER (1988) para as abordagens balanço de volume, inércia zero e híbrido de inércia-zero e balanço de volume.

O primeiro modelo hidrodinâmico para o avanço da irrigação por sulcos com incrementos de espaço específicos foi apresentado por WALLENDER e RAYEJ (1990).

### 2.3.5 Modelos Algébricos Completos

STRELKOFF (1977) apresentou um modelo algébrico completo para o escoamento em faixas, onde as curvas de avanço e recessão foram obtidas para um evento de irrigação por superfície definidos pelas características das faixas - comprimento, largura, declividade, rugosidade de Manning e parâmetros de infiltração - e pelos parâmetros de operação - vazão de entrada e tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ). Deste modo, todos os dados necessários para se computar a distribuição da vazão e a eficiência da aplicação de água para um evento particular de irrigação foram obtidos. A principal ferramenta de análise foi a conservação de massa. O volume infiltrado no solo é relacionado ao tempo de infiltração através de uma dada fórmula de infiltração. O volume superficial é aproximado assumindo uma forma simples para o perfil superficial em qualquer tempo e considerando a lâmina normal em função do espaço e da vazão. As soluções foram comparadas com resultados de modelos complexos, de laboratório e experimentos de campo, dando bons resultados.

LEVIEN e SOUZA (1987) apresentaram um modelo algébrico completo simulando a irrigação por sulcos abertos ao final em todas as suas fases, prevendo as curvas de avanço e recessão, a distribuição após a irrigação e a eficiência de aplicação de água.

### 2.3.6 Modelo Não-Linear de Otimização

HOLZAPFEL e MARIÑO (1987) apresentaram modelos não-lineares de

otimização desenvolvidos para projetar e manejar os métodos de irrigação por faixas e sulcos. Segundo os autores, a função objetiva do modelo não-linear é construída tendo como base uma relação de lucro, enquanto aquelas dos modelos não-lineares expandidos é construída em termos de relação benefício-custo. Os modelos não-lineares consideram todos os parâmetros envolvidos no procedimento de projeto.

### **2.3.7 Modelos de Produção em Irrigação por Superfície**

Os modelos de produção surgiram como consequência natural do desenvolvimento dos modelos matemáticos da irrigação por superfície. Os modelos de produção são softwares desenvolvidos usando uma linguagem de programação específica (FORTRAN, por exemplo) e são acessados e rodados através de dados intrínsecos à metodologia utilizada no projeto. A principal função dos modelos de produção é a análise e a síntese dos projetos desenvolvidos a partir de um modelo matemático.

Assim como no desenvolvimento dos modelos matemáticos da irrigação por superfície, o primeiro modelo de produção, o BRDRFLW, foi desenvolvido para irrigação por faixas por STRELKOFF (1985) sobre a abordagem inércia-zero.

BOONSTRA e JURRIENS (1988) apresentaram um programa, o BASCAD, também sobre a abordagem inércia zero para bacias em nível. Uma versão ampliada do BRDRFLW, o SRFR, foi apresentado por STRELKOFF (1990) para irrigação por faixas, sulcos e bacias. Este programa é o objeto de estudo deste trabalho.

## **2.4 DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO RELAÇÕES EMPÍRICAS**

Segundo WALKER e SKORGEBOE (1987) o principal objetivo da irrigação é o reabastecimento da zona de raízes numa frequência tal para que

se evite o estresse de cultura, mas uniforme e eficiente o bastante para que ocorra a conservação de energia, água, nutrientes e trabalho. A irrigação afeta significativamente o meio em que a cultura está implantada e, além do mais, irriga-se por outras razões que não seja só a de satisfazer as necessidades da cultura, podendo a irrigação ser feita para se combater os efeitos atmosféricos adversos, como o frio e o calor excessivos, ou visando a lixiviação de sais na zona de raízes, melhora do solo antes do plantio, além da aplicação de fertilizantes e pesticidas.

O projeto implica em algumas considerações prévias sobre o sistema esperado. A uniformidade e a eficiência, por exemplo, podem ser previstas por meio de parâmetros como vazão, tempo de aplicação, características de infiltração, declividade e comprimento do campo e lâmina requerida para reabastecer a zona de raízes. Também é considerada a avaliação dos processos de avanço e recessão.

Os sistemas de irrigação por superfície podem ser dimensionados utilizando-se as seguintes metodologias:

- a) através de ensaios de campo;
- b) tabelas de dimensionamento;
- c) método semi-racional;
- d) modelos matemáticos.

CUENCA (1989) indica duas correntes no projeto da irrigação superficial: uma que projeta a partir de parâmetros empíricos testados em campo e outra que utiliza análises hidrodinâmicas sofisticadas.

WALKER e SKORGEBOE (1987) propuseram uma metodologia racional baseada no método do balanço de volume, apresentando vantagens sobre os atuais conceitos teóricos dos modelos hidrodinâmicos e inércia-zero, por que prova a visão dos procedimentos de projetos sem as complicações dessas abordagens.

BOOHER (1974) recomenda que a seleção do comprimento dos sulcos deve ser feita com cuidado. Os custos e as necessidades da mão-de-obra para irrigação crescem na proporção em que os sulcos diminuem, enquanto a

uniformidade da distribuição de água decresce na proporção em que tornam-se mais longos. Os fatores que devem ser levados em consideração, primeiramente, na determinação do comprimento máximo dos sulcos devem ser: o tipo de solo, a declividade do sulco e a cultura a ser implantada. A TABELA 6 relaciona a declividade do sulco, a lâmina média de água aplicada, o tipo de solos e o comprimento dos sulcos.

TABELA 6 - Comprimentos máximos sugeridos para sulcos para diferentes solos, declividades e lâminas de água a serem aplicadas (comprimentos em metros, lâminas em centímetros)

DECLIVIDADE DO SULCO	LÂMINA MÉDIA DE ÁGUA APLICADA (cm)											
	7,5	15	22,5	30	5	10	15	20	5	7,5	10	12,5
	Argilosos				Médios				Arenosos			
%	Metros											
0,05	300	400	400	400	120	270	400	400	60	90	150	190
0,1	340	440	470	500	180	340	440	470	90	120	190	220
0,2	370	470	530	620	220	370	470	530	120	190	250	300
0,3	400	500	620	800	280	400	500	600	150	220	280	400
0,5	400	500	560	750	280	370	470	530	120	190	250	300
1,0	280	400	500	600	250	300	370	470	90	150	220	250
1,5	250	340	430	500	220	280	340	400	80	120	190	220
2,0	220	270	340	400	180	250	300	340	60	90	150	190

Fonte: L. J. Booher, Surface Irrigation (1974). Organização de Alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO/ONU). Roma. Itália. 160pp.

Com declividades pequenas (entre 0,3 e 0,5 por cento) o comprimento do sulco pode ser aumentado, enquanto que para declividades maiores do que meio por cento o comprimento deverá ser diminuído na proporção em que a declividade aumenta, porque o escoamento unitário deve ser reduzido para prevenir a erosão.

Os sulcos devem ser mais curtos para solos arenosos, que absorvem água rapidamente e têm baixa capacidade de retenção de água. Os comprimentos podem ser aumentados na proporção em que as lâminas médias da água a serem aplicadas aumentam. Uma vez que a lâmina de irrigação necessária é relacionada à capacidade de retenção d'água do solo e aprofundidade da zona

de raízes da cultura, os sulcos podem ser mais longos para culturas de zona de raízes profundas em solos argilosos do que para culturas de zona de raízes rasas nos solos arenosos.

Segundo BOOHER (1974) experimentos de campo testando várias taxas de escoamento d'água em sulcos de diferentes comprimentos, como sugerido por CRIDDELE et al (1956), devem ser feitas em cada área para determinar os comprimentos mais apropriados para diferentes condições de declividade e solo. Avaliações da taxa de avanço da água no sulco e as lâminas médias de água aplicadas poderão fornecer informações que poderão ser usadas para determinar quais comprimentos darão a irrigação mais adequada e uniforme.

Os manuais técnicos que tratam de irrigação e drenagem publicados no Brasil trazem capítulos dedicados ao dimensionamento da irrigação por sulcos apresentando uma marcha de dimensionamento híbrida, mesclando procedimentos empíricos e derivados da modelagens matemáticas. Assim o fazem BERNARDO (1982), OLITA (1983) e DAKER (1960), que apresentam uma grande variedades de tabelas práticas e fórmulas expressas em ábacos. Na literatura internacional especializada encontramos além destes procedimentos a publicação de programas de computador para dimensionamento através da metodologia do SCS (CUENCA, 1989) e cálculo da uniformidade, eficiência e perdas para a irrigação superficial (JAMES, 1988).

O trabalho básico e frequentemente citado nos manuais e trabalhos científico é o manual "Methods por Evaluating-Irrigation Systems", desenvolvido por CRIDDLE et al. (1956) para o Serviço de Conservação dos Solos (SCS) dos Estados Unidos. Neste trabalho, CRIDDLE e outros. listam os fatores mais importantes na análise dos resultados da irrigação superficial por sulcos:

- a) a quantidade de água necessária para reabastecer o reservatório de umidade do solo;
- b) as taxas de infiltração;
- c) o tempo requerido para se atingir a capacidade de campo;
- d) espaçamento máximo de sulcos;
- e) o tempo máximo admissível para a água percorrer o sulco;
- f) a vazão máxima permitida; e

g) o comprimento máximo permitido.

Na determinação do tempo máximo admissível para a água percorrer o sulco, CRIDDLE et al (1956) enunciaram a "regra do 1/4": "Para alcançar-se a irrigação mais uniforme de um campo, a frente de avanço deve atingir o final do sulco em 1/4 do tempo total necessário para reabastecer a zona de raízes" (CRIDDLE et al, 1956). As perdas por percolação para todo o comprimento do sulco, segundo estes autores, devem ser da ordem de 5%.

Outro parâmetro importante é a vazão máxima permitida no início da irrigação, determinada pela necessidade de se prevenir o excesso de run-off e a erosão do solo. Segundo BOOHER (1974), em algumas áreas é usado o conceito da máxima vazão não erosiva baseada na declividade do sulco. Embora a erodibilidade do solo também seja um fator importante, a vazão máxima não erosiva em sulcos pode ser estimada através da EQUAÇÃO 11.

$$Q_m = \frac{C}{S} \quad (11)$$

onde S é a declividade expressa como uma percentagem e C é uma constante que assume o valor 0,60 quando  $Q_m$  é expressa em l/s ou 10 quando  $Q_m$  é expressa em galões por minuto.

## 2.5 UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA NA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE

Os parâmetros de uniformidade e eficiência de irrigação são determinantes no sucesso da implantação e manejo de um projeto de irrigação por superfície. Não há, entretanto, um consenso em torno da nomenclatura e definição destes parâmetros. A seguir é descrito o Perfil de Distribuição da Água na Irrigação Superficial, apresentado por KARMELI (1978). Os parâmetros de uniformidade e eficiência adotados pelo programa SRFR, objeto de estudo deste trabalho, são apresentados no capítulo três, a seguir.

### 2.5.1 Distribuição da Água na Irrigação Superficial

KARMELI (1978) apresentou um perfil de distribuição da água ao longo da parcela onde são determinados os termos básicos na definição dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação. Este perfil é representado na FIGURA 4. Os termos apresentados neste perfil são:

- a) Volume d'água armazenado na zona de raízes (volume útil,  $V_U$ ) definido pelo polígono de vértices A, B, D, G, K e A. Este volume é parte da água aplicada que fica disponível para uso pela cultura;
- b) Volume do déficit de água ( $V_d$ ), definido pelo polígono de vértices G, D, E e G, que é a quantidade de água capaz de completar a disponibilidade real de água do solo após uma irrigação;
- c) Volume de água perdido por percolação profunda ( $V_{PP}$ ), definido pelo polígono K, G, H, I e K;
- d) Volume de água perdido por escoamento superficial ou "run-off" ( $V_{ro}$ ), definido pelo polígono B, C, D e B;
- e) Volume real de água necessário para abastecer a zona de raízes ( $V_{rv}$ ), definido pelo polígono A, B, E, K e A;
- g) Volume total de água infiltrada ( $V_{INF}$ ), definido pelo polígono A, B, D, G, J e A;
- h) Distribuição real da água infiltrada ( $D_{av}$ ), definida pela linha IHGD.

Além deste termos, na figura estão representadas as lâminas de água média infiltrada (ZMIN) - linha JHI, lâmina d'água infiltrada em qualquer ponto na parcela (ZMIN) e lâmina máxima infiltrada ao longo da parcela ( $Z_i$ ), lâmina d'água mínima infiltrada ao longo da parcela (ZMIN) e lâmina máxima infiltrada ao longo da parcela ( $Z_{máx}$ ).

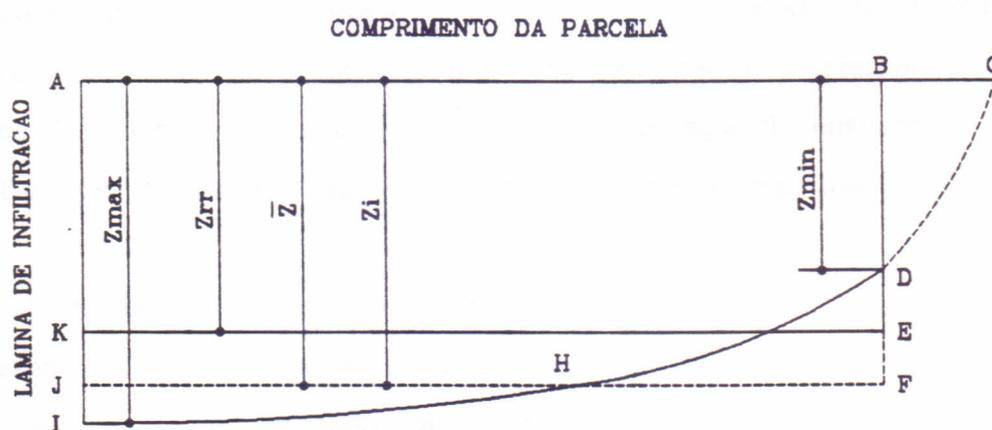


FIGURA 4 - Perfil de distribuição da água da irrigação superficial (KARMELI, 1978)

### **3.0 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada no presente trabalho, constituiu-se na aplicação do modelo inércia-zero para a simulação e a análise da irrigação por superfície, desenvolvido por STRELKOFF (1990) para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA). Este trabalho de STRELKOFF deu como resultado o programa SRFR, versão 20, escrito em linguagem FORTRAN. O programa, nesta versão, não é interativo, sendo a entrada de dados complicada. Para facilitar a operação de entrada de dados e análise dos resultados foram elaboradas uma série de planilhas no programa QPRO.

Neste capítulo são apresentadas uma síntese do programa SRFR, as hipóteses de trabalho, a entrada de dados, a saída dos resultados do programa, os dados utilizados para testar as hipóteses estudadas e as simulações.

#### **3.1 RESUMO DO PROGRAMA SRFR - MODELO INÉRCIA-ZERO, PARA A SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

O programa SRFR (Surface Furrow) é uma sequência do programa BRDRFLW (Border Flow) publicado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em 1985 (STRELKOFF, 1985). O programa é basicamente um modelo de análise e ao contrário de outros que destinam-se à síntese ou projeto, ele não dá ao usuário valores apropriados de projetos como o comprimento do sulco, vazão ou tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ). O programa é, na verdade, uma ferramenta de predição: o usuário atribui valores aos parâmetros que influenciam o resultado de uma irrigação, tais como a geometria dos

sulcos, a rugosidade, infiltração, vazão e tempo de irrigação, e o programa fornece o perfil de distribuição final da água e o volume de escoamento superficial. Os parâmetros de projeto podem ser alcançados através de aplicações sistemáticas e repetidas do modelo. Neste trabalho, isto é proposto da seguinte forma: o programa é utilizado como analisador de parâmetros pré-definidos e, a partir dos resultados obtidos, são simuladas novas opções de dimensionamento.

O manual do usuário do programa SRFR é bastante sintético, ao contrário do BRDRFLW, que apresenta todas as formulações e conceituações dos modelos matemáticos e hidráulicos utilizados na estruturação do programa. O manual do SRFR é dividido em três capítulos. No primeiro (Introdução) o programa é apresentado e são relacionadas as principais diferenças entre o SRFR e BRDRFLW; no segundo (Dados de Entrada) são descritas as vinte e três linhas de entrada do programa e no terceiro (Aspectos Práticos da Técnica de Newton Raphson e Limitações do Programa) são apresentados a forma como o processo iterativo de Newton-Raphson foi usado na formulação do modelo e quais as limitações do programa. Ao final, é apresentado um exemplo de aplicação.

Para contornar a dificuldade de escolha das opções de processamento do programa, a TABELA 7 foi desenvolvida neste trabalho para se ter de uma forma prática e objetiva todas as opções possíveis de operação do programa. A tabela é dividida em quatro colunas: a primeira enumera a linha do programa, a segunda os dados escolhidos pelo usuário, a terceira descreve a função da linha e a quarta lista as opções de operação para a linha em questão. Note-se, por exemplo, como se dá a escolha do modelo matemático a ser utilizado pelo programa. Esta opção encontra-se na LINHA 13, e os dados referem-se à opção default do programa, ou seja, foi adotada a modelagem inércia-zero determinada pela opção 0 (zero). Esta opção escolhida pode tomar dois caminhos, dentro da seguinte estrutura de decisão: 1) Se, na LINHA 1, a opção escolhida para o tipo de corrida do programa (TSTM0D) tiver sido TSTM0D=1 (simulação corrente com novos dados) e a declividade ( $S_0$ ) for menor ou igual a 0,004, então as equações hidráulicas serão processados pela

modelagem inércia-zero e 2) Se, para a mesma opção da LINHA 1, a declividade ( $S_0$ ) for maior que 0,004, então as equações hidráulicas serão processadas pela modelagem onda cinemática. Se o usuário preferir trabalhar com o modelo hidrodinâmico completo para as equações de Saint-Venant, a opção escolhida deverá ser a de número 1 (SOLMOD=1). As demais funções da linha referem-se a linearidade da solução a cada passo (LINMOD), definição de parâmetros característicos (DMLMOD) e a identificação do volume infiltrado ( $A_2$ ) por unidade de comprimento do sulco relacionado com a lâmina de água no sulco (MAZ).

Como o objetivo deste trabalho é estritamente a utilização do programa na análise de eventos de irrigação, e não a análise do programa em si, remetemos ao manual do programa os procedimentos para outras escolhas e simulações.

É importante ressaltar, no entanto as seguintes características do programa:

- i) as análises podem ser feitas em unidades do sistema métrico decimal, unidades inglesas ou unidades adimensionais (LINHA 3);
- ii) considera a equação de infiltração de KOSTIAKOV e vários tipos de rugosidade (LINHA 4);
- iii) considera as hipóteses de a) sulcos ou bacias abertas no final e sulcos ou bacias fechadas; b) corte da vazão na cabeceira ou condição normal; e c) seção transversal do canal definida para faixa unitária de comprimento, trapézio simétrico, trapézio assimétrico, seção transversal dada por equação potencial e função quadrática (LINHA 7);
- iv) soluções das equações hidráulicas pelos modelos inércia-zero, onda cinemática e hidrodinâmico completo (LINHA 13).

### 3.1.1 Entrada de Dados

A entrada de dados no SRFR pode ser feita a partir do sub-

TABELA 7 - Formulário para entrada de dados destinados ao programa SRFR (STRELKOFF, 1990). Exemplo de entrada de dados para simulação da vazão inicial constante e razão de avanço (TL/Tinf) igual a 1/13 para dados de RAMSEY (1976).

COLUNA UM Linha do programa SRFR	COLUNA DOIS Dados para RAMSEY (1976)	COLUNA TRÊS Descrição dos dados	COLUNA QUATRO Opções oferecidas pelo programa SRFR
Arquivo 0	RAMSEY1.DAT 8, 0, 7, 9	Nome do arquivo Dados dos equipamentos e entrada e saída dados U1 - Entrada de Dados U2 - Terminal U3 - Saída Padrao U4 - Saída Auxiliar	5: padrão; 8:SRFR.DAT 0: padrão; 1: opcional 6: padrão; 7: SRFR.OUT 6: "Line Printer"( LPT1); 9: SRFR.OUT
1	1	Tipo de corrida do programa	TSTMOD 1: simulação corrente com novos dados; 2: propriedades hidráulicas iguais à simulação anterior; 3: propriedades e geometria de campo iguais à simulação anterior. 4: todos os parâmetros físicos iguais à simulação anterior; e 5: parâmetros físicos e técnicas de solução iguais à simulação anterior (parâmetros numéricos podem ser modificados nas linhas 18 a 22). 6: todos os parâmetros são dados novos, exceto diagnósticos e "flags" de plotagem (linhas 18 a 22). 0: interrompe o programa. Normalmente é a última entrada.
2	TL/Tinf = 1/13	Identificação da simulação	Descrição da simulação. Opção livre.
3	1	Controle de dimensões	INPMOD: Ver Tabela 2.1 do Programa SRFR 1: Sistema métrico; 2: unidades inglesas; e 3: parâmetros adimensionais.
4	1,2,1	Propriedades hidráulicas do solo e da cultura	INFMOD - Parâmetros de infiltração → 1: $Z = K \cdot T^a + B \cdot T + C$ ; 2: variação de Z com o tempo, dada por tabela de valores pares; RUFMOD: Parâmetros de rugosidade 1: rugosidade independente da vazão; → 2: rugosidade descrita pela fórmula de Manning; e 3: rugosidade descrita pela fórmula de Sayre-Albertson. FPCLG: avisa o programa para a natureza das variações do tempo e da distância na rugosidade, infiltração e

TABELA 7 - continuação

			rugosidade do sulco (ver TABELA 2.2 do programa SRFR). → Valores 1, 2, 3 e 4
5A 5B 5C	100	Comprimento do sulco	5A: comprimento do campo (L) 5B: número de segmentos (NFSEG) para FPCFLG (linha 4) = 2 5C - no. de segmentos(NFSEG) para FPCFLG (linha 4) >2
6AB	6AB: INFMOD=1 e RUFMOD=2	Propriedades do solo e da cultura	6AA - K, A, B, C - (C assume valor de C da fórmula de Chézy) 6AB - K, A, B, C - (C assume o valor de n da fórmula de Manning) 6AC - K, A, B, C - (C assume o valor de $\lambda$ da fórmula de Sayre-Albertson). 6BA - Zinf - C da fórmula de Chézy 6BB - Zinf - n da fórmula de Manning 6BC - Zinf - $\lambda$ da fórmula de Sayre-Albertson
7	1, 2, 1, 5	Geometria do campo	DBC - condições de fronteira de jusante → 1: sulco ou bacia abertos no final 2: sulco ou bacia fechados (bloqueados) UBC - condições de fronteira de montante 1: corte da vazão na cabeceira → 2: condição normal SOMOD - configuração do fundo do sulco (Linha 8) → 1: fundo descrito pela declividade 2: fundo descrito pela elevação 3: fundo irregular, propriedades da linha 6 em diante são constantes. MXSG - seção transversal do canal 1: faixa unitária de comprimento 2: trapézio simétrico 3: trapézio assimétrico 4: seção transversal dada por equação exponencial; e → 5: seção transversal dada por equação do segundo grau.
8A	0.001032	Perfil do fundo do sulco	L8A - Valores de declividade L8B1 - Valores de distância L8B2 - Valores da elevação do fundo do sulco L8C - Valores da elevação do fundo do sulco
9	100.00	Espacamento entre sulcos e seção transversal	L9A - Espacamento entre sulcos
9D	13.49, 0.4539	Valores das constantes C e M.	L9B - Seção transversal para sulcos trapezoidais simétricos L9D - Seção transversal para canais parabólicos
10	13.62, 1	Parametros de manejo (I - dados preliminares)	Fornece dados dos requerimentos de irrigação  ZREQ - Lamina requerida de irrigação MODQ - tipo de dados de hidrógrafa de vazão a utilizar

TABELA 7 - continuação

			<p>1: Vazao consiste de uma ou mais ondas iguais</p> <p>2: Hidrografa de vazao apresentada na forma de uma tabela de valores pares.</p> <p>Na mesma linha, se INPMOD = 3, F0 = No. de Froude.</p> <p>Este valor soh tem sentido se SOLMOD=1. Se SOLMOD&gt;1, a entrada F0 pode ser tomada como 0. Com TSTMOT=2 ou 3, a entrada -2 preserva o valor armazenado.</p>
11B	1.33, 208.0, 0, 0, 1	Parâmetros de manejo I	<p>O conteúdo desta linha depende dos valores de MODQ fornecidos na Linha 10. Se:</p> <p>MODQ= 1, então o programa chama a Linha 11A, com as seguintes entradas:</p> <p>Q1 - vazão constante durante a irrigação</p> <p>TCYCLE - tempo de irrigação (TCO) ou periodo dos pulsos</p> <p>ROT - razão para qual ocorre o corte na irrigação</p> <p>RQ2Q1 - fator de redução da vazão</p> <p>NCYCLE - número de pulsos da irrigação</p> <p>MODQ = 2: hidrógrafa mais geral requerida para L11B - hidrógrafa para vazão tabulada</p> <p>NQ1 - número de pares de valores esperados na tabela de tempo e vazão constituindo a hidrógrafa de vazão.</p>
12	Default	Parâmetros de manejo II	<p>Depende do valor de MODQ fornecido linha 10. Se:</p> <p>MODQ=1 - entrada padrão para a modelagem SURGE FLOW. Para outros valores de MODQ ver Manual do Programa SRFR.</p>
13	Default	Escolha do tipo de solução da equações hidráulicas da irrigação por superfície.	<p>SOLMOD - determina a forma de solução fundamental das equações hidrodinâmicas da irrigação por superfície.</p> <p>Se:</p> <p>SOLMOD = 0 - permite o valor default e considera a opção SOLMOD = 2, com TSTMOT = 1 para <math>So \leq 0.004</math>, ou considera a opção SOLMOD = 3, para <math>So \geq 0.004</math>, sendo que:</p> <p>=1 - solução pelo modelo hidrodinâmica completo para as equações. da continuidade e momento de Saint-Venant;</p> <p>=2 - solução pelo modelo inércia zero;</p> <p>=3 - solução pelo modelo onda cinemática com lâmina normal.</p> <p>LINMOD - controla a linearidade da solução a cada passo</p> <p>DMLMOD - define os parâmetros característicos</p> <p>MAZ - identifica a simulação, definindo como o volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco (Az) é relacionado com a lâmina de água no sulco.</p>
14	Default	Campo dimensional de hipóteses/parâmetros de manejo	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
15	Default	Parâmetros de soluções numéricas (I).	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR

TABELA 7 - continuação

16	Default	Parâmetros de soluções numéricas (II).	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
17	Default	R0, R1	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
18	Default	Parâmetros de diagnósticos	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
19	Default	INDOS, LAUX1, IDSTRM	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
20	Default	"Flags" de plotagem.	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
21	Default	PLTFLG	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR
22	Default	Trilha de plotagem	Ver entradas possíveis no Manual do Programa SRFR

programa SRFR.DAT ou do sub-programa SRFRPREP, que é um pré-processador (interativo) usado para construção de um arquivo de dados de entrada. A primeira opção é mais prática, podendo ser utilizado o comando EDIT do MS-DOS para a edição dos dados.

Os dados de campo exigidos para o processamento do programa são:

- i) comprimento do sulco, em metros (LINHA 5);
- ii) declividade do fundo do sulco, (LINHA 8);
- iii) espaçamento entre sulcos, em centímetros, das constantes C e M da equação da seção transversal do sulco (LINHA 9);
- iv) parâmetros de manejo: lâmina requerida (ZREQ), em milímetros (LINHA 10), vazão, em  $l/s$ , tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ), em minutos, razão para qual ocorre o corte na irrigação (ROT), fator de redução de vazão (RQ2Q1) e número de pulsos da irrigação, (NCYCLE), (LINHA 11).

O restante dos dados são opções feitas dentro da própria operação do programa, conforme listagem apresentada na TABELA 7. Na TABELA 8, a seguir, é apresentado um exemplo de entrada de dados, que é feita a partir do sub-programa SRFR.DAT. Na tabela é feita uma listagem da descrição dos parâmetros de entrada de dados e os dados fornecidos ao programa em cada linha. O exemplo refere-se a uma simulação feita com dados de RAMSEY (1976). A relação de dados de campo e suas unidades são apresentadas na TABELA 9.

### 3.1.2 Saída de Dados

A saída de dados do programa SRFR é feita através do sub-programa SRFR.OUT, na seguinte sequência:

- i) os dados são fornecidos ao sub-programa SRFR.DAT, acessado através do comando EDIT SRFR.DAT;
- ii) uma vez fornecidos os dados, os mesmos são processados pelo sub-programa SRFR.EXE; e
- iii) após o processamento, os resultados são gravados e transferidos para o sub-programa SRFR.OUT.

TABELA 8 - Descrição dos parâmetros de entrada de dados e listagem do arquivo SRFR.DAT, do programa SRFR -Surface Furrow - (STRELKOFF,1990). Exemplo de entrada de dados para vazão inicial constante e razão de avanço (TL/Tinf) de 1/13 para dados de RAMSEY (1976).

Linha	Descrição dos parâmetros de entrada de dados/ Sub-programas do SRFR	Listagem do arquivo SRFR.DAT
0	Unidades U1,U2,U3,U4	8,0,7,9      Line 0
1	Corrida nova	1
2	Descrição da corrida	RAMSEY (1976) - Vazão inicial constante - TL/Tinf = 1/13
3	Controle de dimensões: sistema métrico	1
4	INFMOD, RUFMOD, FPCFLG	1,2,1
5	Comprimento do sulco (m)	100.0
6AB	K, A, B, C, NMAN, AN	7.59, 0.500, 0.0, 0.0, 0.022, 0
7	DBC,UBC,SOMOD,MXSG	1,2,1,5
8A	SOAVG (So) - Declividade do sulco	0.00232
9A	Espaçamento entre sulcos (cm)	100.0
9D	Constante C (cm <sup>1</sup> -M), expoente (M)	13.62, 1
10	ZREQ, MODQ	13.62, 1
11A	Q1, TCYCLE, ROT, RQ2Q1,NCYCLE	1.330, 208.0, 0., 0, 1
12	Dado não computado	Default
13	SOLMOD,LINMOD,DMLMOD,MAZ	0 0 0 0 (Default)
14E	INPMDH,YO,NMANO,S00	0 0 0 0 (De
15	MDENSE/N(STD),IMAX,TMAX,YREC,RDX,RLSTRM,RDXU,NYUBC	0 0 0 0 0 0 0
16	RCMXR,RMMXR,JMAX	0 0 0 (Default)
17	RO,RI	0, 0
18	IDIAG,IDCH,ID2,IDCHCH,IDTAU,IDZ,IDPLOT,IPRZA,FLGPVE	1,0,0, 0,0,0, 0,0,0
19	IDNODS,IAUX1,IDSSTRM,IDIAG4,IDIAG5,IDIAG6,IDIAG7,IDIAG8,IDIAG9	0 0 0 0 0 0 0 0
20	IPLOTW,IPLOTA,IPLOTH,IPLOTQ,IPLOTC	1 1 0 -1 0
21	PLTFLG,SIMLNO,COLRNO,PLTFXS,PLTFSA,PLTFSH,PTLFSQ,PLTFST,PLTFSZ	3 0 0 0 0 0 0 0
22	PLTPTH, Trilha de plotagem do arquivo de dados	Default
23	Finalizacao dos dados	0
Observação	Notas do Programa SRFR	Note: This example differs from the example in the manual in that no plotting is reques file

TABELA 9 - Dados de campo para simulação da irrigação através do SRFR (STRELKOFF, 1990)

D A D O S	SÍMBOLO E UNIDADE
Vazão	Q, $\ell/s$
Declividade	$S_o$ (m/m)
Comprimento do sulco	L (m)
Tempo de irrigação	TCO (min)
Constante de infiltração	k ( $\text{cm}/\text{min}^a$ )
Constante a	a (adimensional)
Constante n de Manning	n (adimensional)
Espaçamento entre sulcos	E (m)
Constante C	C ( $\text{CM}^{i-u}$ )
Constante M	M (adimensional)

A leitura dos resultados pode ser feita na tela do computador ou pode ser impresso uma listagem. A leitura na tela é feita através do comando TYPE SRFR.OUT, enquanto que a impressão é feita a partir do comando TYPE SRFR.OUR > LPT1. É importante lembrar que a configuração mínima para o processamento do programa é a de um microcomputador 386.

Os resultados fornecidos pelo SRFR.OUT são divididos nos oito seguintes relatórios:

- relatório completo de entrada de dados, onde são listadas todas as entradas fornecidas ao arquivo SRFR.DAT;
- relatório sobre dados de propriedades hidráulicas do solo e da cultura. Neste relatório são apresentados os valores de K, A, B, C utilizados na fórmula de infiltração escolhida e n de Manning;
- relatório da geometria do sistema de irrigação, onde são relacionados os dados utilizados na forma, comprimento e espaçamento dos sulcos;
- Relatório dos parâmetros de manejo de irrigação, onde são apresentados os principais parâmetros de manejo da simulação: (1) lâmina aplicada, (2) vazão, (3) tempo de ciclo e (4) número de

- ciclos ou eventos de irrigação.
- e) Relatório dos parâmetros característicos. Neste relatório são listados os parâmetros utilizados pelo método das características em sua forma dimensional. Tais parâmetros são: (1) lâmina normal, (2) lâmina crítica, (3) número de Froude em função da lâmina normal, (4) lâmina, (5) comprimento do sulco, (6) vazão, (7) tempo e (8) declividade do sulco.
  - g) Relatório dos parâmetros de solução numérica, onde são listados todos os parâmetros numéricos, nas formas adimensional e dimensional, utilizados na corrida do programa.
  - h) Relatório do perfil final de distribuição da água após a irrigação. Neste relatório são apresentados os dados mais representativos do perfil de distribuição da água após a irrigação (tempo de avanço, tempo de recessão, espaço percorrido pela onda de irrigação e lâmina infiltrada) extraídos do relatório anterior (Parâmetros de Solução Numérica).
  - i) Relatório Sinopse dos Resultados de Irrigação. Neste relatório é listada uma síntese de toda a simulação, apresentando todos os resultados finais referentes a tempo, vazão, lâminas superficiais e infiltradas, parâmetros de uniformidade e parâmetros de eficiência.

Estes relatórios são caracterizados por apresentarem todos os dados em unidades inglesas, métricas e características (adimensionais). Desta forma os dados são separados dentro de uma estreita relação entre si e formando conjuntos de parâmetros relacionados a uma determinada fase do dimensionamento e análise, tornando fácil a sua verificação e utilização em simulações à parte.

### 3.1.3 Parâmetros de Uniformidade e Eficiência de Irrigação utilizados pelo SRFR

O programa SRFR considera cinco parâmetros de uniformidade e cinco parâmetros de eficiência. Os parâmetros de uniformidade são os definidos pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (UCC), coeficiente de uniformidade HSPA (UCH), uniformidade de distribuição (DU), distribuição de uniformidade no menor quartil (DULQ) e a fração de run-off (RP) em percentagem. Os parâmetros de eficiência são definidos pela eficiência de irrigação (IE), fração utilizada de volume infiltrado (UZ), eficiência de Armazenamento (SE), percentagem de área total adequadamente irrigada (AAP) e razão de deficiência, déficite médio na área sobreirrigada em percentagem de lâmina requerida ZREQ (DR).

#### Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (UCC)

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (UCC) é o parâmetro mais comumente usado para expressar a uniformidade de distribuição de água. No programa SRFR é utilizado o coeficiente de uniformidade de Christiansen (UCC) ponderado, definido pela EQUAÇÃO 12.

$$UCC = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N \delta x(k) \frac{Z_v(K)}{Z_{avg}}}{L} - 1 \quad (12)$$

onde  $\delta(K)$  é o comprimento na K-ésima estação,  $Z_v(K)$  é o volume infiltrado por unidade de comprimento por unidade de largura da parcela irrigada na K-ésima estação, N é o número de células computacionais  $_{avg}$  é a lâmina média definida pela EQUAÇÃO 13:

$$Z_{avg} = \frac{V_z}{L} \quad (13)$$

onde  $V_z$  é o volume infiltrado por unidade de comprimento dividido pelo espaçamento entre sulcos e  $L$  é o comprimento do sulco.

Segundo SOUZA (1990), o coeficiente de uniformidade de Christiansen (UCC) é o parâmetro mais comumente usado para expressar a uniformidade de distribuição da água, podendo ser utilizada para outros métodos de irrigação, servindo também como base de comparação entre diferentes sistemas de irrigação.

Segundo KARMELI et alli (1978) diferentes distribuições da água no solo podem dar origem a diferentes valores de UCC e que uma irrigação perfeitamente uniforme seria aquela na qual o UCC fosse igual a 100%.

### Uniformidade de Distribuição

O coeficiente de uniformidade de distribuição (DU) é dado pela EQUAÇÃO 14.

$$DU = \frac{Z_{\min}}{Z_{\text{avg}}} \quad (14)$$

onde  $Z_{\min}$  é a lâmina de infiltração mínima após a irrigação e  $Z_{\text{avg}}$  é a lâmina infiltrada média, dada pela EQUAÇÃO 13.

### Uniformidade de Distribuição no menor quartil

O coeficiente de uniformidade de distribuição no menor quartil (DULQ) no menor quartil é dado pela relação entre a lâmina de infiltração média no menor quartil (ZLQ) e a lâmina infiltrada média, expressão na EQUAÇÃO 15.

$$DULQ = \frac{ZLQ}{Z_{\text{avg}}} \quad (15)$$

### Coeficiente de Uniformidade HSPA (UCH)

Segundo STRELKOFF (1990), com sulcos espaçados a uma distância  $\epsilon$  e o comprimento  $L$  do sulco dividido por um número  $N$  de células computacionais de vários comprimentos, a lâmina infiltrada média é dada pela EQUAÇÃO 13 e coeficiente de uniformidade HSPA (UCH) é definido pela EQUAÇÃO 16:

$$UCH = 1 - 0,798 \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \left( \frac{Z_u(K)}{Z_{avg}} \right)^2 - 1}{N - 1}} \quad (16)$$

onde  $Z_u(K)$  é o volume por unidade de comprimento por unidade da área irrigada na  $K$ -ésima estação ou célula computacional.

### Fração de Escoamento Superficial

A fração de escoamento superficial, em percentagem é expressa pela EQUAÇÃO 17,

$$RP = 100 \frac{V_{ro}}{V_0} \quad (17)$$

onde  $V_{ro}$  volume total de escoamento superficial computado e  $V_0$  é o volume aplicado.

### Parâmetros Eficiência de Irrigação

Os parâmetros de eficiência de irrigação (IE), fração útil do volume infiltrado (UZ), eficiência de irrigação (SE) e a percentagem de área total adequadamente irrigada (AAP) são apresentados pelo SRFR em termos de três interpretações da lâmina requerida de irrigação: (1) o valor de entrada da

lâmina requerida de infiltração (ZREQ) no programa; (2) o valor mínimo de lâmina requerida de infiltração (ZREQ) na distribuição (ZMIN) e (3) lâmina média do menor quartil na distribuição (ZLQ).

Desta forma a eficiência de irrigação (IE) é definida pela EQUAÇÃO 18, a fração útil do volume infiltrado (UZ) é definida pela EQUAÇÃO 19 e eficiência de armazenamento é definida pela EQUAÇÃO 20:

$$IE = 100 \frac{Z_v}{Z_0} \quad (18)$$

$$UZ = \frac{Z_u}{Z_{avg}} \quad (19)$$

$$SE = \frac{Z_u}{Z_{req}} \quad (20)$$

onde  $Z_0$  é a lâmina média aplicada,  $Z_{avg}$  é a lâmina média infiltrada (EQUAÇÃO 13), ZREQ é a lâmina requerida de infiltração e  $Z_u$  é a lâmina média útil de infiltração definida pela EQUAÇÃO 21:

$$Z_u = \frac{V_u}{L} = \frac{V_z - V_{dp}}{L} \quad (21)$$

onde  $V_u$  é volume útil infiltrado,  $V_z$  o volume final infiltrado e  $V_{dp}$  é o volume perdido por percolação profunda.

A percentagem de área total adequadamente irrigada (AAP é definida pela EQUAÇÃO 22:

$$AAP = 100 L - \frac{x_{ui}}{L} \quad (22)$$

na qual  $x_{ui}$  é o comprimento total da faixa que recebe menor que a lâmina requerida de infiltração.

O último parâmetro de eficiência de irrigação utilizado pelo SRFR é

a razão de ineficiência (DR), que é definida pelo déficit médio de irrigação numa área sub-irrigada, expressa como uma percentagem da lâmina requerida, como mostra a EQUAÇÃO 23:

$$DR = 100 \left( 1 - \frac{V_{ui}}{x_{ui} \cdot Z_{req}} \right) \quad (23)$$

Nesta equação  $V_{ui}$  é o volume infiltrado na porções sub-irrigadas da área.

### 3.2 HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO SUPERFICIAL ADOTADAS NA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA SRFR

As decisões a tomar por ocasião do dimensionamento da irrigação superficial por sulcos estão relacionadas, segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) aos seguintes parâmetros: (1) vazão por sulco ( $Q_0$ ); (2) comprimento do sulco (L); (3) tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ); (4) declividade do sulco ( $S_0$ ) e (5) grau de automatização do sistema. Estes parâmetros, no entanto, podem ser reduzidos à vazão por sulco ( $Q_0$ ) e ao tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ), uma vez que a declividade do sulco ( $S_0$ ) é definida na sistematização da área, o comprimento do sulco (L) é especificado visando a melhor eficiência das máquinas e a automatização depende do tipo de sulco adotado. A filosofia básica da metodologia proposta por WALKER e SKOGERBOE (1987) é, portanto, a de escolher vazões ( $Q_0$ ) e tempos de irrigação ( $T_{c0}$ ) para pelo menos duas condições de campo que precisam ser avaliadas como parte do processo de dimensionamento da irrigação superficial por sulcos.

Tal como no dimensionamento, a análise da irrigação por sulcos pode ser feita tomando-se como referência a vazão ( $Q_0$ ) e o tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ).

No estudo aqui realizado de aplicação do programa SRFR foram abordadas duas hipóteses de trabalho: uma com relação a variação de vazão aplicada ao sulco ( $Q_0$ ) e a outra relativa ao tempo de irrigação ( $T_{c0}$ ).

Com relação a variação de vazão o programa SRFR foi usado para simular duas condições diferentes em cada irrigação. Em primeiro lugar o

programa simulava uma vazão constante durante todo o evento de uma irrigação. Em segundo lugar, os mesmos dados eram utilizados, mas a vazão inicial era reduzida à metade quando o tempo era igual ao tempo de avanço ao final do sulco. O objetivo destas análises era observar o efeito de redução de vazão nos parâmetros de performance de irrigação.

No que se refere ao tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) foi estudado o critério proposto por CRIDDLE et alli (1956) a qual estabelece que a irrigação é mais uniforme quando a razão de avanço é igual a 1/4. Na realidade, além do valor 1/4, foram avaliadas as irrigações com outros valores de avanço (ex.: 1/2, 1/6, 1/5, etc).

Cada uma das hipóteses estudadas foi aplicada a quatro conjuntos de dados representando duas situações de sulcos curtos e duas situações de sulcos longos. Nos itens seguintes são apresentados os dados utilizados e o fluxo de análises e simulações.

### 3.3 DADOS UTILIZADOS

As simulações foram feitas utilizando quatro conjuntos de parâmetros de manejo representando situações físicas diferentes, para condições de sulcos curtos e longos. Estes dados são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 - Dados de entrada para simulação da irrigação para RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT et alli (Fazendas Stieben e Benson, 1980).

DADOS	SIMBOLO E UNIDADE	SULCOS CURTOS		SULCOS LONGOS	
		RAMSEY	SOUZA	STIEBEN	BENSON
Vazão	Q (l/s)	1,33	1,00	0,59	1,61
Declividade	$S_0$ (m/m)	0,001032	0,0030	0,0098	0,0045
Comprimento	L (m)	100	100	350	625
Tempo de Cut-off	$T_{CO}$ (min)	208	156	696	698
Constante de Infiltração	K (cm/h <sup>2</sup> )	7,59	2,18	0,29	2,36
Constante a	a (adimensional)	0,5000	0,534	0,8700	0,4498
Constante n de Manning	n (adimensional)	0,022	0,040	0,150	0,250
Espessura entre sulcos	E (m)	1,0	1,0	1,12	1,54
Constante C	C (cm <sup>1-1/2</sup> )	1,091	10,25	15,5	16,47
Constante M	M (adimensional)	0,4539	0,691	0,544	0,4498

Como pode ser observado na TABELA 10, os sulcos curtos referem-se a dados de RAMSEY (1976) e SOUZA et alli (1987), enquanto que os sulcos longos referem-se a dados de ELLIOTT et alli (1980). Foram considerados sulcos curtos aqueles com comprimento menor ou igual a 100m e sulcos longos os de comprimento superiores a este valor.

Neste ponto é importante observar a natureza dos dados utilizados.

Os dados de RAMSEY (1976) estão relacionados s sulcos de precisão usados para a medição de parâmetros físicos como as lâminas de fluxo, velocidades médias, valores da constante "n" de fórmula de Manning, valores da constante "C" da fórmula de Chezy, valores da constante "f" da fórmula de Darcy-Weisbach e valores da constante " $\lambda$ " da fórmula de Sayre-Albertson. A partir destes valores o autor determinou a resistência ao fluxo na irrigação por sulcos. O dimensionamento destes sulcos não objetivava, assim, irrigações eficientes ou uniformes. No presente trabalho foram utilizados os dados do sulco F2, listados na TABELA 10.

Os dados de SOUZA et alli (1987) são decorrentes de avaliações técnicas e econômicas da irrigação por sulcos e por aspersão na cultura de feijoeiro (*Vigna unguiculata* (L) Walp) empreendidas em quatro áreas de experimento na Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC/CCA/UFC), conduzidas utilizando duas técnicas de manejo: manejo convencional e manejo tecnificado. O manejo convencional consistia na aplicação de lâminas d'água e turno de regas constantes, enquanto no manejo tecnificado tais parâmetros foram variáveis em função da evapotranspiração acumulada e três profundidades efetivas das raízes ao longo do ciclo. Os sistemas foram avaliados em função da eficiência e uniformidade de distribuição da água para os dados colhidos em campo. No presente trabalho foram utilizados os dados de manejo do testes número 01 realizado na área CT9 (sulcos-manejo convencional), conforme a TABELA 10.

As simulações para sulcos longos foram feitas com base em dados de ELLIOTT et alli. Os dados são referentes a duas das seis fazendas pesquisadas, entre os anos de 1977 e 1979, por pesquisadores do Departamento de Engenharia Agrícola e Química da Universidade Estadual do Colorado, EUA.

Neste trabalho foram utilizados os dados colhidos nas fazendas R. L. Stieben e Kenneth Benson. A fazenda R. L. Stieben está localizada a duas milhas ao sul da cidade de Wellington, Colorado; o solo nas áreas estudadas em 1978 é de textura média, tendo sido utilizada a cultura de cana-de-açúcar. A fazenda Kenneht Benson fica a duas milhas ao leste da cidade de Lucerne, Colorado, o solo nas áreas estudadas é também de textura média, tendo sido utilizada a cultura de milho. Neste trabalho, foram utilizados os dados da irrigação número 4, realizada em 09 de agosto de 1978 na fazenda Stieben e os dados da irrigação número 3, realizada em 28 de junho de 1977 na fazenda Benson. Estes são os dados listados na TABELA 10.

### 3.4 FLUXO DE ANÁLISES E SIMULAÇÕES

Como foi dito anteriormente, foram testadas duas hipóteses de simulação: vazão inicial constante ( $Q_0$ ) e vazão inicial reduzida à metade ao final da fase de avanço, e variação do tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ), em função de quatro diferentes razões de avanço. Isto representa a simulação e análise de oito situações diferentes para cada conjunto de dados, totalizando trinta e dois testes para os quatro casos estudados. Estas simulações geram uma grande quantidade de dados, obrigando a sistematização das análises. Neste trabalho é proposta uma metodologia dividida em cinco fases, descritas a seguir.

Na primeira fase foram criados quatro diretórios, nomeados pela procedência dos dados (RAMSEY, SOUZA, STIEBEN e BENSON), onde foram armazenadas cópias do programa SRFR e os arquivos de entrada e saída de dados para cada simulação. Esta fase tem, portanto, três etapas:

- i) acionamento do computador e sistema operacional da máquina;
- ii) criação de um diretório no diretório raiz (C:>MD RAMSEY, por exemplo);
- iii) cópia do programa SRFR, gravado no disquete A, para armazenamento no diretório criado (C:>RAMSEY>COPY \*.\* A:).

A segunda fase envolveu a preparação dos dados, com a adequação das unidades de campo para as unidades exigidas pelo programa SRFR, a própria entrada de dados (através do comando EDITOR do MS.DOS) no arquivo SRFR.DAT ou no arquivo SRFRPRE.EXE, o processamento das informações (corrida do programa) e a impressão dos resultados, através do arquivo SRFR.OUT.

A segunda fase constitui-se no fluxo básico de simulações, a partir do qual se fará as outras simulações. Esta fase foi subdividida em dez etapas:

- i) início das operações;
- ii) preparação dos dados. Escolha das unidades de medidas;
- iii) acionamento do diretório gravado na primeira fase ;
- iv) entrada de dados, a partir de duas opções:
  - a) através do programa SRFRPREP.EXE ou
  - b) através do editor do MS-DOS;
- v) entrada de dados;
- vi) cálculo da simulação (corrida do programa) e impressão dos dados de entrada do arquivo SRFR.DAT na tela;
- vii) renomeação do arquivo SRFR.DAT para SRFRMOD.DAT, garantindo assim a integridade dos dados da simulação em curso;
- viii) impressão do relatório final do SRFR, através do arquivo SRFR.OUT;
- ix) saída de dados;
- x) fim da simulação.

A primeira corrida do programa é feita para se obter o tempo de avanço ( $T_D$ ) e o tempo de infiltração ( $T_{IN}$ ) para as condições originais dos dados propostos. Quando a lâmina requerida (ZREQ) não foi fornecida, esta foi calculada pela equação de KOSTIAKOV, utilizando o tempo de infiltração ( $T_{IN}$ ) resultante da subtração do tempo de avanço ( $T_D$ ), fornecido na corrida do programa, do tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ). Nas demais corridas o tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) é recalculado para se obter as razões de avanço 1/2, 1/4 e 1/6,

testadas nas demais simulações.

A terceira fase abrange, portanto, o cálculo do tempo de avanço ( $T_D$ ) e tempo de infiltração ( $T_{INF}$ ) para as hipóteses de vazão inicial constante e vazão inicial reduzida à metade no final da fase de avanço, podendo ser dividida em seis etapas.

- i) cálculo do tempo de irrigação ( $T_{CO}$ );
- ii) repetição das etapas i a iv da segunda fase;
- iii) simulações considerando:
  - a) vazão contínua ( $Q=Q_0$ );
  - b) vazão reduzida à metade no final da fase de avanço ( $Q=0,5 Q_0$ );
- iv) repetição das etapas v a viii da segunda fase;
- v) saída de dados;
- vi) fim da simulação.

A penúltima fase é idêntica à terceira, considerando-se agora as demais simulações para vazão inicial constante e vazão reduzida à metade no final da fase de avanço para as razões de avanço de 1/2, 1/4 e 1/6. O tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) é calculado pela soma do tempo de infiltração ( $T_{INF}$ ) com o tempo de avanço ( $T_D$ ) encontrados na primeira corrida do programa. Os dados de redução de vazão e tempo de infiltração são alterados na LINHA 11 do arquivo SRFR.DAT. A primeira informação desta linha é a vazão inicial ( $Q_1 = Q_0$ ), seguida do tempo de irrigação ( $TCYCLE=TCO$ ), razão entre o tempo de avanço,  $T_D$ , e o tempo de irrigação,  $T_{CO}$  ( $ROT$ ), razão entre a vazão inicial e a vazão reduzida ( $RQ2Q1$ ) e o número de pulsos ( $NCYCLE$ ).

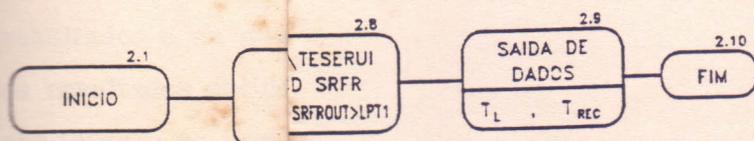
A última fase é constituída pela análise dos dados. Nesta fase os dados foram analisados com o auxílio da planilha eletrônica QUATRO.PRO, utilizada para a tabulação de dados e elaboração das curvas de avanço, recessão e infiltração a partir dos dados fornecidos pelo arquivo SRFR.OUT de cada simulação. As aplicações da planilha QUATRO.PRO podem ser verificadas no capítulo seguinte.

Os fluxogramas de cada fase descrita acima são apresentados na FIGURA 5, a seguir.

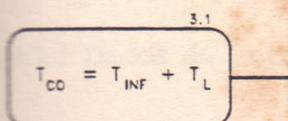
## 1.0 - PRIMEIRA F

1  
LIGA COMPUTADOR  
CARREGA SISTEMA  
OPERACIONAL

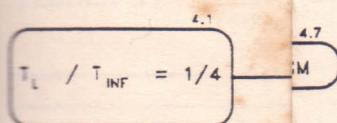
## 2.0 - SEGUNDA I



## 3.0 - TERCEIRA



## 4.0 - QUARTA F



## 5.0 - QUINTA FA



FIGURA 5 - Flu

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das simulações com o programa SRFR é apresentada a seguir para as hipóteses elencadas na metodologia.

Com o objetivo de ser mais sintético na apresentação destes resultados e na sua discussão, foi adotada a seguinte forma de apresentação: os resultados obtidos a partir dos dados de RAMSEY (1976) são discutidos na sua íntegra no item 4.1, enquanto que os demais são apresentados e discutidos em conjunto.

### 4.1 RESULTADOS APRESENTADOS PARA OS DADOS DE RAMSEY (1976)

#### 4.1.1 Dados de Entrada

Na TABELA 11 são apresentados os dados propostos por RAMSEY (1976). Estes dados são caracterizados por serem referentes a sulcos curtos (100 m) e de pequena declividade ( $S_0 = 0,001032$  m/m).

TABELA 11 - Dados de entrada para simulação da irrigação para RAMSEY (1976)

D A D O S	SÍMBOLO E UNIDADE	V A L O R
Vazão	Q, $\ell/s$	1,33
Declividade	$S_0$ (m/m)	0,001032
Comprimento do Sulco	L (m)	100
Tempo de Cut-Off	$T_{CO}$ (min)	208
Constante de Infiltração	k (cm/min <sup>a</sup> )	0,98
Constante a	a (adimensional)	0,50
Constante n de Manning	n (adimensional)	0,022
Espaçamento entre sulcos	E (m)	1,0
Constante C	C (cm <sup>1-u</sup> )	1,091
Constante M	M (adimensional)	0,4539

A partir destes dados foram efetuadas as seguintes simulações:

- a) Vazão constante ( $Q_0$ ) de 1,33  $\ell/s$  associada às razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13.
- b) Vazão inicial ( $Q_0$ ) de 1,33  $\ell/s$  associada a redução de vazão para metade da vazão inicial ( $1/2 Q_0$ ), quando o tempo decorrido (T) for igual ao tempo de avanço ( $T_D$ ), para as razões de avanço de 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13.

#### 4.1.2 Análise do Avanço, Recessão e Infiltração

Os resultados das simulações feitas sobre os dados de RAMSEY (1976) são apresentados a seguir, agrupados em função da vazão adotada.

##### a) Vazão Inicial Constante

A FIGURA 6 mostra as curvas de avanço, recessão e infiltração simuladas pelo modelo SRFR e os dados observados em campo por RAMSEY (1976) para a razão de avanço 1/13. Esses dados podem ser observados também na TABELA 12 apresentada a seguir. Uma análise destes dados mostra que o avanço ao final do sulco simulado pelo SRFR foi superestimado em aproximadamente 21%, apesar da grande aproximação das curvas de avanço observadas e simuladas. Com relação às curvas de recessão, os resultados mostram que o modelo subestimou o início e o final da recessão em apenas 3% no início e 0,86% no final. Isto mostra uma boa simulação do fenômeno hidráulico da irrigação por superfície pelo SRFR para sulcos curtos. Na TABELA 13 são apresentados os resultados obtidos através do SRFR para dados de RAMSEY (1976) e hipótese de vazão inicial constante nas razões de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13.

Numa primeira leitura destes quadros, pode-se observar que as lâminas infiltradas, que representam os volumes infiltrados por unidade de área, crescem com a diminuição da razão de avanço, o mesmo ocorrendo com os tempos de recessão ao final do sulco (estação  $K = 25$ , distância  $X = 100$  m). Os valores  $K$ ,  $X$  e Tempo de Avanço ( $T_D$ ) permanecem os mesmos para todas as

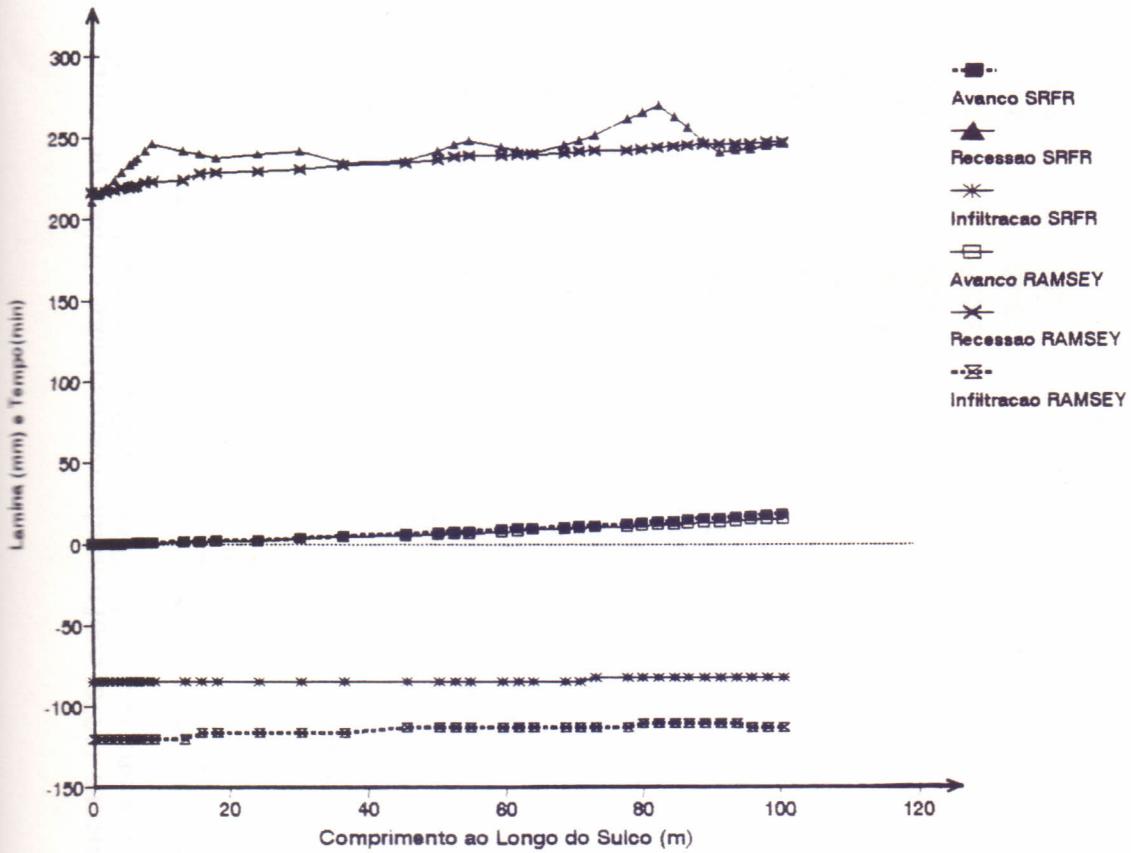


FIGURA 6 - Gráfico de avanço, recessão e infiltração a partir do perfil de distribuição da água infiltrada utilizando-se vazão inicial constante  $Q_0 = 1,33 \text{ m}^3/\text{s}$ , lâmina requerida ZREQ = 13,62 cm e razão de avanço ( $T_I/T_{INF}$ ) de 1/13, confrontando os resultados apresentados pelo programa SRFR e os resultados apresentados por RAMSEY (1976)

TABELA 12 - Resultados obtidos por RAMSEY (1976) confrontados com os dados obtidos pelo programa SRFR para vazão inicial  $Q_0$  constante igual 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razão de avanço 1/13

R E S U L T A D O S								
Estação	RAMSEY (1976)				SRFR (1994)			
	Comprimento X(m)	Tempo de TL(min)	Tempo de TR(min)	Lâmina Z(mm)	Comprimento X(m)	Tempo de TL(min)	Tempo de TR(min)	Lâmina Z(mm)
0	0,00	0,00	216,40	120,29	0,00	0,07	209,73	85,47
1	0,00	0,00	216,40	120,29	1,14	0,19	214,24	85,47
2	0,00	0,00	216,40	120,29	2,29	0,32	218,74	85,47
3	0,50	0,00	217,70	120,29	3,43	0,44	223,25	85,47
4	1,10	0,00	219,00	120,29	4,57	0,56	227,75	85,47
5	2,10	0,10	219,40	120,29	5,71	0,68	232,26	85,47
6	3,40	0,20	219,80	120,29	6,28	0,74	234,51	85,47
7	5,20	0,30	220,50	120,29	6,86	0,81	236,76	85,47
8	7,80	0,50	222,00	120,29	8,00	0,93	241,27	85,47
9	9,14	0,65	222,80	120,29	9,14	1,05	245,77	85,47
10	11,40	0,80	223,60	120,29	13,72	1,68	241,36	85,47
11	16,40	1,30	226,90	117,13	16,00	1,99	239,16	85,47
12	18,29	1,75	227,80	117,13	18,29	2,30	236,95	85,47
13	23,40	2,20	228,70	117,13	24,39	2,95	239,20	85,47
14	30,48	3,00	230,55	117,13	30,48	3,60	241,44	85,47
15	36,58	3,80	232,40	117,13	36,58	5,00	234,20	85,47
16	45,72	4,60	234,25	113,96	45,72	6,50	235,40	85,47
17	47,00	5,40	236,10	113,96	50,29	7,22	241,74	85,47
18	52,50	6,30	238,00	113,96	52,58	7,58	244,91	85,47

TABELA 12 - Continuação

RESULTADOS								
RAMSEY (1976)					SRFR (1994)			
Estação	Comprimento	Tempo de	Tempo de	Lâmina	Comprimento	Tempo de	Tempo de	Lâmina
K	X(m)	TL(min)	TR(min)	Z(mm)	X(m)	TL(min)	TR(min)	Z(mm)
19	54,86	6,70	238,30	113,96	54,96	7,94	248,08	85,47
20	57,60	7,10	238,60	113,96	54,96	8,78	243,91	85,47
21	62,50	7,90	239,20	113,96	61,72	9,19	241,62	85,47
22	64,01	8,30	239,45	113,96	64,01	9,61	239,73	85,47
23	67,20	8,70	239,70	113,96	68,58	10,37	245,49	85,47
24	71,60	9,50	241,50	113,96	70,87	10,75	248,36	85,47
25	73,15	9,85	241,85	113,96	73,15	11,13	251,24	82,31
26	75,90	10,20	242,20	113,96	77,73	12,32	260,47	82,31
27	79,90	11,00	243,00	110,80	80,01	12,92	265,09	82,31
28	82,30	11,35	243,80	110,80	82,30	13,51	269,70	82,31
29	83,70	11,70	244,60	110,80	84,59	14,03	262,52	82,31
30	87,30	12,30	245,40	110,80	86,87	14,54	255,35	82,31
31	80,70	13,00	246,10	110,80	89,16	15,06	248,17	82,31
32	91,44	13,30	246,10	110,80	91,44	15,57	240,99	82,31
33	94,00	13,60	246,10	110,80	93,73	16,17	242,13	82,31
34	97,10	14,20	246,10	113,96	96,01	16,76	243,28	82,31
35	100,00	14,80	247,70	113,96	96,30	17,36	244,42	82,31
36	100,00	14,80	247,70	113,96	100,58	17,95	245,56	82,31

TABELA 13 - Perfil de Distribuição da Água Infiltrada após a Irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial  $Q_0$  - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13

Estações	Distâncias	Avanço	1/2		1/4		1/6		1/13	
			TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)
0	0,00	0,00	52,10	54,05	95,90	72,97	111,20	79,24	216,00	107,63
1	0,00	0,00	52,10	54,05	95,90	72,97	111,20	79,24	216,00	107,63
2	0,50	0,00	52,70	54,05	96,50	71,97	111,50	79,24	216,50	107,63
3	1,10	0,00	52,90	54,05	97,20	72,97	111,90	79,24	217,20	107,63
4	2,10	0,10	53,30	54,05	98,00	72,97	112,70	76,07	217,70	107,63
5	3,40	0,20	53,90	54,05	98,70	72,97	113,50	76,07	218,50	107,63
6	5,20	0,30	54,60	50,88	99,50	72,97	114,40	76,07	219,80	107,63
7	7,80	0,50	56,00	50,88	100,40	69,80	115,30	76,07	221,30	107,63
8	11,40	0,80	57,50	50,88	102,20	69,80	117,20	76,07	222,70	104,46
9	16,40	1,30	59,10	50,88	104,20	69,80	120,50	76,07	226,00	104,46
10	23,40	2,20	60,90	50,88	106,40	69,80	121,70	72,90	227,60	104,46
11	33,20	3,40	64,00	47,70	109,90	66,62	124,30	72,90	231,20	101,30
12	47,00	5,40	65,00	47,70	111,20	66,62	127,10	72,90	235,00	101,30
13	52,50	6,30	65,60	47,70	112,50	66,62	128,50	69,73	235,70	101,30
14	57,60	7,10	66,20	47,70	113,70	66,62	129,00	69,73	236,30	101,30
15	62,50	7,90	67,30	47,70	115,00	63,45	129,50	69,73	236,90	98,13
16	67,20	8,70	68,50	44,52	116,20	63,45	129,90	69,73	237,90	98,13
17	71,60	9,50	69,60	44,52	116,90	63,45	131,30	69,73	238,80	98,13
18	75,90	10,20	70,20	44,52	117,50	63,45	132,70	69,73	239,80	98,13
19	79,90	11,00	70,80	44,52	118,10	63,45	133,50	66,56	240,70	98,13
20	83,70	11,70	71,40	44,52	118,70	63,45	134,10	66,56	242,60	98,13

TABELA 13 - Continuação

Estações	Distâncias	Avanço	1/2			1/4		1/6		1/13	
			TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	
K	X(m)	TL(min)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	
21	87,30	12,30	72,00	44,52	119,30	63,45	134,80	66,56	243,60	98,13	
22	90,70	13,00	72,00	44,52	120,00	63,45	135,40	66,56	244,50	98,13	
23	94,00	13,60	72,40	44,52	120,00	63,45	135,40	66,56	244,50	98,13	
24	97,10	14,20	72,80	44,52	120,00	63,45	135,40	55,56	244,50	98,13	
25	100,00	14,80	73,20	44,52	121,10	63,45	136,70	69,73	246,40	98,13	

razões de avanço analisadas. Para o caso de vazão inicial constante o menor tempo de recessão observado foi de 73,20 minutos, para a razão de avanço 1/2, enquanto que o maior foi de 247,70 minutos, para a razão de avanço 1/13, valores estes anotados ao final do sulco ( $X = 100$ ). A maior e a menor lâmina de infiltração observadas no início e final do sulco foram de 5,72 e 5,09 cm para a razão de avanço 1/2 e 12,03 e 11,40 cm para a razão de avanço 1/13 respectivamente. O tempo de avanço para todas as hipóteses foi de 14,83 minutos ao final do sulco. Os tempos foram controlados em 26 estações, variando da estação  $K = 0$  à estação  $K = 25$ .

A FIGURA 6 mostra também o perfil de distribuição da lâmina infiltrada. Observa-se uma distribuição com tendência a uma boa uniformidade com a diferença entre a lâmina máxima infiltrada (120,29mm) e mínima (113,96mm) de aproximadamente 5% para os dados de RAMSEY. No que se refere à lâmina simulada máxima (85,47mm) e a mínima (82,31mm) há uma diferença percentual de aproximadamente 4%. Observa-se que o modelo subestima o perfil de infiltração em aproximadamente 28%.

Como observado anteriormente, foram feitas simulações em que a vazão inicial foi mantida constante quando a água alcançava o final do sulco para razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13. Neste ponto é necessário um esclarecimento. O conceito de relação de avanço é "a razão entre o tempo de avanço ( $T_V$ ) e o tempo de infiltração ( $T_{INF}$ ) da lâmina real necessária no final do sulco. O tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) por sua vez é a soma do tempo de infiltração no final do sulco mais o tempo de avanço ( $T_{INF} + T_V$ ). Seja, por exemplo, uma situação em que o tempo de infiltração fosse de 100 minutos; então o tempo de avanço, numa razão de avanço de 1/4, seria de 25 minutos e o tempo irrigação de 125 min. Se quizéssemos ter uma razão de avanço de 1/2, teríamos que recalculamos os tempos de avanço e de irrigação. Para as simulações aqui apresentadas utilizou-se o caminho oposto, já que o tempo de avanço é fixo (14,83 minutos), de modo que os tempos de irrigação para cada simulação de razão de avanço foi modificado. Estes tempos de irrigação são os mesmos, para a mesma razão de avanço, tanto para a vazão inicial constante, quanto para a vazão inicial reduzida à metade quando o tempo decorrido é

igual ao tempo de avanço.

O uso de simulações com diferentes razões de avanço, mantida a vazão constante, tem influência nas curvas de recessão e no perfil de distribuição de água. Na FIGURA 7 é apresentado o exemplo para a razão de avanço 1/4, enquanto que na TABELA 13, apresentada anteriormente, são listados os resultados obtidos para todos os casos de razão de avanço.

A análise dos resultados mostrou que para a razão de avanço de 1/4 a curva de recessão é subestimada em 55,60% no início da recessão e 50,85% no final em comparação com os dados de campo de RAMSEY.

#### b) Vazão Reduzida à Metade quando $T = T_L$

De acordo com WALKER e SKOGERBOE (1987) um dos métodos mais comuns de reduzir as perdas por escoamento superficial é reduzir a vazão quando termina a fase de avanço. Esses efeitos serão discutidos posteriormente quando da análise dos parâmetros de uniformidade e eficiência.

Neste trabalho foi estudada a influência da redução de vazão sobre a curva de recessão e sobre o perfil de distribuição de água após a irrigação. A TABELA 14 apresenta este perfil de distribuição simulado pelo SRFR para os dados de RAMSEY com vazão inicial constante de 1,33 l/s reduzida à metade ao final da fase de avanço, para as razões de avanço estudadas (1/2, 1/5, 1/6 e 1/13).

Comparando-se estes resultados do TABELA 14 com aqueles apresentados na TABELA 13, onde a vazão foi mantida constante durante toda a irrigação, para os mesmos tempos de irrigação, observa-se que quase não houve diferença entre as trajetórias de recessão em cada uma das razões de avanço estudadas e, quando houve diferenças, estas foram mínimas, como é o caso do tempo de recessão para a vazão de avanço de 1/2 no início do sulco (52,1 minutos, com vazão constante, e 50,8 minutos com vazão reduzida) ou no final, em que o tempo de recessão foi de 73,2 minutos com vazão constante e 70,8 minutos com vazão reduzida.

A mesma linha de raciocínio pode ser seguida com relação ao perfil

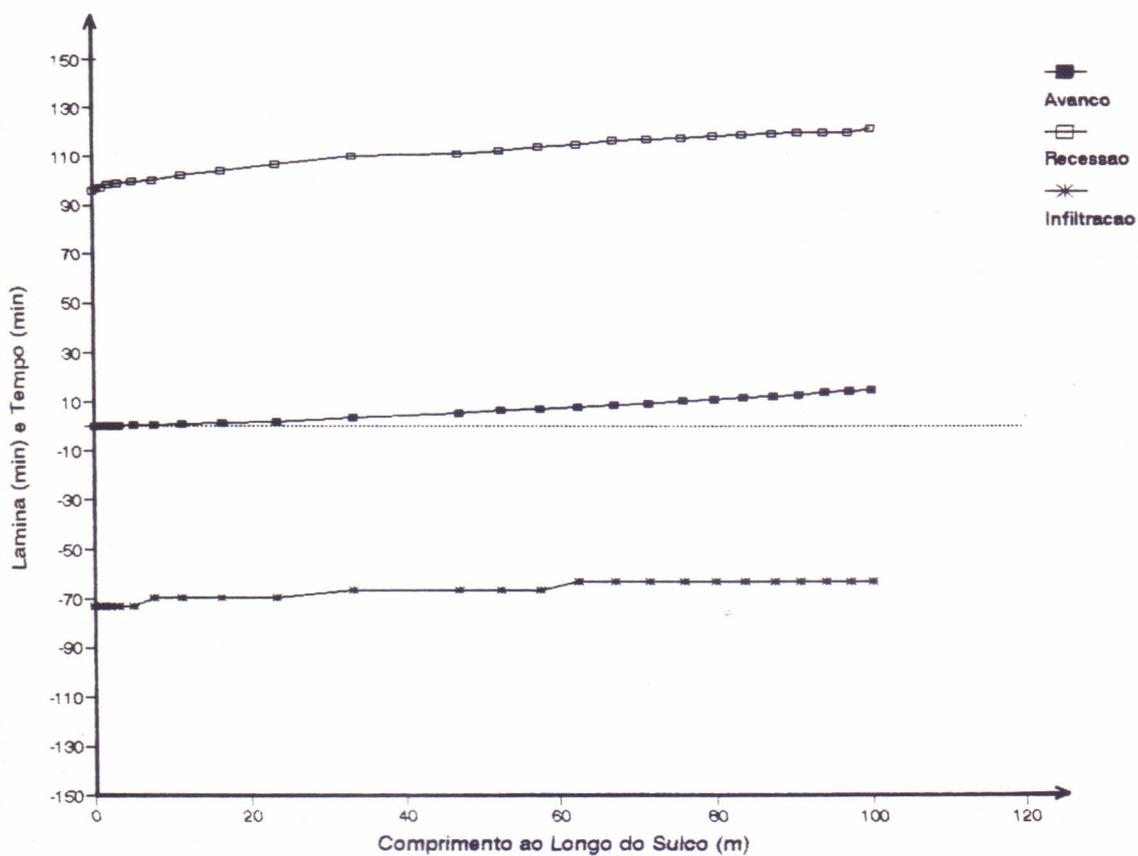


FIGURA 7 - Gráfico de avanço, Recessão e infiltração a parte do perfil de distribuição de água infiltrada utilizando-se vazão inicial ( $Q_0$ ) para RAMSEY (1976) utilizando vazão inicial constante  $Q_0$  constante igual a 1,33  $\ell/s$ , lâmina requerida (ZREQ) igual a 13,62 cm e razão de avanço ( $T_I/T_{INF}$ ) de 1/4, para dados de RAMSEY (1976).

TABELA 14 - Perfil de Distribuição da Água Infiltrada após a Irrigação fornecida pelo programa SRFR para dados de RAMSEY (1976) para vazão inicial  $Q_0$  - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33 l/s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13

Estações	Distâncias	Avanço	1/2		1/5		1/6		1/13	
			TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)
0	0,00	0,00	50,80	54,28	95,90	73,44	111,20	79,83	216,00	108,56
1	0,00	0,00	50,80	54,28	95,90	73,44	111,20	79,83	216,00	108,56
2	0,50	0,00	51,30	54,28	96,50	73,44	111,50	79,83	216,50	108,56
3	1,10	0,00	51,80	54,28	97,20	73,44	111,90	79,83	217,20	108,56
4	2,10	0,10	52,30	54,28	98,00	73,44	112,70	76,63	217,70	108,56
5	3,40	0,20	52,80	54,28	98,70	73,44	113,50	76,63	218,50	108,56
6	5,20	0,30	54,00	51,09	99,50	73,44	114,40	76,63	219,80	108,56
7	7,80	0,50	54,60	51,09	100,40	70,25	115,30	76,63	221,30	108,56
8	11,40	0,80	56,00	51,09	102,20	70,25	117,20	76,63	222,70	105,37
9	16,40	1,30	58,30	51,09	104,20	70,25	120,50	76,63	226,00	105,37
10	23,40	2,20	59,10	51,09	106,40	70,25	121,70	73,44	227,60	105,37
11	33,20	3,40	62,70	47,90	109,90	67,05	124,30	73,44	231,20	102,18
12	47,00	5,40	63,70	47,90	111,20	67,05	127,10	73,44	235,00	102,18
13	52,50	6,30	64,20	47,90	112,50	67,05	128,50	70,25	235,70	102,18
14	57,60	7,10	64,70	47,90	113,70	67,05	129,00	70,25	236,30	102,18
15	62,50	7,90	66,70	47,90	115,00	63,86	129,50	70,25	236,90	98,98
16	67,20	8,70	67,10	44,70	116,20	63,86	129,90	70,25	237,90	98,98
17	71,60	9,50	67,40	44,70	116,90	63,86	131,30	70,25	238,80	98,98
18	75,90	10,20	67,70	44,70	117,50	63,86	132,70	70,25	239,80	98,98
19	79,90	11,00	68,30	44,70	118,10	63,86	133,50	67,05	240,70	98,98
20	83,70	11,70	68,80	44,70	118,70	63,86	134,10	67,05	242,60	98,98

TABELA 14 - Continuação

Estações	Distâncias	Avanço	1/2		1/5		1/6		1/13	
			TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)
K	X(m)	TL(min)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)	TR(min)	Z(mm)
21	87,30	12,30	69,30	44,70	119,30	63,86	134,80	67,05	243,60	98,98
22	90,70	13,00	69,80	44,70	120,00	63,86	135,40	67,05	244,50	98,98
23	94,00	13,60	70,10	44,70	120,00	63,86	135,40	67,05	244,50	98,98
24	97,10	14,20	70,50	44,70	120,00	63,86	135,40	67,05	244,50	98,98
25	100,00	14,80	70,80	44,70	121,10	63,86	136,70	70,25	246,40	98,98

de distribuição da água infiltrada após a irrigação. Pode-se concluir, pela comparação da TABELA 13 com a TABELA 14, que não houve diferença na distribuição de água em decorrência da redução de vazão. As pequenas diferenças que se apresentaram devem ser consequência da possível diminuição no perímetro molhado nos sulcos de irrigação em função da vazão reduzida à metade. No entanto, não temos dados comprobatórios desta análise.

#### 4.1.3 Parâmetros de Uniformidade

##### a) Vazão Inicial Constante

Na TABELA 15 são apresentados os resultados do relatório "Sinopse dos Resultados da Irrigação" fornecido pelo SRFR para uma vazão constante ( $Q_0$ ) de 1,33  $\ell/s$  e para as razões de avanço equivalente a 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 e lâmina requerida de 13,62 cm. As informações contidas na TABELA 15 são divididas em sete blocos: a) Tempo de Irrigação; b) Volumes; c) Lâminas Superficiais Máximas; d) Lâminas Infiltradas; e) Lâminas Infiltradas Médias; f) Parâmetros de Uniformidade e g) Parâmetros de Eficiência.

Os referenciais de tempo estão relacionados ao tempo de irrigação ( $T_{CD}$ ), ao tempo de avanço ( $T_D$ ), ao tempo de recessão à montante ( $TR$ ) e à jusante ( $TFR$ ) e ao tempo de depleção ( $TE$ ).

Os valores de volumes apresentados na TABELA 15 são o volume aplicado bruto ( $VQI_{HID}$ ), volume de back-flow após o cut-off ( $VBX_{FLX}$ ), volume líquido de entrada ( $VQ$ ), volume infiltrado ( $VZ$ ) e volume de escoamento superficial ( $VRO$ ).

Os blocos C, D e E da TABELA 15 trazem os resultados referentes as lâminas superficiais máximas, lâminas infiltradas e lâminas infiltradas médias, respectivamente. As lâminas superficiais máximas apresentadas referem-se às lâminas máximas alcançadas à montante ( $Y_{MAX U}$ ), à jusante ( $Y_{MAX O}$ ) e em um ponto qualquer do sulco ( $Y_{MAX}$ ), fornecendo também o ponto onde ocorreu a lâmina máxima ( $Y_{MAX}$ ) e o perímetro molhado máximo do sulco ( $WP_{MAX}$ ). As lâminas infiltradas referem-se às lâminas mínima e máxima de infiltração,

TABELA 15 -- Sinopse dos resultados (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante, igual a 1,33 l/s, lâmina e 1/13

PARAMETROS		ANÇO					
		1/6	1/13				
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)	SISTEMA MÉTRICO (minutos)				
TCO	Tempo de irrigação	103.81	208.00				
TI	Tempo de avanço	14.83	14.83				
TR	Tempo de recessão (a montante)	112.09	216.39				
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	138.89	247.66				
TE	Tempo de depleção	138.89	247.66				
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)	SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)				
VQI HID	Volume aplicado	8.28	16.60				
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0.00	0.00				
VQ	Volume líquido de entrada	8.28	16.60				
VZ	Volume infiltrado	2.55	3.65				
VRO	Volume de Run-Off	5.74	12.95				
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	SISTEMA MÉTRICO (cm)				
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4.71	4.72				
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0.00	0.00				
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4.71	4.72				
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0.00	0.00				
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	27.25	27.26				
D) LÂMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)				
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	2.43	29.3				
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	2.71	32.7				
ZLQ	Lâmina de infiltração média no menor	2.45	29.6				
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	13.62	164.4				
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)				
ZQ	Lâmina Média Aplicada	8.28	100.0				
ZAVG	Lâmina Infiltrada Média	2.55	30.8				
RQ	Lâmina Média de Run-Off	5.74	69.2				
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.00	0.0				
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.12	1.4				
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.10	1.2				
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZREQ	2.55	30.8				
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZMIN	2.43	29.3				
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZLQ	2.45	29.6				
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional					
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Crh	0.973	0.979				
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0.968	0.975				
DU	Uniformidade de Distribuição	0.954	0.965				
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Menor	0.962	0.971				
RP	Fração de Run-off em Porcentagem	69.24%	78.03%				
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZRFQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ = ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	76%	29.34%	29.56%	21.97%	21.19%	21.32%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	0.00	0.954	0.961	1.000	0.965	0.970
SE	Eficiência de Armazenamento	71%	100.00%	99.93%	26.77%	100.00%	99.95%
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente	00%	100.00%	86.60%	0.00%	100.00%	86.60%
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Porcentagem de ZREQ	29%		0.50	73.23%		0.41%

lâmina de infiltração no menor quartil (ZLQ) e lâmina requerida de infiltração (ZREQ). As lâminas médias referem-se às lâminas médias do volume de percolação profunda baseados na lâmina requerida (ZREQ), na lâmina requerida (ZREQ) igualada à lâmina mínima (ZMIN) e na lâmina requerida (ZREQ) igualada à lâmina de infiltração no menor quartil (ZLQ). Além destas, são apresentadas as lâminas médias infiltradas menores ou iguais às lâminas requerida (ZU ZMIN), mínima e do menor quartil (ZU ZLQ).

Na TABELA 15 são também apresentados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (UCC), coeficiente de distribuição HSPA (UCH), uniformidade de distribuição a um quarto (DULQ) e fração de run-off (RP), além dos parâmetros de eficiência de irrigação (IE), fração útil de volume infiltrado (UZ), eficiência de armazenamento (SE), percentagem de área total adequadamente irrigada (AAD), razão de ineficiência (DR) e déficit médio em área não irrigada (expressos em percentagem de lâmina requerida) em função da lâmina requerida, lâmina requerida igualada à lâmina mínima e lâmina requerida igualada a lâmina do menor quartil.

Para facilidade de análise, a TABELA 16 apresenta os parâmetros de uniformidade extraídos da TABELA 15. Os resultados apresentados na TABELA 16 indicam que há um decréscimo nos valores dos parâmetros de uniformidade para um aumento nos valores das razões de avanço. Para os coeficientes de uniformidade de Christiansen (UCC), HSP (UCH) e distribuição de uniformidade (DU) a amplitude entre o maior e o menor valor dos resultados é pequena, variando apenas 1,9 pontos percentuais para o UCC, 2,1 para o UCH e 3,5 para o DU. Estes valores indicam que a razão de avanço tem pouca influência na distribuição de água. No entanto, as perdas por escoamento superficial representadas pela fração de run-off, apresentam uma variação significativa de 24,4 pontos percentuais entre a vazão de avanço de 1/2 (53,6%) e 1/13 (78,0%). Se considerarmos a recomendação de CRIDDLE (lei do 1/4), as perdas por escoamento superficial aumentam em 10% comparativamente com a razão de avanço 1/2, sem nenhum efeito significativo sobre a distribuição, cujos resultados mostram uma alta uniformidade (acima de 95%). Estes resultados estão de acordo com a análise feita no item 4.1.2, referente

TABELA 16 - Parâmetros de uniformidade para vazão constante ( $q_0$ ) igual 1,33  $\ell/s$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para os dados de RAMSEY (1976)

Razão de Avanço	UCC	UCH	DU	DULQ	RP
$T_I/T_{INF}$	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	%
1/2	0.960	0.954	0.930	0.942	0.536
1/4	0.969	0.963	0.946	0.955	0.638
1/6	0.973	0.968	0.954	0.962	0.692
1/13	0.979	0.975	0.965	0.971	0.780

à FIGURA 6. A FIGURA 8 representa bem estas variações, onde os parâmetros UCC, UCH e DU aparecem bem concentrados na parte superior do gráfico, enquanto a curva de run-off aparece em declínio na parte inferior.

b) Vazão inicial reduzida à metade quando  $T = T_L$

Na TABELA 17 são apresentados os relatórios "Sinopse dos Resultados da Irrigação" fornecidos pelo SRFR para uma vazão inicial ( $Q_0$ ) de 1,33  $\ell/s$  e e vazão reduzida quando o tempo decorrido ( $T$ ) igualar-se ao tempo de avanço ( $T_I$ ) e para as razões de avanço equivalente a 1/2, 1/5, 1/6 e 1/13. As características desta tabela são idênticas às da TABELA 15.

Na TABELA 18 são apresentados os parâmetros de uniformidade extraídos da TABELA 17. Do mesmo modo como descrito na TABELA 16, vazão inicial constante, os resultados apresentados na TABELA 18 indicam que há um decréscimo nos valores dos parâmetros de uniformidade para um aumento nos valores das razões de avanço no caso de redução da vazão. Para os coeficientes de uniformidade de Christiansen (UCC), HSPP (UCH) e uniformidade de distribuição (DU) a amplitude dos resultados é pequena, variando apenas 1,9 pontos percentuais para o UCC, 2,1 para o UCH e 3,5 para o DU. A fração de run-off, no entanto apresenta uma variação significativa de 24,4 pontos percentuais entre a vazão de avanço de 1/2 (53,6%) e 1/13 (78,0%). A FIGURA 9 (razão de avanço vs. parâmetros de uniformidade) representa bem

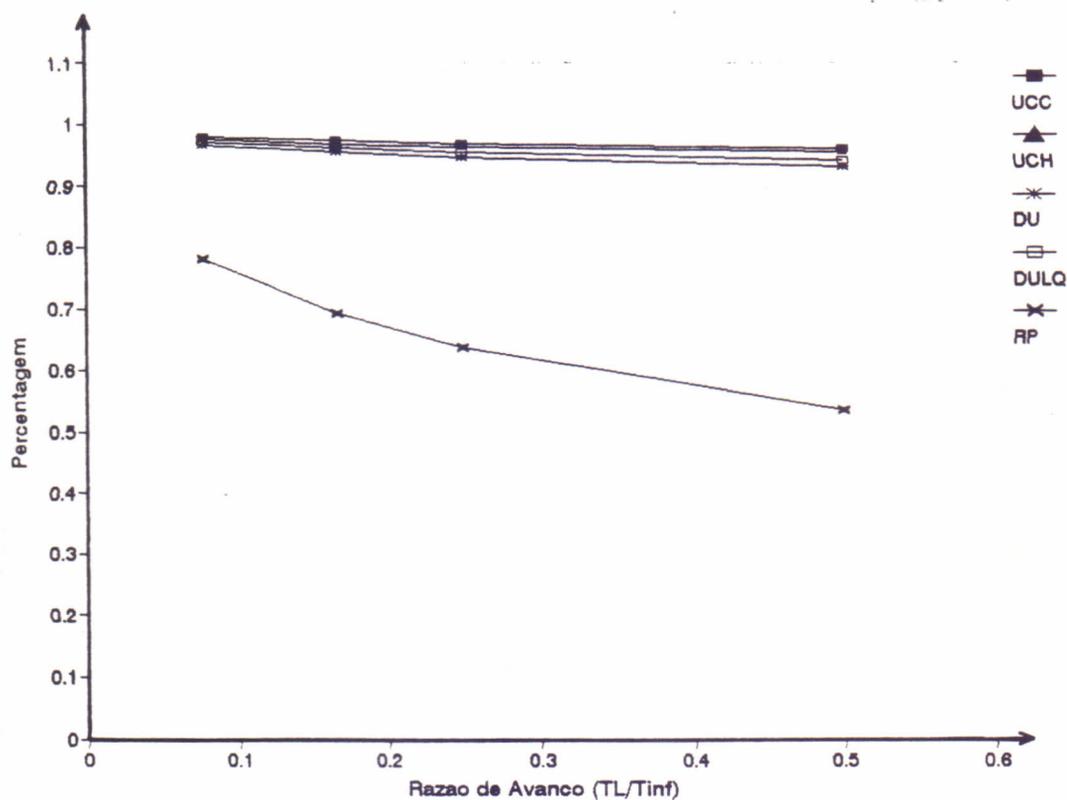


FIGURA 8 - Gráfico razão de avanço vs. parâmetros de uniformidade (UCC, UCH, DU e DULQ) e fração de escoamento superficial (RP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33  $\ell/s$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

TABELA 17 - Sinopse dos resultados (1976) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da cm e razões de avanço ( $TL/T_{INF}$ ) iguais a 1/2, 1/5, 1/6 e 1/1

PARÂMETROS		N Ç O					
		1/6		1/13			
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
TCO	Tempo de irrigação	103.81		208.00			
TL	Tempo de avanço	14.83		14.83			
TR	Tempo de recessão (a montante)	111.17		215.95			
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	136.66		246.43			
TF	Tempo de depleção	136.66		246.43			
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )			
VQI HID	Volume aplicado	4.72		8.88			
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0.00		0.00			
VQ	Volume líquido de entrada	4.72		8.88			
VZ	Volume infiltrado	2.27		3.21			
VRO	Volume de Run-Off	2.45		5.67			
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)			
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4.64		4.64			
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0.00		0.00			
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4.64		4.64			
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0.00		0.00			
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	27.06		27.06			
D) LÂMINAS INFILTRADAS		STEMA TRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	2.12	44.9	3.05	34.4		
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	2.46	52.1	3.43	38.6		
ZLQ	Lâmina de infiltração média no menor	2.14	45.5	3.07	34.6		
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	13.62	288.4	13.62	153.4		
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		STEMA TRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
Z Q	Lâmina Média Aplicada	4.72	100.0	8.88	100.0		
Z AVG	Lâmina Infiltrada Média	2.27	48.0	3.21	36.1		
RQ	Lâmina Média de Run-Off	2.45	52.0	5.67	63.9		
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.00	0.0	0.00	0.0		
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.15	3.1	0.16	1.8		
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.13	2.7	0.14	1.6		
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZREQ	2.27	48.0	3.21	36.1		
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZMIN	2.12	44.9	3.05	34.4		
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZLQ	2.14	45.3	3.07	34.6		
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional			
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Crh	0.961		0.970			
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0.955		0.964			
DU	Uniformidade de Distribuição	0.936		0.951			
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Menor	0.944		0.957			
RP	Fração de Run-off em Percentagem	51.97%		63.88%			
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		cada REQ da	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada na ZREQ dada	Baseada em ZREQ = Zmin	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	94%	44.95%	45.32%	36.12%	34.36%	34.56%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	00	0.936	0.944	1.000	0.951	0.957
SE	Eficiência de Armazenamento	55%	100.00%	99.92%	23.55%	100.00%	99.94%
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente	0%	100.00%	85.90%	0.00	100.00%	85.90%
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Percentagem de ZREQ	35%		0.59	76.45%		0.43%

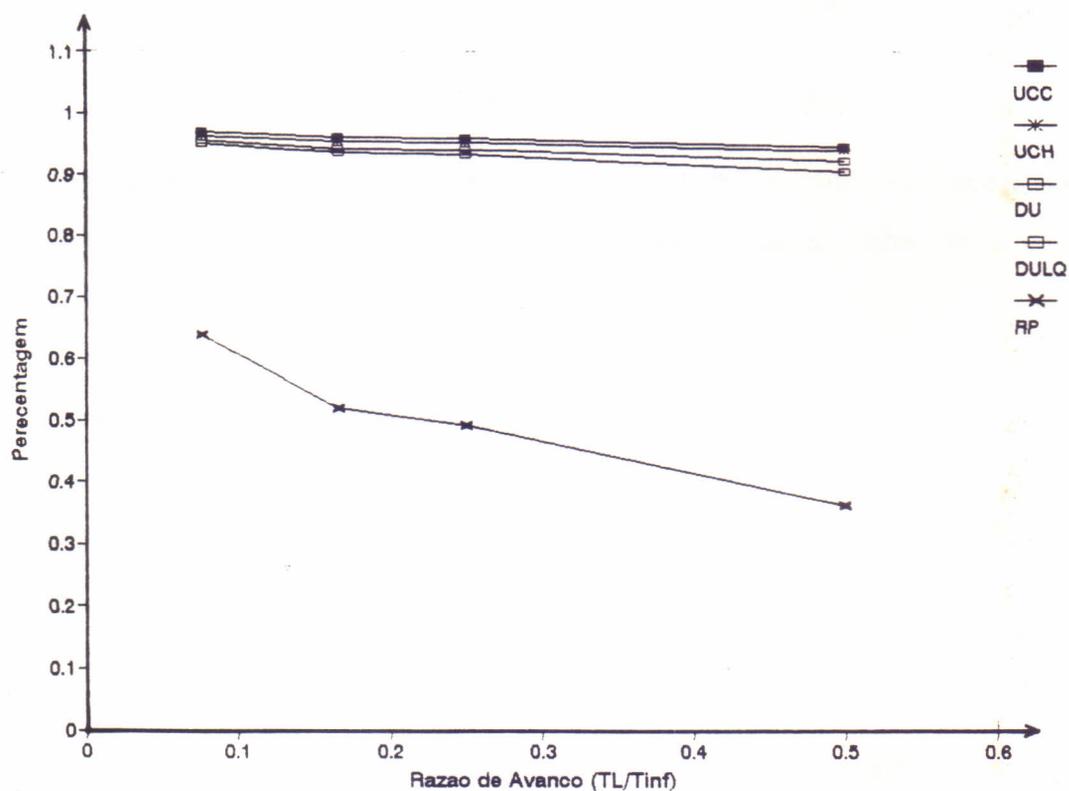


FIGURA 9 - Gráfico razão de avanço VS. parâmetros de uniformidade (UCC, UCH, DU e DULQ) e fração de escoamento superficial (RP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33  $\text{t/s}$ , e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

TABELA 18 - Parâmetros de uniformidade para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33  $\mu$ /s, lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço de 1/2, 1/54, 1/6 e 1/13.

Razão de Avanço	UCC	UCH	DU	DULQ	RP
$T_I/T_{INF}$	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	%
1/2	0.946	0.939	0.905	0.921	0.364
1/5	0.959	0.953	0.932	0.942	0.493
1/6	0.961	0.955	0.936	0.944	0.520
1/13	0.970	0.964	0.951	0.957	0.639

estas variações, onde os parâmetros UCC, UCH e DU aparecem bem concentrados na parte superior do gráfico, enquanto a linha de run-off aparece em declínio na parte inferior.

#### 4.1.4 Parâmetros de Eficiência

##### a) Vazão Inicial Constante

Os parâmetros de eficiência de irrigação são apresentados na TABELA 19, extraídos também da TABELA 15. A partir desta Tabela foram elaborados as Figuras 10, 11 e 12, que apresentam os gráficos Razão de Avanço x Eficiência de Irrigação (IE), Eficiência de Armazenamento (SE) e Percentagem de Área Total Adequadamente Irrigada, respectivamente.

Os resultados apresentados na TABELA 19 indicam que há uma variação linear ascendente na eficiência de irrigação nas hipóteses de lâmina requerida (ZREQ), lâmina requerida igual à lâmina mínima (ZMIN) e lâmina requerida igual à lâmina do menor quartil (ZLQ) quando se aumenta a razão de avanço de 1/13 para 1/2; esta variação é de 10,29 pontos percentuais para a primeira hipótese, 8,79 para a segunda e 9,09 para a terceira. O menor valor foi apresentado para a hipótese de ZREQ = ZMIN e razão de avanço 1/13. O maior valor foi apresentados para a hipótese de lâmina requerida ZREQ e razão de avanço 1/2. A FIGURA 10 ilustra estas tendências apresentando na curva superior a primeira hipótese, na curva intermediária a segunda hipótese e na

TABELA 19 - Parâmetros de eficiência para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante, igual 1,33  $\text{m}^3/\text{s}$ , lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço DE 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13.

Razão de Avanço	IE			SE			AAP			
	$T_I/T_{INF}$	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ
1/2	0.461	0.4315	0.4365	0.1210	1.0000	0.9989	0.0000	1.0000	1.0000	0.8660
1/4	0.3621	0.3426	0.3456	0.1573	1.0000	0.9992	0.0000	1.0000	1.0000	0.8660
1/6	0.3076	0.2934	0.2956	0.1871	1.0000	0.9953	0.0000	1.0000	1.0000	0.8660
1/13	0.2197	0.2119	0.2132	0.2677	1.0000	0.9995	0.0000	1.0000	1.0000	0.8660

curva inferior a terceira. Para as três hipóteses anteriores, a eficiência de armazenamento mostra-se praticamente constante para a hipótese de  $ZREQ = ZLQ$ , com os valores oscilando entre 99,89% para razão de avanço 1/13, sofrendo uma queda na razão de avanço 1/6, quando o valor apresentado foi de 99,53%. Não há variação alguma para  $ZREQ = ZMIN$ , em que todas as razões de avanço apresentam o valor de 100%, sendo portanto constante. Para a lâmina requerida, no entanto, a variação é decrescente com o aumento da razão de avanço, apresentando o valor máximo de 23,55% para razão de avanço 1/13 e o valor mínimo de 12,10% para a razão de avanço 1/2. A FIGURA 11 ilustra estas observações, apresentando as curvas de  $ZREQ = ZMIN$  e  $ZREQ = ZLQ$  praticamente coincidentes na parte superior e a curva da eficiência de armazenamento, para a hipótese de lâmina requerida, descendente na parte inferior do gráfico. A percentagem total de área total adequadamente irrigada (AAP) é constante para as três hipóteses acima citadas apresentando os valores de 0%, para a lâmina requerida, 100% para  $ZREQ = ZMIN$  e 86,60 para  $ZREQ = ZLQ$ , com uma pequena variação na razão de avanço 1/13, que apresentou o resultado de 85,90%, conforme mostra a FIGURA 12.

#### b) Redução de Vazão quando $T = T_L$

Os parâmetros de eficiência de irrigação com redução de vazão quando  $T = T_L$  foram reunidos na TABELA 20, extraídos também da TABELA 17. As FIGURAS 13, 14 e 15 apresentam os gráficos razão de avanço vs. eficiência

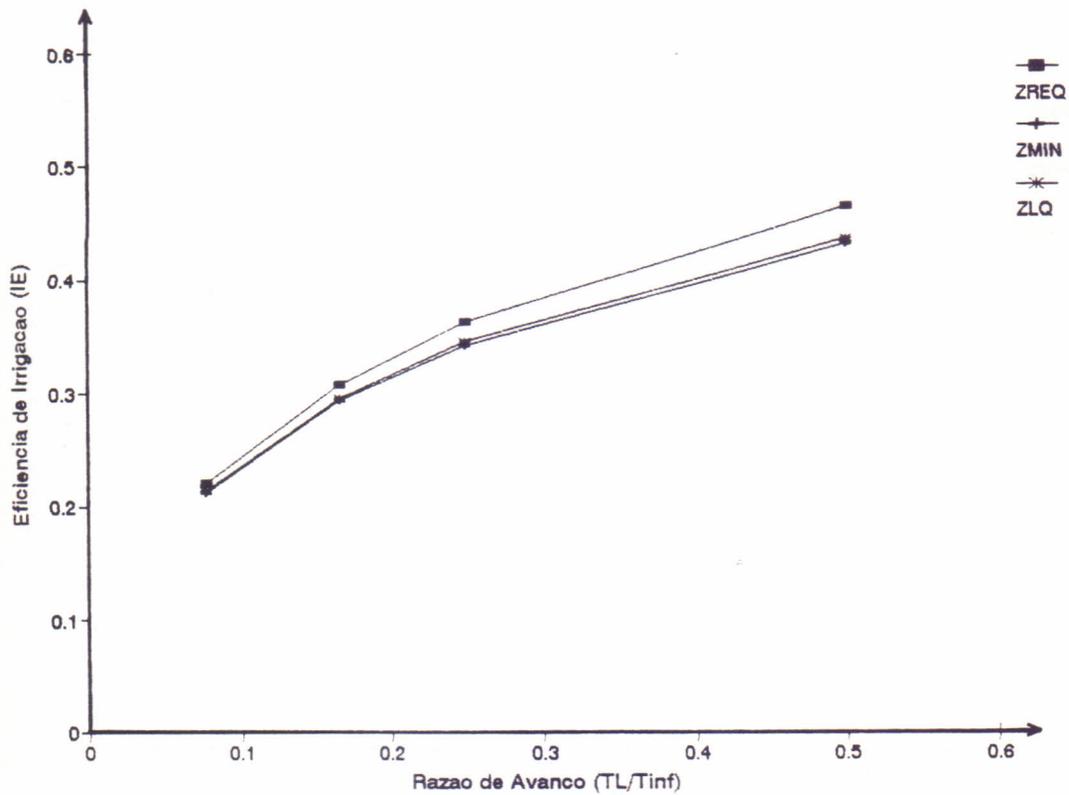


FIGURA 10 - Gráfico razão de avanço vs. eficiência de irrigação (IE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33  $l/s$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

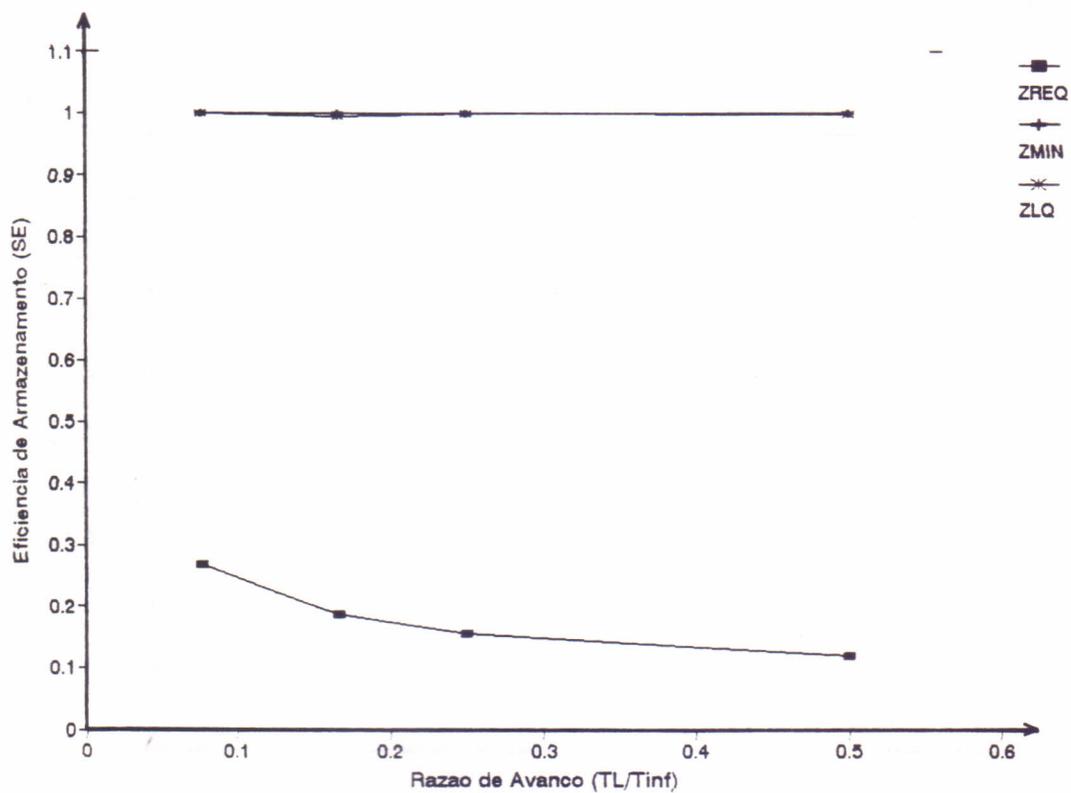


FIGURA 11 - Gráfico razão de avanço vs. eficiência de armazenamento (SE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33  $\ell/s$  razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

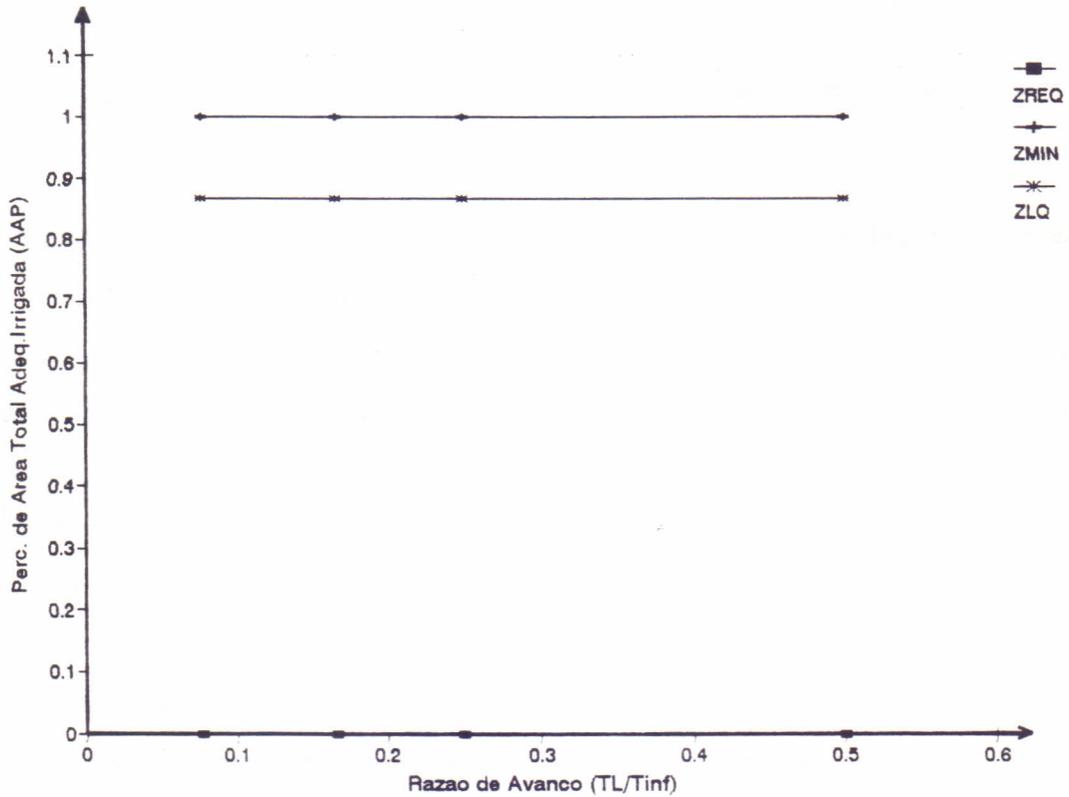


FIGURA 12 - Gráfico razão de avanço vs. percentagem de área adequadamente irrigada (AAP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante de 1,33  $\text{m}^3/\text{s}$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

TABELA 20 - Parâmetros de eficiência para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - igual a 1,33  $\ell/s$ , lâmina requerida (ZREQ) 13,62 cm e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13

Razão de Avanço $T_I/T_{INF}$	IE			SE			AAP		
	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ
1/2	0.6365	0.5762	0.5854	0.1103	1.0000	0.9985	0.0000	1.0000	0.8660
1/4	0.5070	0.4728	0.4770	0.1546	1.0000	0.9991	0.0000	1.0000	0.8970
1/6	0.4804	0.4495	0.4532	0.1665	1.0000	0.9992	0.0000	1.0000	0.8590
1/13	0.3612	0.3436	0.3456	0.2355	1.0000	0.9994	0.0000	1.0000	0.8590

de irrigação (IE), eficiência de armazenamento (SE) e percentagem de área total adequadamente irrigada, respectivamente.

Os resultados apresentados na TABELA 20 indicam que há uma variação linear ascendente na eficiência de irrigação nas hipóteses de lâmina requerida (ZREQ), lâmina requerida igual à lâmina mínima (ZMIN) e lâmina requerida igual à lâmina do menor quartil (ZLQ) quando se aumenta a razão de avanço de 1/13 para 1/2, e esta variação é de 10,29 pontos percentuais para a primeira hipótese, 8,79 para a segunda e 9,09 para a terceira. O menor valor foi apresentado para a hipótese de ZREQ = ZMIN e razão de avanço 1/13. O maior valor foi apresentado para a hipótese de lâmina requerida ZREQ e razão de avanço 1/2. A FIGURA 13 ilustra estas tendências apresentando na curva superior a primeira hipótese, na curva intermediária a segunda hipótese e curva inferior a terceira. Para as três hipóteses anteriores, a eficiência de armazenamento mostra-se praticamente constante para a hipótese de ZREQ = ZLQ, com os valores oscilando entre 99,89% para razão de avanço 1/13, sofrendo uma queda na razão de avanço 1/6, quando o valor apresentado foi de 99,53%. Não há variação alguma para ZREQ = ZMIN, que para todas as razões de avanço apresenta o valor de 100%, sendo portanto constante. Para a lâmina requerida, no entanto, a variação é decrescente com o aumento da razão de avanço apresentando o valor máximo de 23,55% para razão de avanço 1/13 e o valor mínimo de 12,10% para a razão de avanço 1/2. A FIGURA 14 ilustra

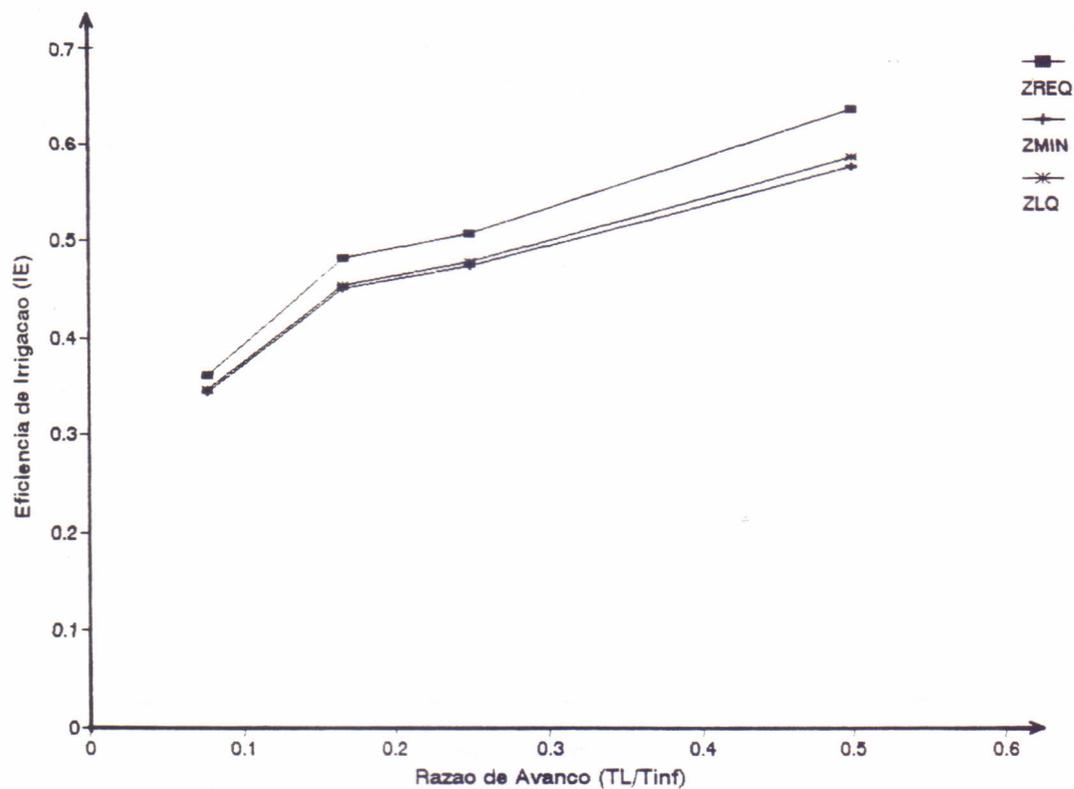


FIGURA 13 - Gráfico razão de avanço vs. eficiência de irrigação (IE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33  $\ell/s$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

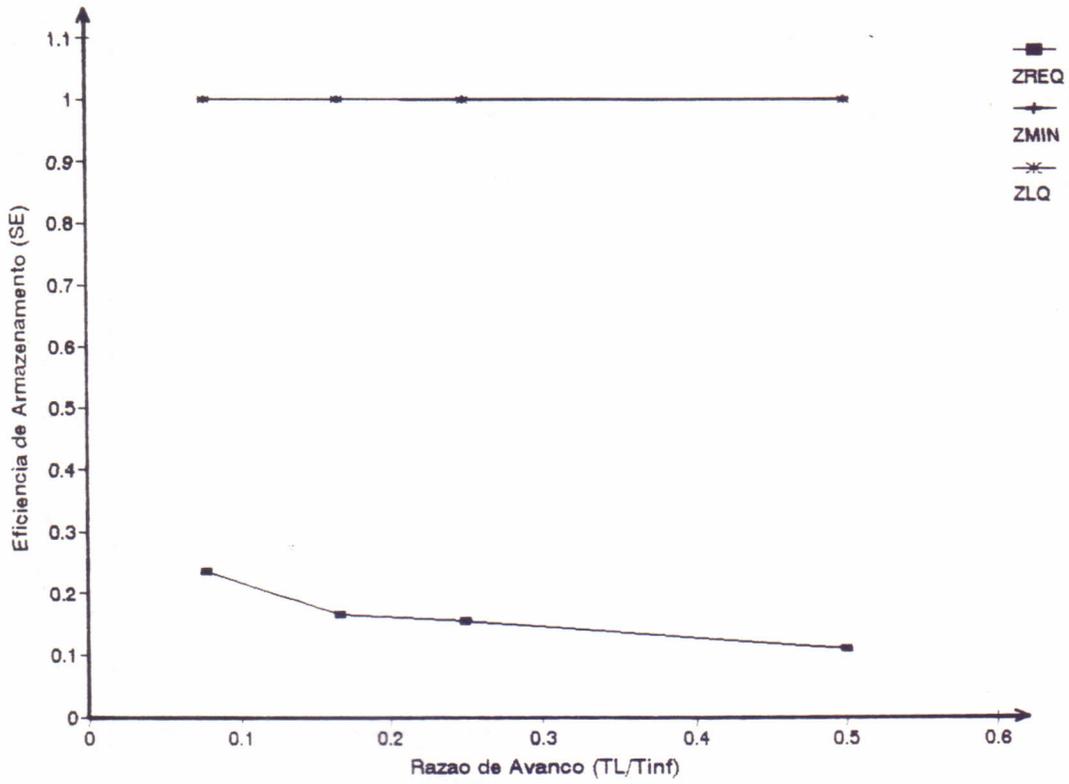


FIGURA 14 - Gráfico razão de avanço vs. eficiência de Armazenamento (SE) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33  $\text{m}^3/\text{s}$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

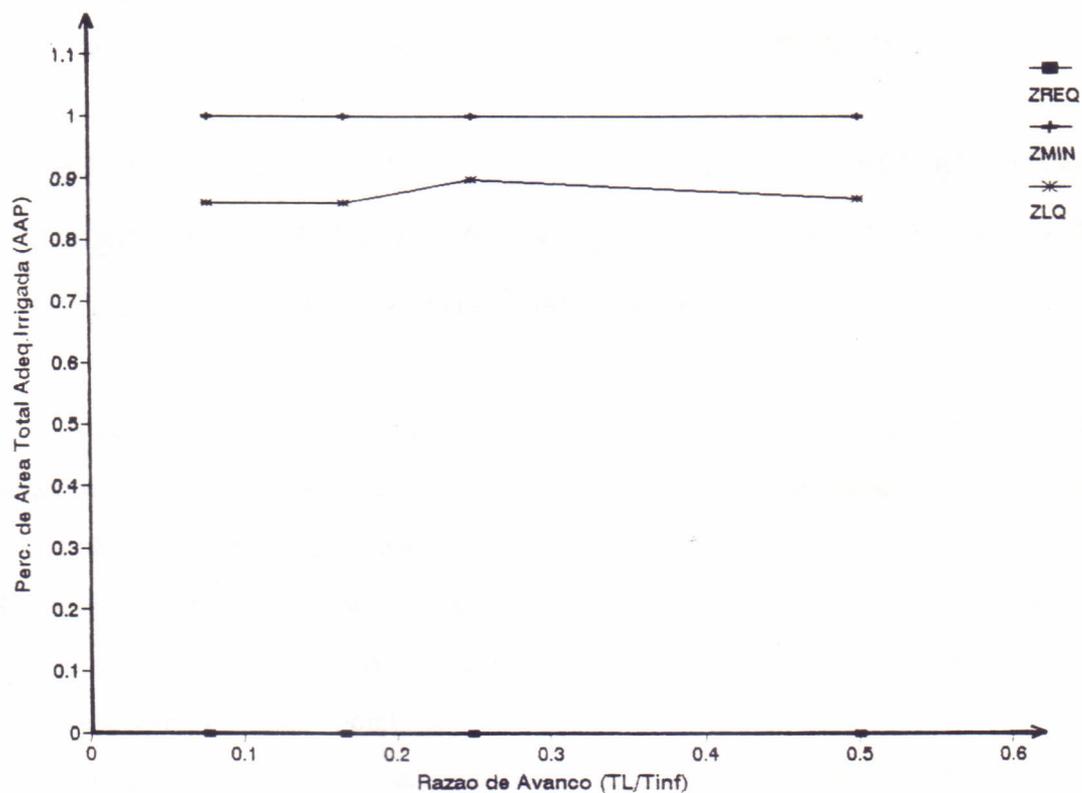


FIGURA 15 - Gráfico razão de avanço vs. percentagem de área adequadamente irrigada (AAP) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à metade ao final da fase de avanço - de 1,33  $\ell/s$  e razões de avanço de 1/2, 1/4, 1/6 e 1/13 para dados de RAMSEY (1976)

estas observações, apresentando as curvas de  $ZREQ = ZMIN$  e  $ZREQ = ZLQ$  praticamente coincidentes na parte superior e a curva da eficiência de armazenamento para a hipótese de lâmina requerida descendente na parte inferior do gráfico. A percentagem total de área total adequadamente irrigada (AAP) é constante para as três hipóteses acima citadas apresentando os valores de 0%, para a lâmina requerida, 100% para  $ZREQ = ZMIN$  e 86,60 para  $ZREQ = ZLQ$ , com uma pequena variação na razão de avanço 1/13, que apresentou o resultado de 85,90%, conforme mostra a FIGURA 15.

#### **4.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS SIMULAÇÕES FEITAS PARA DADOS DE RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) E ELLIOTT et alli (1980) COM O PROGRAMA SRFR**

No segundo capítulo deste trabalho fez-se referência ao dimensionamento da irrigação por sulcos, que tem com metodologias correntes a utilização de parâmetros empíricos testados em campo ou o emprego de análises hidrodinâmicas sofisticadas, como o modelo SRFR. Os sistemas de irrigação superficial são caracterizados, no entanto, por apresentarem uma interface mecânica, como bombas, tubulações e registros, e outra interface natural, representada pelos componentes solo, cultura e clima. Por conta destas características, não se pode esperar um modelo, empírico ou hidrodinâmico, que simule exatamente o que ocorre no campo.

No item anterior, quando se discutiu os resultados simulados pelo modelo SRFR para os dados de RAMSEY (1976), concluiu-se que o modelo simula bem o avanço, a recessão e mesmo a infiltração da frente de irrigação. As mesmas análises empreendidas para RAMSEY (1976) foram feitas para os dados de SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT et alli (Fazendas Stieben e Benson, 1980). Estes resultados foram agrupados em função do comprimento do sulco: o primeiro grupo abrange os dados de RAMSEY (1976) e SOUZA et alli (1987), classificados como sulcos curtos (sulcos cujos comprimentos são menores que cem metros), enquanto que o segundo grupo abrange os dados de ELLIOTT

(1980) para as fazendas Stieben e Benson, classificados como sulcos longos (comprimentos superiores a cem metros). Estes dados são apresentados na TABELA 21.

TABELA 21 - Dados de entrada para simulação da irrigação por sulcos para RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT et alli (Fazendas Stieben e Benson, 1980).

DADOS	SIMBOLO E UNIDADE	SULCOS CURTOS		SULCOS LONGOS ELLIOTT et alli (1980)	
		RAMSEY	SOUZA	STIEBEN	BENSON
Vazão	Q (l/s)	1,33	1,00	0,59	1,61
Declividade	S <sub>0</sub> (m/m)	0,001032	0,0030	0,0098	0,0045
Comprimento	L (m)	100	100	350	625
Tempo de Cut-off	T <sub>Co</sub> (min)	208	156	696	698
Constante de Infiltração	K (cm/h <sup>2</sup> )	7,59	2,18	0,29	2,36
Constante a	a (adimensional)	0,5000	0,534	0,8700	0,4498
Constante n de Manning	n (adimensional)	0,022	0,040	0,150	0,250
Espessura entre sulcos	E (m)	1,0	1,0	1,12	1,54
Constante C	C (cm <sup>1-4</sup> )	1,091	10,25	15,5	16,47
Constante M	M (adimensional)	0,4539	0,691	0,544	0,4498

Do quadro conjuntos de dados testados neste trabalho foram empregados em situações de pesquisa diferentes, o que dificulta de alguma forma a comparação dos resultados. A divisão em grupos de comprimentos semelhantes procura dar unidade de análise aos resultados, muito embora deva ser reconhecida a complexibilidade de um sistema de irrigação superficial, onde todas as variações são interdependentes. É difícil fixar ou modificar apenas uma variável e modificar ou fixar as demais. Como foi dito anteriormente, as decisões a tomar por ocasião do dimensionamento da irrigação por sulcos estão relacionadas à vazão do sulco (Q<sub>0</sub>), ao comprimento do sulco (L), ao tempo de irrigação (T<sub>Co</sub>), à declividade do sulco (S<sub>0</sub>) e ao grau de automatização do sistema.

A seguir são discutidos os resultados obtidos nas simulações feitas a partir dos quatro conjuntos de dados, tomando-se como referência de comparação a performance alcançada nos parâmetros de eficiência e

uniformidade para as hipóteses examinadas: vazão inicial constante e vazão reduzida à metade quando  $T = T_b$ , para quatro diferentes razões de avanço, o que significa dizer que foram testados também oito tempos de irrigação ( $T_{cd}$ ) diferentes para cada conjunto de dados. Manteve-se constante a declividade ( $S_0$ ) e o comprimento do sulco ( $L$ ).

#### 4.2.1 Vazão Inicial Constante

Nas TABELAS 22, 23 e 24 são apresentados os resultados obtidos e listados no relatório "Sinopse dos resultados da irrigação", fornecido pelo SRFR para os dados de SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT (1980) para vazão inicial constante e quatro diferentes razões de avanço. Estas tabelas são idênticas, em forma, à TABELA 15, referente aos dados de RAMSEY (1976), apresentada anteriormente no item 4.1.3.

##### a) Parâmetros de Uniformidade e Fração de Escoamento Superficial

Para melhor visualização dos resultados obtidos para os parâmetros de uniformidade (UCC, UCH, DU e DULQ) e fração de escoamento superficial (RP), foi construída a TABELA 25, que apresenta os resultados alcançados para os quatro conjuntos de dados testados e listados nas TABELAS 15, 22, 23 e 24.

Uma análise mais detida da TABELA 25 aponta para a mesma conclusão obtida para os dados de RAMSEY e discutidos anteriormente: não há variações significativas entre os parâmetros de uniformidade de um mesmo grupo de dados quando se varia a razão de avanço, enquanto que a variação da fração de escoamento superficial apresenta variação entre 9% e 25% para sulcos curtos e entre 2% e 13% para sulcos longos, sendo que, tanto para sulcos curtos como para sulcos longos, os menores valores de escoamento superficial foram verificados para as maiores razões de avanço (1/2 e 1/1.53). Segundo JAMES (1988), os parâmetros de uniformidade descrevem como um sistema de irrigação distribue a água sobre o campo. No que se refere a uniformidade de aplicação (UCC), a uniformidade de 100% significa que todo o

TABELA 22 - Sinopse dos resultados de SOUZA et alli (1987) para vazão inicial (Q<sub>0</sub>) constante igual a 1/2, 1/4, 1/6 e 1/11

PARAMETROS		ANÇO					
		1/6		1/11			
		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO							
TCO	Tempo de irrigação	97.96		156.00			
TL	Tempo de avanço	13.98		13.98			
TR	Tempo de recessão (a montante)	103.75		159.67			
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	161.94		219.40			
TE	Tempo de depleção	161.94		219.40			
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)			
VQJ HID	Volume aplicado	5.88		9.36			
VBX FI.W	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0.00		0.00			
VQ	Volume líquido de entrada	5.88		9.36			
VZ	Volume infiltrado	0.81		1.04			
VRO	Volume de Run-Off	5.07		8.32			
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)			
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4.61		4.61			
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0.00		0.00			
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4.61		4.61			
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0.00		0.00			
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	29.48		29.49			
D) LÂMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	0.72	12.3	0.92	9.8		
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	0.83	14.1	1.07	11.4		
ZLQ	Lâmina de infiltração média no meio	0.80	13.6	1.02	10.9		
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	4.80	81.7	4.80	51.3		
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
Z Q	Lâmina Média Aplicada	5.88	100.0	9.36	100.0		
Z AVG	Lâmina Infiltrada Média	0.81	13.8	1.04	11.1		
RQ	Lâmina Média de Run-Off	5.07	86.2	8.32	88.9		
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.00	0.0	0.00	0.0		
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.09	1.5	0.12	1.3		
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.02	0.3	0.02	0.2		
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZREQ	0.81	13.8	1.04	11.1		
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZMIN	0.72	12.3	0.92	9.8		
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZLQ	0.80	13.5	1.02	10.9		
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional			
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Coeficiente	0.990		0.990			
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0.968		0.965			
DU	Uniformidade de Distribuição	0.892		0.883			
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do LQ	0.982		0.981			
RP	Fração de Run-off em Percentagem	86.18%		88.69%			
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada na ZREQ dada	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada na ZREQ dada	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	13.62%	12.32%	13.55%	11.11%	9.81%	10.89%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	1.000	0.891	0.980	1.000	0.883	0.979
SE	Eficiência de Armazenamento	16.92%	100.00%	99.81%	21.67%	100.00%	99.80%
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente Irrigada	0.00%	100.00%	92.48%	0.00	100.00%	94.21%
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Percentagem de ZREQ	33.08%		2.48	78.33%		3.45%

TABELA 23 - Sinopse dos resultados (Fazenda Stieben, 1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) constante avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/6.1

PARAMETROS		AVANÇO				
		1/6		1/11		
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		
TCO	Tempo de irrigação	687.47		696.00		
TI	Tempo de avanço	98.41		98.21		
TR	Tempo de recessão (a montante)	798.02		806.55		
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	1067.44		1075.97		
TF	Tempo de depleção	1067.44		1075.97		
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)		
VQI HID	Volume aplicado	21.73		22.00		
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0.00		0.00		
VQ	Volume líquido de entrada	21.73		22.00		
VZ	Volume infiltrado	2.78		2.81		
VRO	Volume de Run-Off	19.01		19.25		
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)		
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4.33		4.33		
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	4.44		4.44		
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4.44		4.44		
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	350.00		350.00		
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	35.03		35.03		
D) LÂMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	0.76	12.2	0.76	12.2	
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	0.81	13.0	0.82	13.0	
ZI-Q	Lâmina de infiltração média no momento	0.77	12.5	0.78	12.5	
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	2.43	39.1	2.43	38.7	
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	
ZQ	Lâmina Média Aplicada	6.21	100.0	6.29	100.0	
ZAVG	Lâmina Infiltrada Média	0.79	12.8	0.80	12.8	
RQ	Lâmina Média de Run-Off	5.43	87.5	5.50	87.5	
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.00	0.0	0.00	0.0	
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.04	0.6	0.04	0.6	
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.02	0.3	0.02	0.3	
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZREQ	0.79	12.8	0.80	12.8	
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZMIN	0.76	12.2	0.76	12.2	
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZLQ	0.77	12.5	0.78	12.4	
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional		
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Crh	0.986		0.986		
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0.981		0.982		
DU	Uniformidade de Distribuição	0.951		0.952		
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Momento	0.975		0.975		
RP	Fração de Run-off em Percentagem	87.46%		87.49%		
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	80%	12,18%	12.46%	12.77%	12.44%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	0.00	0.951	0.974	1.00	0.952
SF	Eficiência de Armazenamento	70%	100.00%	99.87%	33.03%	100.00%
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente Irrigada	100%	100.00%	86.65%	0.00	100.00%
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio	0.30%	-	0.97	66.97%	-
	Irrigada, em Percentagem de ZREQ					0.95%

TABELA 24 - Sinopse dos resultados et alli (Fazenda Benson, 1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) condições de avanço 1/1.53, 1/2, 1/4 e 1/6

PARÂMETROS		AVANÇO					
		1/4		1/6			
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
TCO	Tempo de irrigação	1.375,25		1.925,35			
TL	Tempo de avanço	275,05		275,05			
TR	Tempo de recessão (a montante)	1.387,17		1.933,53			
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	2.184,64		2.770,29			
TE	Tempo de depleção	2.184,64		2.770,29			
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)			
VQI HID	Volume aplicado	86,15		120,62			
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0,00		0,00			
VQ	Volume líquido de entrada	86,15		120,62			
VZ	Volume infiltrado	17,36		20,14			
VRO	Volume de Run-Off	68,80		100,48			
C) LAMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)			
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	10,52		10,52			
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0,00		0,00			
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	10,52		10,52			
YPMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0,00		0,00			
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	47,47		47,48			
D) LAMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	2,70	19,6	3,14	16,3		
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	2,95	21,4	3,32	17,2		
ZIQ	Lâmina de infiltração média no momento	2,73	19,8	3,17	16,4		
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	5,58	40,5	5,58	28,9		
E) LAMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZQ	Lâmina Média Aplicada	13,78	100,00	19,30	100,00		
ZAVG	Lâmina Infiltrada Média	2,78	20,10	3,22	16,70		
RQ	Lâmina Média de Run-Off	11,01	77,90	16,08	83,30		
ZDP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZREQ	0,00	0,00	0,00	0,00		
ZDP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZUN	0,08	0,60	0,08	0,40		
ZDP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZLQ	0,05	0,40	0,05	0,30		
ZU ZREQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZREQ	2,78	20,10	3,22	16,70		
ZU ZMIN	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZMIN	2,70	19,60	3,14	16,30		
ZU ZIQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZIQ	2,73	19,8	3,17	16,40		
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional			
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Coeficiente	0,988		0,989			
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0,982		0,985			
DU	Uniformidade de Distribuição	0,973		0,975			
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Momento	0,982		0,984			
RP	Fração de Run-off em Percentagem	79,86		83,31			
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ = ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	15	19,60	19,78	16,70	16,28	16,42
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	10	0,973	0,982	1,00	0,975	0,983
SE	Eficiência de Armazenamento	77	100,00	99,96	57,74	100,00	99,97
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente	10	100,00	89,70	0,00	100,00	89,88
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Percentagem de ZREQ	23	-	0,34	42,26	-	0,31

TABELA 25 - Parâmetros de uniformidade e fração de escoamento superficial em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos (RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos (ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial constante

EXPERIMENTO	RAZÃO DE AVANÇO	UCC ADIMENSIONAL	UCH ADIMENSIONAL	DU ADIMENSIONAL	DULQ ADIMENSIONAL	RP ADIMENSIONAL
RAMSEY	1/2	0.960	0.954	0.930	0.942	0.536
	1/4	0.969	0.963	0.946	0.955	0.638
	1/6	0.973	0.968	0.954	0.962	0.692
	1/13	0.979	0.975	0.965	0.971	0.780
(SOUZA, 1985)	1/2	0.993	0.974	0.912	0.986	0.7922
	1/4	0.991	0.969	0.898	0.983	0.8378
	1/6	0.990	0.968	0.892	0.982	0.8616
	1/11	0.990	0.965	0.883	0.981	0.8889
FAZENDA STIEBEN (ELLYOTT, 1990)	1/2	0.966	0.955	0.885	0.939	0.8503
	1/4	0.980	0.973	0.930	0.963	0.8663
	1/6	0.986	0.981	0.951	0.975	0.8746
	1/7	0.986	0.982	0.952	0.975	0.8749
FAZENDA BENSON (ELLYOTT, 1990)	1/1,53	0.985	0.981	0.965	0.977	0.7051
	1/2	0.986	0.982	0.966	0.979	0.7317
	1/4	0.988	0.982	0.973	0.982	0.7986
	1/6	0.989	0.985	0.975	0.984	0.8331

campo recebeu a mesma lâmina de água. Valores menores que 100% indicam que algumas áreas receberam mais água que outras. Com relação à lâmina de infiltração, para que seja a mesma em todo o sulco e para que as uniformidades sejam elevadas, o tempo de oportunidade de infiltração deve ser o mesmo em todo o campo. As maiores uniformidades são esperadas para campos com grandes declividades, baixa rugosidade hidráulica, baixa capacidade de infiltração do solo e/ou quando são usadas grandes vazões. Na irrigação por sulcos, para se atingir valores de uniformidade próximos de 100%, é preciso que o perímetro molhado seja constante ao longo do sulco. Segundo JAMES (1988) isto é quase impossível, uma vez que o perímetro molhado depende da vazão, que diminui ao longo do sulco, uma vez que a água é absorvida pelo sulco.

## b) Parâmetros de Eficiência

A TABELA 26 agrupa os resultados obtidos para os parâmetros de eficiência de irrigação (IE), eficiência de armazenamento (SE) e percentagem de área total adequadamente irrigada (AAP) para os dados de RAMSEY (1976), SOUZA et alli (1987) e ELLIOTT (1980), extraídos das TABELAS 15, 22, 23 e 24, em função das lâminas requeridas (ZREQ), lâminas mínimas de infiltração (ZMIN) e lâmina média no menor quartil (ZLQ). Para cada conjunto de dados foram testadas quatro diferentes razões de avanço na hipótese de vazão inicial constante.

Ao contrário da performance dos parâmetros de uniformidade, os resultados verificados para a eficiência de irrigação (IE) variam substancialmente, nos quatro casos estudados em função da razão de avanço e mesmo entre sulcos com comprimentos semelhantes.

No caso de sulcos curtos por exemplo, a eficiência de irrigação para a lâmina média no menor quartil (ZLQ) varia entre 21,32%, na razão de avanço de 1/13, e 43,65%, na razão de avanço 1/2; enquanto que os dados de SOUZA et alli (1987) apresentam uma variação idêntica (vinte pontos percentuais de amplitude), mas com valores absolutos menores (10,88%) para razão de avanço 1/11 e 20,46% para razão de avanço 1/2). No caso de sulcos longos a variação interna é menor para os dados da Fazenda Stieben (L = 350m), que apresentou valores entre 12,44% (razão de avanço 1/7) e 14,59 (razão de avanço 1/2), mas estes valores tomados como absolutos, são muito baixos se comparados com os recomendados na literatura. A variação não é significativa quando se compara a eficiência de irrigação entre as três lâminas examinadas.

Quanto à eficiência de armazenamento (SE), o comportamento dos resultados é o seguinte: os valores obtidos para as lâminas de infiltração médias no menor quartil (ZLQ) não têm variação significativa, enquanto que foi verificado um valor constante (SE = 100%) para a lâmina mínima de infiltração. A eficiência de armazenamento para a lâmina requerida de infiltração varia inversamente quando relacionado com a eficiência de irrigação. No caso de SOUZA et alli (1987), por exemplo, a variação interna é da ordem de 11%:

TABELA 26 - Parâmetros de eficiência em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos (RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos (ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial constante.

EXPERIMENTO	RAZÃO DE AVANÇO	IE			SE			AAP		
		ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ
RAMSEY (I. = 100m)	1/2	46,10	43,15	43,65	12,10	100,00	99,89	0,00	100,00	86,60
	1/4	36,21	34,26	34,56	15,73	100,00	99,92	0,00	100,00	86,60
	1/6	30,76	29,34	29,56	18,71	100,00	99,53	0,00	100,00	86,60
	1/13	21,97	21,19	21,32	26,77	100,00	99,95	0,00	100,00	86,60
SOUZA	1/2	20,78	18,95	20,46	10,89	100,00	99,84	0,00	100,00	92,48
	1/4	16,22	14,56	15,92	14,17	100,00	99,82	0,00	100,00	92,48
	1/6	13,82	12,32	13,55	16,92	100,00	99,81	0,00	100,00	92,48
	1/11	11,11	9,81	10,88	21,67	100,00	99,80	0,00	100,00	94,21
STIEBEN	1/2	15,59	13,80	14,59	17,07	100,00	99,70	0,00	100,00	86,65
	1/4	13,74	12,78	13,21	25,08	100,00	99,82	0,00	100,00	86,65
	1/6	12,80	12,18	12,46	32,70	100,00	99,87	0,00	100,00	86,65
	1/7	12,77	12,15	12,44	33,03	100,00	99,87	0,00	100,00	86,65
BENSON	1/1.5	29,49	28,46	28,81	36,98	100,00	99,40	0,00	100,00	82,74
	1/2	26,83	25,93	26,26	39,77	100,00	99,95	0,00	100,00	90,38
	1/4	20,15	19,60	19,78	49,77	100,00	99,96	0,00	100,00	89,70
	1/6	16,70	16,28	16,42	57,74	100,00	99,97	0,00	100,00	89,88

10,89% para razão de avanço 1/2 e 21,67% para razão de avanço 1/11, crescendo, portanto, com a diminuição da razão de avanço. O mesmo comportamento é verificado tanto para sulcos longos como para sulcos curtos.

Quanto à percentagem de área total adequadamente irrigada (AAP), os valores para a lâmina requerida de infiltração (ZREQ) e lâmina mínima de infiltração (ZMIN) são constantes e equivalentes a zero e cem, respectivamente. Os valores para a lâmina de infiltração média no menor quartil não variam significativamente internamente ou mesmo para sulcos curtos e longos, tendo sido obtidos os valores de 82,74% para a Fazenda Benson (ELLIOTT et alli 1980) e 94,21% para SOUZA et alli (1987), sendo, portanto, menores para sulcos longos.

Segundo JAMES (1988), a máxima eficiência de irrigação (IE) ocorre quando a fração útil do volume infiltrado (ZU) é igual ao volume total de água aplicado (ZQ). A eficiência de irrigação (IE) raramente atinge 100%, a menos

que o campo seja demasiadamente subirrigado e desde que seja diminuída as perdas no final do sulco ou que a água percole antes de chegar à jusante da parcela. A quantidade de escoamento superficial (RP) e percolação profunda dependem da relação entre o tempo de avanço ( $T_D$ ) e o tempo de infiltração ( $T_{INF}$ ). A razão de avanço ( $T_D/T_{INF}$ ) pode ser modificada pela alteração do tempo de avanço ( $T_D$ ) ou da lâmina de aplicação de água e por consequência o tempo de infiltração ( $T_{INF}$ ). O tempo de avanço ( $T_D$ ) cresce quando: (1) diminui a vazão ( $Q_0$ ); (2) o comprimento ( $L$ ) do sulco é aumentado; (3) cresce a rugosidade; (4) a declividade ( $S_0$ ) é diminuída e ou (5) quando a capacidade de infiltração do solo é diminuída. Segundo JAMES (1988), há um conflito na obtenção da máxima uniformidade e eficiência quando a vazão é mantida constante. Pequenos tempos de avanço ( $T_D$ ) resulta em uniformidades relativamente altas e baixas eficiências. O contrário ocorre para grandes tempos de avanço: obtém-se altas eficiências de irrigação e baixas uniformidades. Estes dados obtidos para os quatro conjuntos de dados indicam que os projetos podem ter sido dimensionados de forma pouco eficiente. Algum parâmetro físico, referente à forma do sulco ou rugosidade, pode ter sido mau estimado ou mesmo a vazão pode ter sido excessiva. De uma forma geral a eficiência de irrigação e armazenamento estão abaixo dos valores recomendados. Isto fica patente quando se toma como referência os índices de escoamento superficial, que apresentaram valores superiores a 50% em todos os casos, muito embora a performance dos parâmetros de distribuição tenha sido satisfatória. A hipótese do excesso de vazão é plausível quando se compara estes resultados com os resultados para vazão inicial reduzida à metade descritos a seguir.

#### 4.2.2 Vazão Inicial Reduzida quando $T = T_D$

A exemplo do que foi feito para a vazão inicial constante, são apresentados nas TABELAS 27, 28 e 29 a "Sinopse dos resultados da irrigação" fornecido pelo SRFR para a hipótese de vazão inicial reduzida quando  $T = T_D$ , para quatro diferentes razões de avanço.

TABELA 27 - Sinopse dos resultados et alli (1987) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - reduzida à meta (ZREQ) 4,80 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6 e 1/11

PARÂMETROS		A N Ç O					
		1/6		1/11			
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
TCO	Tempo de irrigação	97,96		156,00			
TL	Tempo de avanço	13,98		13,98			
TR	Tempo de recessão (a montante)	103,28		160,02			
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	155,96		219,04			
TE	Tempo de depleção	155,96		219,04			
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )			
VQI HD	Volume aplicado	3,35		5,10			
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0,00		0,00			
VQ	Volume líquido de entrada	3,35		5,10			
VZ	Volume infiltrado	0,71		0,89			
VRO	Volume de Run-Off	2,64		4,21			
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)			
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4,61		4,61			
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0,00		0,00			
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4,61		4,61			
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0,00		0,00			
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	29,45		29,45			
D) LÂMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	0,64	19,1	0,80	15,7		
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	0,73	21,6	0,92	18,1		
ZLQ	Lâmina de infiltração média no meio	0,69	20,6	0,87	17,1		
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	4,80	143,3	4,80	94,1		
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
Z Q	Lâmina Média Aplicada	3,35	100,0	5,10	100,0		
Z AVG	Lâmina Infiltrada Média	0,71	21,1	0,89	17,5		
RQ	Lâmina Média de Run-Off	2,64	78,9	4,21	82,5		
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0,00	0,0	0,00	0,0		
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0,07	2,0	0,09	1,7		
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0,02	0,5	0,02	0,4		
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZREQ	0,71	21,1	0,89	17,5		
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZMIN	0,64	19,1	0,80	15,7		
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZLQ	0,69	20,6	0,87	17,0		
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional			
UCC	Coefficiente de Uniformidade de Coeficiente	0,986		0,986			
UCH	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0,969		0,968			
DU	Uniformidade de Distribuição	0,906		0,901			
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Meio	0,977		0,977			
RP	Fração de Run-off em Percentagem	78,91%		82,52%			
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZREQ dada	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ dada	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	1,09%	19,11%	20,58%	17,47%	15,74%	17,04%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	1,000	0,906	0,976	1,000	0,901	0,975
SE	Eficiência de Armazenamento	4,72%	100,00%	99,86%	18,57%	100,00%	99,85%
AAP	Perc. de Area Total Adequada	100,00%	100,00%	92,48%	0,00	100,00%	92,48%
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Percentagem de ZREQ	5,28%		1,85	81,43%	2,02%	

TABELA 28 - Sinopse dos resultados (Fazenda Stieben, 1980) para vazão inicial ( $Q_0$ ) - redução requerida (ZREQ) 2,43 cm e razões de avanço 1/2, 1/4, 1/6

PARÂMETROS		AVANÇO			
		1/6		1/6.1	
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)	
TCO	Tempo de irrigação	687.47		696.00	
TL	Tempo de avanço	98.21		98.21	
TR	Tempo de recessão (a montante)	794.10		801.80	
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	1033.20		1043.24	
TF	Tempo de depleção	1052.65		1062.54	
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )		SISTEMA MÉTRICO ( $m^3/m$ )	
VQI HID	Volume aplicado	12.42		12.54	
VBX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0.00		0.00	
VQ	Volume líquido de entrada	12.42		12.54	
VZ	Volume infiltrado	2.42		2.45	
VRO	Volume de Run-Off	10.05		10.13	
C) LAMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)	
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	4.33		4.33	
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	4.33		4.35	
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	4.42		4.35	
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	350.00		350.00	
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	34.91		34.62	
D) LAMINAS INFILTRADAS		STEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	0.67	18.9	0.68	18.9
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	0.71	19.9	0.71	19.9
ZLQ	Lâmina de infiltração média no menor	0.68	19.2	0.69	19.2
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	2.43	68.5	2.43	67.8
E) LAMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		STEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)
Z Q	Lâmina Média Aplicada	3.55	100.0	3.58	100.0
Z AVG	Lâmina Infiltrada Média	0.69	19.5	0.70	19.5
RQ	Lâmina Média de Run-Off	2.87	80.9	2.90	80.8
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.00	0.0	0.00	0.0
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.02	0.6	0.02	0.6
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média	0.01	0.4	0.01	0.4
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZREQ	0.69	19.5	0.70	19.5
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZMIN	0.67	18.9	0.68	18.9
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média $\leq$ ZLQ	0.68	19.1	0.69	19.1
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional	
UCC	Coefficiente de Uniformidade de Crh	0.990		0.991	
UCH	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0.987		0.987	
DU	Uniformidade de Distribuição	0.967		0.968	
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Menor	0.982		0.982	
RP	Fração de Run-off em Porcentagem	80.91%		80.82%	
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZREQ	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	52%	18.87%	19.51%	18.87%
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	0.00	0.967	0.981	0.981
SE	Eficiência de Armazenamento	49%	100.00%	99.89%	28.76%
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente	00%	100.00%	89.71%	0.00
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Porcentagem de ZREQ	51%	-	1.02	71.24%
					-
					1.01%

TABELA 29 -- Sinopse dos resultados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson, 1980) para vazão inicial (Q<sub>61</sub> l/s, lâmina requerida (ZREQ) 5,58 cm e razões de avanço 1

PARÂMETROS		AVANÇO					
		1/4		1/6			
		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
A) TEMPOS DE IRRIGAÇÃO		SISTEMA MÉTRICO (minutos)		SISTEMA MÉTRICO (minutos)			
TCO	Tempo de irrigação	1.375,25		1.925,35			
TL	Tempo de avanço	275,05		275,21			
TR	Tempo de recessão (a montante)	1.385,23		1.932,44			
TFR	Tempo de recessão (a jusante)	2.158,07		2.761,91			
TE	Tempo de depleção	2.158,07		2.761,91			
B) VOLUMES (Dados em Unidades de Comprimento)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)		SISTEMA MÉTRICO (m <sup>3</sup> /m)			
VQI HID	Volume aplicado	51,69		68,75			
VEX FLW	Volume de refluxo depois do "cut-off"	0,00		0,00			
VQ	Volume líquido de entrada	51,69		68,75			
VZ	Volume infiltrado	15,94		18,31			
VRO	Volume de Run-Off	35,75		50,44			
C) LÂMINAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)		SISTEMA MÉTRICO (cm)			
YMAX U	Lâmina Máxima a montante	10,52		10,52			
YMAX O	Lâmina Máxima a Jusante	0,00		0,00			
YMAX	Lâmina Máxima (ponto qualquer)	10,52		10,52			
YMAX	Ponto onde ocorreu a lâmina máxima	0,00		0,00			
WPMAX	Perímetro molhado máximo no sulco	47,46		47,46			
D) LÂMINAS INFILTRADAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
ZMIN	Lâmina mínima de infiltração	2,45	29,6	2,83	25,7		
ZMAX	Lâmina máxima de infiltração	2,74	33,1	3,05	27,7		
ZIQ	Lâmina de infiltração média no menor	2,48	30,0	2,86	26,0		
ZREQ	Lâmina requerida de infiltração	5,58	67,5	5,58	50,7		
E) LÂMINAS INFILTRADAS MÉDIAS		SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)	SISTEMA MÉTRICO (cm)	LÂMINA APLICADA (%)		
Z Q	Lâmina Média Aplicada	8,27	100,00	11,00	100,00		
Z AVG	Lâmina Infiltrada Média	2,55	30,80	2,93	26,60		
RQ	Lâmina Média de Run-Off	5,72	69,20	8,07	73,40		
Z DP ZREQ	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZREQ	0,00	0,00	0,00	0,00		
Z DP ZUN	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZUN	0,10	1,20	0,10	0,90		
Z DP ZLQ	Lâmina de Percolação Profunda Média ≤ ZLQ	0,07	0,90	0,07	0,70		
Z U ZREQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZREQ	2,55	30,80	2,93	26,60		
Z U ZMIN	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZMIN	2,45	29,60	2,83	25,70		
Z U ZLQ	Lâmina Infiltrada Média ≤ ZLQ	2,48	30,00	2,86	26,00		
F) PARÂMETROS DE UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO		Adimensional		Adimensional			
UC C	Coefficiente de Uniformidade de Crh	0,982		0,983			
UC H	Coefficiente de Uniformidade HSPA	0,975		0,979			
DU	Uniformidade de Distribuição	0,960		0,967			
DU LQ	Uniformidade de Distribuição do Menor	0,973		0,975			
RP	Fração de Run-off em Percentagem	69,16		73,37			
G) PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO		Baseada em ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ	Baseada em ZREQ = ZREQ	Baseada em ZREQ = ZMIN	Baseada em ZREQ = ZLQ
IE	Eficiência de Irrigação	0,84	29,62	29,99	26,63	25,75	25,96
UZ	Fração Útil de Volume Infiltrado	1,00	0,960	0,972	1,00	0,967	0,975
SE	Eficiência de Armazenamento	5,71	100,00	99,94	52,50	100,00	99,95
AAP	Perc. de Área Total Adequadamente	1,00	100,00	89,27	0,00	100,00	87,48
DR	Razão de Ineficiência, Deficit Médio Irrigada, em Percentagem de ZREQ	4,29	-	0,57	47,50	-	0,41

#### a) Parâmetros de Uniformidade e Fração de Escoamento Superficial

Os parâmetros de uniformidade para vazão inicial reduzida à metade quando  $T = T_L$  não diferem muito dos resultados verificados para a vazão inicial constante. Estes resultados podem ser observados na TABELA 30. Os resultados verificados para o escoamento superficial, no entanto, tiveram um decréscimo médio de 9,9%. O decréscimo médio é maior entre os sulcos curtos (11,46%) do que entre os sulcos longos (8,41%). Os resultados indicam que a redução de vazão proporcionou uma melhor performance dos sistemas, com uma pequena perda de uniformidade e uma considerável melhora nas taxas de escoamento superficial.

#### b) Parâmetros de Eficiência

A redução da vazão inicial constante à metade quando  $T = T_L$  proporcionou aumentos significativos de eficiência em todos os casos estudados, como pode ser observado na TABELA 31. Tomando como o exemplo a eficiência de irrigação (IE) para a lâmina de infiltração média no menor quartil (ZLQ), verifica-se que houve um aumento médio de 9,38% com relação aos resultados obtidos com a vazão inicial constante. Os parâmetros de eficiência de irrigação para os dados de RAMSEY (1976) apresentaram os melhores resultados, com aumento médio de 14,26%, enquanto que a eficiência de irrigação obtida para os dados de SOUZA et alli (1987) foram menores, apresentando média de 6,96%. Entre os sulcos longos, as eficiências de irrigação para os dados da Fazenda Benson foram maiores 10,02%, em média, que os valores obtidos com vazão inicial constante, enquanto que as eficiências de irrigação da Fazenda Stieben foram maiores apenas 6,29%, em média, com relação à vazão constante.

Estes resultados indicam que a redução da vazão à metade quando  $T = T_L$  proporciona um aumento de eficiência tanto em sulcos longos como em sulcos curtos, embora os valores absolutos obtidos nos quatro exemplos estudados permaneçam abaixo dos valores recomendados. De qualquer forma,

TABELA 30 - Parâmetros de uniformidade e fração de escoamento superficial em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos (RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987), e sulcos longos (ELLIOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão inicial reduzida à metade no final da fase de avanço

EXPERIMENTO	RAZÃO DE AVANÇO	UCC ADIMENSIONAL	UCH ADIMENSIONAL	DU ADIMENSIONAL	DULQ ADIMENSIONAL	RP ADIMENSIONAL
RAMSEY	1/2	0.946	0.939	0.905	0.921	0.364
	1/54	0.959	0.953	0.932	0.942	0.493
	1/6	0.961	0.955	0.936	0.944	0.520
	1/13	0.970	0.964	0.951	0.957	0.639
SOUZA	1/2	0.989	0.974	0.922	0.981	0.7168
	1/4	0.987	0.971	0.912	0.978	0.7613
	1/6	0.986	0.969	0.906	0.977	0.7891
	1/11	0.986	0.968	0.901	0.977	0.8252
FAZENDA STIEBEN (ELLYOTT, 1990)	1/2	0.970	0.963	0.918	0.947	0.7933
	1/4	0.985	0.981	0.951	0.972	0.7980
	1/6	0.990	0.987	0.967	0.982	0.8091
	1/6.1	0.991	0.987	0.968	0.982	0.8082
FAZENDA BENSON (ELLYOTT, 1990)	1/1,53	0.981	0.976	0.959	0.970	0.6010
	1/2	0.981	0.976	0.960	0.971	0.6250
	1/4	0.982	0.975	0.960	0.973	0.6916
	1/6	0.983	0.979	0.967	0.975	0.7337

o aumento de eficiência de irrigação e a manutenção dos altos valores de uniformidade indicam que há excesso nos valores das vazões aplicadas nos quatro casos. No item seguinte são discutidos outras análises feitas sobre os dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson, 1980).

#### 4.3 OUTRAS APLICAÇÕES DO PROGRAMA SRFR. ESTUDO DE UM CASO

Como foi comentado anteriormente, a grande quantidade de variáveis envolvidas no dimensionamento da irrigação por sulcos não permite que se possa afirmar que esta ou aquela variável determina a eficiência ou uniformidade de irrigação. Dada a diferença de aplicações dos conjuntos de

TABELA 31 - Parâmetros de eficiência em função da variação da razão de avanço para sulcos curtos (RAMSEY, 1976 e SOUZA et alli, 1987) e sulcos longos (ELLYOTT et alli - Fazendas Stieben e Benson - 1980). Vazão reduzida à metade no final da fase de avanço

EXPERIMENTO	RAZÃO DE AVANÇO	IE			SE			AAP		
		ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ	ZREQ	ZMIN	ZLQ
RAMSEY Q <sub>0</sub> = 1,33 m/s L = 100 m	1/2	63,65	57,62	58,54	11,03	100,00	99,85	0,00	100,00	86,60
	1/4	50,70	47,28	47,70	15,46	100,00	99,91	0,00	100,00	89,70
	1/6	48,04	44,95	45,32	16,65	100,00	99,92	0,00	100,00	85,90
	1/13	36,12	34,36	34,56	23,55	100,00	99,94	0,00	100,00	85,90
SOUZA Q <sub>0</sub> = 1,00 m/s L = 100 m	1/2	28,32	26,10	27,74	9,87	100,00	99,87	0,00	100,00	92,48
	1/4	23,87	21,77	23,31	12,51	100,00	99,86	0,00	100,00	92,48
	1/6	21,09	19,11	20,58	14,72	100,00	99,86	0,00	100,00	92,48
	1/11	17,47	15,74	17,04	18,57	100,00	99,85	0,00	100,00	94,48
STIEBEN	1/2	21,16	19,42	19,98	15,40	100,00	99,76	0,00	100,00	86,25
	1/4	20,20	19,20	19,60	22,11	100,00	99,85	0,00	100,00	89,71
	1/6	19,52	18,87	19,14	28,49	100,00	99,89	0,00	100,00	89,71
	1/6.1	19,51	18,87	19,14	28,76	100,00	99,90	0,00	100,00	99,90
BENSON Q <sub>0</sub> = 1,61 m/s L = 625 m	1/1.5	39,99	38,34	38,77	34,84	100,00	99,93	0,00	100,00	85,59
	1/2	37,75	36,26	36,63	37,21	100,00	99,94	0,00	100,00	86,59
	1/4	30,84	29,62	29,99	45,71	100,00	99,94	0,00	100,00	89,27
	1/6	26,63	25,75	25,96	52,50	100,00	99,95	0,00	100,00	87,48

dados testados, foi selecionado um caso de sulcos longos, o conjunto de dados da Fazenda Benson (ELLIOTT et alli, 1980) para se fazer uma análise mais próxima de uma situação onde o projetista se depara com a escolha de um sistema entre diversas performances indicadas pelo programa SRFR. Neste estudo de caso, além das hipóteses de vazão inicial constante e vazão inicial reduzida à metade ao final da frente de avanço e variação do tempo de avanço ( $T_I$ ) e irrigação ( $T_{CO}$ ), discutidas no item anterior, foram consideradas hipóteses de redução do comprimento do sulco (L), variação da declividade do sulco ( $S_0$ ) e variação da constante de rugosidade "n" da fórmula de Manning (NMAN). Os resultados, apresentados na TABELA 32, são discutidos a seguir em função das performances dos parâmetros de uniformidade de distribuição (DU), escoamento superficial (RP), eficiência de irrigação (IE) e eficiência de armazenamento (SE).

TABELA 32 - Uniformidade de Distribuição (DU), escoamento superficial (RP), eficiência de Irrigação (IE) e eficiência de armazenamento (SE) para dados de ELLIOTT et alli (Fazenda Benson, 1980), variando-se o comprimento do sulco (L), tempo de avanço (TL), declividade do sulco ( $S_0$ ) e rugosidade (constante "n" - NMAN - da fórmula de Manning), mantendo-se constante a lâmina requerida de infiltração (ZREQ), obtidos através do programa SRFR.

K	L(m)	TCO(min)	TL(min)	Q(l/s)	$S_0$	NMAN	ZREQ(cm)	DU	RP	IE	SE
1	625,00	1.375,00	275,05	1,61	0,0045	0,25	5,58	97,3	79,85	20,15	49,77
2	625,00	1.375,00	396,49	0,805	0,0045	0,25	5,58	95,8	63,81	33,69	41,61
3	625,00	1.375,00	309,96	1,61	0,0030	0,25	5,58	97,5	78,98	21,02	51,92
4	625,00	1.375,00	446,15	0,85	0,0030	0,25	5,58	94,5	64,85	35,15	43,41
5	625,00	1.375,00	65,51	1,61	0,0045	0,025	5,58	96,8	87,64	12,36	30,52
6	625,00	1.375,00	101,91	0,805	0,0045	0,025	5,58	94,6	79,12	20,89	25,79
7	625,00	1.375,00	73,89	1,61	0,0030	0,025	5,58	96,8	87,10	12,90	31,86
8	625,00	1.375,00	114,47	0,805	0,0030	0,025	5,58	95,4	78,30	21,71	26,81
9	625,00	1.375,00	446,17	0,805 e 0,4025	0,0030	0,25	5,58	92,6	50,64	49,36	40,37
10	625,00	698,00	309,96	1,61	0,0030	0,25	5,58	97,00	69,16	30,85	36,68
11	625,00	698,00	446,15	0,805	0,0030	0,25	5,58	91,70	49,29	50,72	31,80
12	625,00	698,00	446,15	0,805 e 0,4025	0,0030	0,25	5,58	N Ã O C O N V E R G I U			
13	312,50	698,00	196,76	0,805	0,0030	0,25	5,58	95,20	73,76	26,25	32,91
14	312,50	590,28	196,76	0,805	0,0030	0,25	5,58	95,00	71,17	28,83	30,57
15	312,50	393,52	196,76	0,805	0,0030	0,25	5,58	95,10	63,77	36,23	25,61
16	312,50	393,52	196,76	0,805 e 0,4025	0,0030	0,25	5,58	94,50	54,05	49,95	24,36
17	312,50	393,52	290,02	0,4025	0,0030	0,25	5,58	88,80	41,09	58,92	20,83
18	312,50	580,04	290,02	0,4025	0,0030	0,25	5,58	91,30	52,00	48,02	25,01

Os sulcos construídos em solos de textura média. O comprimento (L) dos sulcos no campo é de 600m e o tempo de irrigação praticado foi de 698,00 min, para vazão inicial constante de 1,61 l/s. A declividade medida em campo foi de 0,0045 (0,45%) e a constante de rugosidade "n" da fórmula de Manning estimada foi 0,25. As dezoito simulações apresentadas na TABELA 32 foram feitas na seguinte sequência: (1) primeira simulação (H=1) considerou o comprimento do sulco (L) de campo (625,00m) e o tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) obtido para a razão de avanço 1/4, que permite que o avanço se dê em 275,05 minutos ( $T_L = 275,05$  min), para vazão inicial constante de 1,61 l/s, lâmina de TABELA 32 infiltração requerida de 5,58cm, declividade ( $S_D$ ) de 0,45% (0,0045) e constante "n" de Manning 0,25; (2) nas oito simulações seguintes (K = 2 a K = 9), foram calculados os novos tempos de avanço ( $T_L$ ) para as variações da declividade ( $S_D$ ), constante "n" de Manning (NMAN) e vazão ( $Q_D$ ); (3) nas quatro simulações seguintes (k = 10 a K = 13) manteve-se o comprimento do sulco (L = 625,00m), reduzindo o tempo de irrigação ( $T_{CO}$ ) para o valor praticado em campo ( $T_{CO} = 698,00$  min), para as mesmas hipóteses das simulações K = 1 a K = 9; (4) nas demais simulações (K = 14 a K = 18), fez-se a redução do comprimento do sulco (L = 312,50m) e adotou-se a metade da vazão ( $Q_0 = 0,805$ ) e, (5) nas simulações K = 9, K = 12 e K = 16 fez-se a redução da vazão inicial ( $Q_D$ ) à metade ao final do avanço ( $T = T_L$ ).

Os resultados confirmam o que se disse anteriormente sobre a uniformidade de distribuição (DJ): este parâmetro decresce quando se reduz a vazão e o valor da rugosidade. Por outro lado a eficiência da irrigação teve melhor performance. O melhor resultado alcançado nas nove primeiras simulações é aquele em que a vazão aplicada foi constante e igual a 0,805 l/s, (metade da vazão aplicada em campo), com declividade de 0,30% (0,0030), constante "n" de Manning igual a 0,25 (NMAN = 0,25). Nesta simulação (K = 4) o tempo de avanço ( $T_L$ ) foi o maior de todos (446,15 min) e foram alcançadas uniformidades de distribuição (DU) de 94,5%, escoamento superficial (RP) de 64,85%, eficiência de irrigação (IE) de 34,15% e eficiência de armazenamento (SE) de 43,41%. A eficiência de irrigação (IE) teve, neste caso, um incremento de 74,44% em relação à primeira simulação (K = 1), enquanto que a

uniformidade de distribuição (DU) sofreu um decréscimo de apenas 3%.

Para as simulações com tempo de irrigação de campo (TCO) = 698 min) a melhor performance observada foi novamente para a vazão ( $Q_0$ ) de 0,805  $\text{m}^3/\text{s}$ , metade da vazão de campo, que apresentou eficiência de irrigação (IE) de 50,72%, uniformidade de distribuição (DU) de 91,70%, escoamento superficial de 49,29% e eficiência de armazenamento de 31,80%. Estes valores representam um incremento de 44% sobre o valor da eficiência de irrigação alcançada na melhor simulação anterior ( $K = 4$ ). A uniformidade de distribuição (DU), no entanto, sofreu um decréscimo de 3%. A hipótese de vazão reduzida à metade quando  $T = T_L$  não convergiu ( $K = 12$ ).

A melhor performance absoluta no entanto, foi para o sulco de comprimento (L) reduzido à metade do utilizado no campo (L = 312,50m e L = 625,00m, respectivamente) e tempo de avanço ( $T_L$ ) igual à 393,52 min. Nesta simulação ( $K = 17$ ), a eficiência de irrigação (IE) atingiu o valor de 58,92% e a uniformidade de distribuição (DU) alcançou 88,80%, o valor mais baixo entre as dezoito simulações. Além de haver sido adotado um comprimento menor, adotou-se também uma vazão menor (um quarto de vazão aplicado no campo), declividade de 0,30% (0,0030) e constante "n" de Manning com valor de 0,25.

Dezenas de análises podem ser feitas ainda sobre os resultados apresentados na TABELA 32. Outras tantas simulações poderiam ser implementadas pelo programa SRFR até o projetista se definir por uma situação de projeto viável economicamente e ajustada às condições de clima, cultura, solo e disponibilidade d'água.

Os resultados obtidos podem ser comparados ainda com as relações empíricas indicadas na bibliografia. Por exemplo, a melhor eficiência de irrigação (IE) foi conseguida para sulcos de 312,50m e declividade de 0,3%. Estes dados estão dentro do esperado quando se utiliza a sugestão de comprimentos máximos indicada por BOOHER (1974). Na TABELA 6 (capítulo 2), o sulco indicado para a declividade de 0,3%, lâmina de água de 5,0cm e solos médios é de 280,0m, muito próximo do valor adotado (L = 312,50m). A vazão máxima não erosiva permitida para a declividade original de campo (0,45%) seria de 1,33  $\text{m}^3/\text{s}$ , enquanto que a vazão máxima não erosiva para a declividade de

0,30% seria de 2,0 l/s, bem superior à primeira. JAMES (1988) sugere que, quando a área agrícola é mecanizada, os sulcos podem ser tão longos quanto o possível, para se reduzir os requerimentos de mão-de-obra e capital, mas curtos o bastante para se conseguir razoável uniformidade de distribuição e eficiência de irrigação. BOOHER (1974) recomenda que os comprimentos de sulcos devam ser adaptados ao tipo de solo e à declividade do campo em áreas com grandes variações de solo e declividade.

O capítulo seguinte foi reservado às conclusões e discussões mais gerais feitas a partir das análises descritas até o momento.

## 5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao final das análises, foi constatado que: a) o modelo utilizado pelo programa SRFR simula bem o avanço, a recessão e o perfil de infiltração para sulcos curtos; b) as simulações efetuadas sobre dados referentes a sulcos longos apontam para uma superestimação nos valores dos tempos de recessão; c) O modelo simula curvas de eficiência e uniformidade como as apresentadas na bibliografia, mas com valores de eficiência menores que as recomendadas; d) a razão de avanço de 1/4 não é a razão de avanço ótima, tal como havia sido proposto por CRIDDLE (1956). Verificou-se que quanto mais próximo da unidade é o valor da razão de avanço, isto é, quanto mais próximos forem os valores do tempo de avanço e de infiltração, maiores os índices de eficiência. Acima deste valor praticamente não há modificação nos parâmetros de uniformidade e eficiência, e, por fim, e) o modelo confirma que a redução de vazão não afeta as curvas de recessão, melhorando a eficiência de irrigação, tanto para sulcos curtos como para sulcos longos, uma vez que há redução dos índices de escoamento superficial.

A análise dos resultados fica dificultada com o multiplicidade de índices existentes na bibliografia e outros apresentados no programa, que nem sempre atendem às mesmas definições. A entrada de dados é trabalhosa, uma vez que as opções não ficam claras e o manual é sintético demais. Assim, alguns resultados tiveram que ser trabalhados, ou para preencher vazios, ou para se fazer comparações e extrapolações entre os resultados do programa e os resultados obtidos em campo. Neste sentido, fica particularmente prejudicada a análise do perfil de distribuição da água infiltrada após a irrigação em função da lâmina infiltrada apresentada pelo programa e as fornecidas através da equação de Kostiakov para os dados de campo. Uma

versão interativa está sendo elaborada por STRELKOFF, o que permitirá análises mais acuradas para diferentes tipos de solo e condições de manejo, por exemplo.

A seguir são feitas algumas considerações e recomendações sobre o trabalho aqui desenvolvido, os modelos matemáticos da hidráulica da irrigação por superfície e os seus desdobramentos futuros. Os comentários são os seguintes:

1) Os modelos matemáticos da hidráulica da irrigação por superfície apontam para a informatização como uma forma de se reestabelecer a concorrência, ou pelo menos a convivência, dos métodos de irrigação superficial com os métodos pressurizados, tão em voga nas duas últimas décadas. Os primeiros foram relegados a projetos de irrigação em áreas subdesenvolvidas e artesanais, enquanto que os outros subiram ao patamar dos grandes projetos, onde há demanda de grandes investimentos e recursos. Muitos destes projetos, no entanto, não levaram em conta a dimensão social que há por trás de qualquer projeto agrícola. Os métodos de irrigação superficial, alegam os defensores da pressurização, são ineficientes e dispendiosos; o mundo vive uma crise de uso de recursos hídricos. Esquecem, porém, que mais grave que a crise energética ou de recursos hídricos é a crise social que se engendra em todas as nações e em especial no terceiro mundo. Embora em alguns casos os métodos superficiais sejam menos eficientes que os pressurizados, a importância social estabelecida na geração de empregos e na economia de recursos financeiros de implantação obriga que os métodos superficiais sejam melhor estudados e que novas metodologias de trabalho sejam estabelecidas.

2) Programas de computador, como o SRFR, podem alterar o quadro atual na medida em que os projetos possam predizer como os parâmetros de manejo deverão ser geridos em campo: que vazão utilizar, que comprimento de sulco, que tempo de irrigação. Como, quando e quanto irrigar. A utilização de programas como o SRFR, obriga que se estabeleçam metodologias próprias de projeto, inclusive com extensão a dados confiáveis de campo e a incorporação e utilização de pesquisas já realizadas. Neste ponto há um obstáculo

especialmente difícil de se transpor: a diversidade de definições e índices de parâmetros de uniformidade, eficiência e manejo.

3) Neste trabalho procurou-se estabelecer uma metodologia de trabalho que permitisse que um projetista de posse do programa pudesse simular, a partir de dados de campo confiáveis, irrigações superficiais por sulcos de uma forma eficiente e rápida. Boa parte dos recursos oferecidos pelo software foram utilizados e analisados. Os resultados obtidos indicam que o programa ainda não pode ser usado indiscriminadamente, pelo menos a versão utilizada neste trabalho, e que mais testes precisam ser realizados, dentro de um processo de sintonia fina e de ajustes. É preciso haver discussão e confrontação de resultados de campo com resultados de simulações.

4) Outra interface que o programa oferece é a de facilitador de ensino e aprendizagem na graduação e pós-graduação. A informatização no âmbito da universidade tem proporcionado a racionalização do ensino em algumas áreas, tornando mais objetivos e claros alguns conceitos árdios e que exigem cálculos complexos ou grandes interações. O programa pode ser utilizado como ferramenta de ensino, permitindo simulações diversas dentro da disciplina Irrigação Superficial. A metodologia aqui apresentada abre também uma possibilidade interdisciplinar quando se faz a junção das disciplinas de informática, conhecimentos de planilhas eletrônicas e sistema operacional de microcomputador.

5) Por fim, o programa poderá ser utilizado para análises técnicas de viabilidade econômica de projetos, quando devidamente ajustado à realidade de nossos experimentos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

BASSET, D. L. - 1972 - A Mathematical Model of Water Advance in Border Irrigation: Advance Phase. Transactions of the ASAE. V. 15, Nº 5, p. 992-995.

BASSET, D. L. - 1973 - A Dynamic Model of Overland Flow in Border Irrigation. Thesis presented to the University of Idaho, at Moscow, Idaho, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

BASSET, D. L., FITZIMMONS, D. W. - 1976 - Simulating Overland Flow in Border Irrigations. Transactions of the ASAE. V. 19, N. 4, p. 674-680.

BAUTISTA, E., WALLENDER, W. W. - 1992 - Hydrodynamic Furrow Irrigation Model With Specified Space Steps. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 118, N. 3, p. 450-465, Maio/Junho, 1992.

BERNARDO, S. - 1992 - Manual de Irrigação. Imprensa Universitária. Universidade Federal de Viçosa, 488 p.

BOOHER, L. J. - 1974 - Surface Irrigation, Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), 160 p.

BOONSTRA, J., JURRIENS, M. - 1988 - BASCAD: A Mathematical Model for Level Basin Irrigation. ILRI Publication. N. 43. Wageningen. The Netherlands.

- CHOW, Ven Te - 1973 - Open Channel Hydraulics. McGraw - Hill Book Company Inc. New York.
- CLIDDLE, W. D., DAVIS, S., PAIR, C. H., SCHOKLEY, D. G. - 1956 - Method for Evaluating Irrigations Systems. Agricultural Handbook Nº 82, USDA, Soil Conservation Service (SCS).
- CUENCA, R. H. - 1989 - Irrigation System Design: An Engineering Approach. New Jersey: Prentice Hall, Inc. 552 p.
- DAKER A, - 1988 - Irrigação e Drenagem. Água na Agricultura. 7ª edição rev. e ampl. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 544 p.
- ELLIOTT R. L. e WALKER, W. R. - 1982 - Field evaluation of furrow: application and advance functions. Transactions of the ASAE Zu: 396-400.
- FANGMEIER, D. D., STRELKOFF, T. - 1979 - Mathematical Models and Border Irrigation Desing. Transactions of the ASAE V. 6, Nº 4, p. 318-319.
- FANGMEIER, D. D., RAMSEY, M. K. - 1978 - Intake Characteristics of Irrigation Furrows. Transactions of the ASAE. Vol. 21, Nº 4, pp. 696-700 e 705. 1978.
- HOLZAPFEL, E. A., MARINO, M. A. - 1987 - Surface Irrigation Optimization Models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, V. 113, Nº 3, Ago/1987.
- JAMES, L. G. - 1988 - Principles of Farm Irrigation System Desing. New York: Jonh Wiley de Sons. Inc. 543 p.
- KATAPODES, N. D., STRELKOFF, T. - 1977 - Hydrodynamics of Border Irrigations: Complete Model. Journal of the Irrigation and Drainage Div. ASCE. V. 103, Nº IR3, p. 309-324.

- KINCAID, D. C., HERMANN, D. F., KRUSE, E. G. - 1972 - Hydrodynamic of Border Irrigations Advance. Transactions of the ASAE. V. 15, Nº 4, p. 674-680.
- SAKKAS, J. G., STRELKOFF, T. - 1974 - Hydrodynamics of Surface Irrigation: Advance Phase. Journal of the Irrigation and Drainage Div. ASCE. V. 100, (IR1), p. 31-48.
- LEVIEN, S. e SOUZA, F. - 1987 - Algebraic Computation of Flow in Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, V. 113, N. 3, p. XYZ, Ago./1987.
- OLITA, A. F. - 1983 - Os Métodos de Irrigação. Livraria Nobel S.A., São Paulo, Brasil. 267 p.
- OWEIS, T. Y. e WALKER, W. R. - 1990 - Inertia-zero Model for Surge Flow Irrigation. Irrigation Science (1990), V. 11, p. 131-136, Verlag, 1990.
- SALAZAR, L. T. - 1977 - Spatil distribution of applied water in surface irrigation. Master of Science Thesis (Agricultural and Clinical Engineering). Colorado State University. Fort Colling.
- RAYEJ, M., WALLENDER, W. W. - 1988 - Time Solution of Kinematic-wave Model with Stochastic Infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 114, N. 4, p. 605-621, Nov./1988.
- RAYEJ, M., WALLENDER, W. W. - 1987 - Furrow Model With Specified Space Intervals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 113, Nº 4, Nov./1987, pp. 536-548.
- RAMSEY, M. K. - 1976 - Intake Characteristics and Flow Resistance in Irrigation Furrows. Thesis presented to the University of Arizona in partial Fulfillment of the requeriments for the degree of Master of Science. 141 p.

- SCHAWANKL, L. J., WALLENDER, W. W. - 1988 - Inertia-Zero Modeling with Variable Infiltration and Hydraulic Characteristics. Transactions of the ASAE. Vol. 31, N. 5, p. 1470-1475.
- SCHIMITZ G. H. e SEUS G. J. - 1989 - Analitical model of level basin irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Enginneering. V. 115. N. 1. Fefereiro, 1989. p. 78-95.
- SCHIMITZ G. H. e SEUS G. L. - 1992 - MATHEMATICAL INÉRCIA-ZERO MODELING OF SURFACE IRRIGATION: ADVANCE IN FURROWS. Journal of Irrigation and Drainage Enginneering. V. 118, N. 1, Janeiro/Fevereiro, 1992. p. 1-17.
- SINGH, V., HE, YU CHENG - 1988 - Musbingum Model for Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 114, Nº 1, Fev./1988. pp. 89-103.
- SINGH, V., SCARLATOS, P. D. RAUDALES, S. A. - 1988 - Muskingum Model for Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 114, N. 2, Mai./1988. pp. 266-280.
- SOUZA, F. de - 1984 - Modelo Matemático da Irrigação por Sulcos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, V. 19, nº 9, p. 1135-1143, Set./1984.
- SOUZA, F. de - 1981 - Non Linear Hydrodynamic Model of Furrow Irrigation. Dissertation of Doctor of Phylosophy. University of Califórnia, Davis, USA. 172 p.
- SOUZA, F. de - 1992 - Notas de Aula da Disciplina Irrigação Superficial Avançada.

- STRELKOFF, T. - 1985 - BRDRFLW: a mathematical model of border irrigation. Phoenix, Arizona. United States Department of Agriculture, 1985. 100 p.
- STRELKOFF, T. - 1990 - SRFR. A computer program for simulating flow in surface irrigation (furrows - basins - borders). Version 20. WCL Report # 17. Phoenix, Arizona: United States Department of Agriculture, 1990. 69p.
- STRELKOFF, T., CLEMMENS, A.J. - 1981 - Dimensionness Strea Advance in Graded Borders. Journal of the Irrigation and Drainage Div. ASCE.
- STRELKOFF, T., CLEMMENS, A. J.- 1984 - Current Status of Irrigation Modelling. Reprinted from the Proceeding of the Specialty Conference Sponsored by Irrigation & Drainage Div. ASCE / Flagstaff, AR, Jul. 24-26, 1984.
- STRELKOFF, T., KATAPODES, N. D. - 1977 - End Depht under Inertia-zero Caonditions. Journal of the Hydraulics Dir. ASCE. V. 103 (HY1), p. 699-711.
- STRELKOFF, T. - 1977 - Algebraic Computation of Flow in Border Irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the ASCE, V. 103, N. IR3, Set./1977.
- TABUADA, M. - 1989 - Modelação Bidimensional e Tridimensional da Rega por Sulcos. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Dissertação apresentada para efeito de prestação de provas de Doutoramento. 254 p.
- U. S. Soil Conservation Service (SCS) - 1980 - Furrow Irrigation, Capítulo 5, Sec. 15, National Engineering Handbook, USDA.

- WALLENDER, W. W., RAYEJ, M. - 1990 - Shooting Method for Saint Venant Equations of Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 116, NO 1, pp. 114-122, Fev/1990.
- WALLENDER, W. W., YOKOKURA, J. 1991. Space Solution of Kinematic-Wase Model by Time Iteration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 117, N. 1, JAN/FEV. 1991, p. 140-143.
- WALLENDER, W. W. - 1986 - Furrow Model With Spatially Varying Infiltration. Transactions of the ASAE, Vol. 29, N. 4, p. 1012-1016.
- WALKER, W e SKOGERBOE, G. - 1987 - Surface Irrigation-Theory and Practice. Prentice Hall Inc. Eagle Wood Clifs. New Jersey. 386 p.
- WILKE, O. C. - 1968 - A Hydrodynamic Study of Flow in Irrigation Furrows. Tech. Report N. 13. Water Resources Institute. Texas A & M University.
- WILSON. B. N., ELLIOTT, R. - 1988 - Furrow Advance Using Simple Routing Models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 114, N. 1, Fev./1988, p. 104-117.
- YU, FANG X., SINGH, V. P. - 1989 - Analytical Model for Border Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 115, N. 6, Dez./1989 pp. 982-999.

## 7. ANEXOS

## ANEXO 01

RELATÓRIO DE SAÍDA DE DADOS (SRFR.OUT) PARA O CASO DE  
VAZÃO INICIAL CONSTANTE E RAZÃO DE AVANÇO 1/13 PARA DADOS  
DE RAMSEY (1976).

.....SURFACE-IRRIGATION-FLOW PROGRAM.....

ENTER (LINE 0) I/O UNIT NUMBERS U1,U2,U3,U4 ---  
 8 0 7 9

SIMULATION EXECUTED 1994 - 12 - 22  
 XEQ STARTED 12:45:30.18

\*\*\*\*\* SURFACE-IRRIGATION-FLOW PROGRAM \*\*\*\*\* Version 20: 9/90\*\*

INTERACTIVE USERS -- POSITION PAPER OR CLEAR SCREEN FOR PROMPTS. THEN ENTER (LINE 1, TSTM0D) -

- 1 FOR A FRESH START ---
- 2 TO CHANGE FIELD-DESIGN PARAMETERS -- SO,L,... ---
- 3 TO CHANGE MANAGEMENT PARAMETERS -- ZREQ,QIN,TCO, ... ---
- 4 TO CHANGE SOLUTION MODES -- SOLMOD,LINMOD,MAZ, ... ---
- 5 TO CHANGE NUMERICAL SOLUTION PARAMETERS -- MDENSE/N(STD),DT, ... ---
- 6 TO CHANGE DIAGNOSTIC LEVEL AND/OR PLOTTING FLAGS ---
- 0 TO STOP ---

ENTER LINE 2 ..... IDENTIFY THIS RUN .....  
 RAMSEY (1976), Vazao inicial(Qo) constante, razao de avanço (TL/Tinf)=1/13  
 ENTER (LINE 3) -- INPMOD ---

ENTER (LINE 4) SOIL AND CROP HYDRAULIC PROPERTIES --INFMOD,RUFMOD,FPCFLG ---

ENTER (LINE 5A) FIELD LENGTH L ---  
 .1000E+03

ENTER (LINES 6AB) SOIL AND CROP PROPERTIES (CONT.) -- K,A,B,C,NMAN,AN ---  
 .7590E+01 .5000E+00 .0000E+00 .2200E-01 .0000E+00

ENTER (LINE 7) FIELD GEOMETRY --- DBC,UBC,SOMOD,MXSG ---

ENTER (LINE 8A) AVERAGE LONGITUDINAL BOTTOM SLOPE OF FIELD --SOAVG ---  
 .1032E-02

ENTER (LINE 9A) FURROW SPACING...(ENTER 0 FOR THEORETICAL SINGLE FURROW) ---  
 .1000E+03

ENTER (LINE 9D) CHANNEL CROSS SECTION --COEF,EXPO ---  
 .1349E+02 .4539E+00

ENTER (LINE 10) MANAGEMENT PARAMETERS --ZREQ,MODQ ---  
 .1362E+02 1

ENTER (LINE 11A) INFLOW SURGE HYDROGRAPH -- Q1,TCYCLE,ROT,RQ2Q1,NCYCLE ---  
 .1330E+01 .2080E+03 .1000E+01 .0000E+00 1

ENTER (LINE 13) SOLUTION CHOICES -- SOLMOD,LINMOD,DMLMOD,MAZ (ZEROS IMPLY DEFAULT VALUES) ---  
 TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 0 0 0 0

DMLMOD TENTATIVELY DEFAULTED TO 1

ENTER (LINE 14E) DIMENSIONED HYPOTHETICAL FIELD AND MANAGEMENT PARAMETERS (ENTER ZEROS FOR DEFAULT VALUES) -- INPMOD,YO,NMANO,S00 ---  
 TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, OR IF DATA WERE ENTERED DIMENSIONED, ENTER <CR> ---  
 0 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00

ENTER (LINE 15) NUMERICAL SOLUTION PARAMETERS --MDENSE/N(STD),IMAX,TMAX,YREC,RDX,RLSTRM,ROXU,NYUBC  
 (ZEROS IMPLY DEFAULT VALUES) ---

TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 0 0 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 0

ENTER (LINE 16) NUMERICAL SOLUTION PARAMETERS -- RCMXR,RMMXR,JMAX  
 (ZEROS IMPLY DEFAULT VALUES) ---

TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 .0000E+00 .0000E+00 0

ENTER (LINE 17) RO,R1 ---

TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 .0000E+00 .0000E+00

ENTER (LINE 18) DIAGNOSTIC PARAMETERS --IDIAG,IDCH,ID2,IDCHCH,IDTAU,ID2,IDPLOT,IPRZA,FLGPVE ---  
 TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---

1 0 0 0 0 0 0 0 .0000E+00

ENTER (LINE 19) IDMODS,IAUX1,IDSTRM,IDIAG4,IDIAG5,IDIAG6,IDIAG7,IDIAG8,IDIAG9 ---

TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 0 0 0 0 0 0 0 0 0

ENTER (LINE 20) PLOTTING FLAGS --IPL0TW,IPL0TA,IPL0TH,IPL0TQ,IPL0TC ---

TO DISABLE PREPARATION OF PLOT TABLES, ENTER <CR> ---  
 0 0 0 0 0

ENTER (LINE 21) PLTFLG,SIMLNO,COLRNO,PLTFSX,PLTFSY,PLTFSH,PLTFSQ,PLTFTS,PLTFSZ ---  
 (ZEROS IMPLY DEFAULT VALUES) ---

TO DEFAULT THE ENTIRE LINE, ENTER <CR> ---  
 1 1 1 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00

ENTER (LINE 22) PLTPTH, THE PATH TO THE PLOT-DATA FILES (DEFAULT IS CURRENT DIRECTORY) ---

TO DEFAULT, ENTER <CR> ---

\*\*\*\*\* SURFACE IRRIGATION FLOW \*\*\*\*\*

RAMSEY (1976), Vazao inicial(Qo) constante, razao de avanço (TL/Tinf)=1/13

HYDRAULIC PROPERTIES OF CROP AND SOIL  
DIMENSIONED DIMENSIONLESS

ROUGHNESS ---  
MANNING N (COEFFICIENT) = .0220 FT\*\*(1/6) = .0220 M\*\*(1/6) EXPONENT = .0000E+00  
DIMENSIONLESS ROUGHNESS COEFFICIENT N\* = .1000E+01

INTAKE CHARACTERISTICS --- IN INFILTRATION FORMULA  $Z = K*\tau^{**A} + B*\tau + C$  ---  
(Z REPRESENTS VOLUME PER UNIT INFILTRATING-SURFACE AREA)

K = 2.9882	IN/HR**A	= 7.5900	CM/HR**A		
= .3858E+00	IN/MIN**A	= .9799E+01	MM/MIN**A		
= .4150E-02	FT/SEC**A	= .1265E-02	M/SEC**A		
				K* = .2352E+00	
A = .5000		= .5000		A = .5000	
B = .0000	IN/HR	= .0000	CM/HR	B* = .0000E+00	
C = .0000	IN	= .0000	CM	C* = .0000E+00	

SYSTEM GEOMETRY  
DIMENSIONED DIMENSIONLESS

AVG. FIELD SLOPE SOAVG = .0010320 = .1032E-02 SO\* = .1000E+01  
PLANE FIELD

FURROW CROSS SECTION: BROAD POWER LAW -- TOP WIDTH B=B1\*Y\*\*M (WETTED PERIMETER = TOP WIDTH) --  
B1= 8.11 IN\*\*(1-M) = 13.5 CM\*\*(1-M) B1\* = .5764E+01  
M = .454 = .454 M = .454

.....  
.....

FIELD LENGTH L = 328.1 FT = 100.0 M L\* = .2175E+01

FURROW SPACING (ON CENTERS)= 39.4 IN =100.0 CM FS\* = .2108E+02

FLOW CHANNELS ALLOW RUNOFF AT DOWNSTREAM END  
UPSTREAM END IS BLOCKED AFTER CUTOFF, SO DISCHARGE IN OR OUT IS ZERO

IRRIGATION-MANAGEMENT PARAMETERS  
DIMENSIONED DIMENSIONLESS

REQUIRED APPLICATION	= 5.36 IN	=13.62 CM	ZREQ* = .2871E+01
INFLOW RATE PER FURROW	= .0470 CFS	= 1.330 LITERS/SEC	QIN* = .1000E+01
UNIT INFLOW RATE (PER UNIT WIDTH OF FIELD)=	.0143 CFS/FOOT	= 1.330 LITERS/SEC-M	= .4745E-01
CYCLE TIME	= 208.00 MIN	= 3.467 HR	TCYCLE* = .1604E+03
"FULL-ON"-TIME RATIO ROT=1.000			
"FULL-ON" TIME PER CYCLE=	208.00 MIN	= 3.467 HR	= .1604E+03
NUMBER OF CYCLES	= 1		
TOTAL "FULL-ON" TIME	= 208.00 MIN	= 3.467 HR	= .1604E+03

CHARACTERISTIC PARAMETERS IN DIMENSIONLESS FORMS

CHARACTERISTIC DEPTH BASED ON NORMAL DEPTH  $Y_0=Y_N$ ,  $X_0=Y_0/S_{00}$ ,  $T_0=X_0+Y_0+B_0/Q_0$

		D I M E N S I O N E D		D I M E N S I O N L E S S
NORMAL DEPTH	$Y_N = .1557$ FT	=	$.0474$ M	$Y_N^* = .1000E+01$
CRITICAL DEPTH	$Y_{C0} = .0786$ FT	=	$.0240$ M	$Y_{C0}^* = .5052E+00$
FROUDE NUMBER AT NORMAL DEPTH				$FN = .2634E+00$
CHARACTERISTIC FROUDE NUMBER				$FO = .2634E+00$
DIMENSIONLESS G				$G^* = .1334E+01$
DIMENSIONLESS DRAG FACTOR				$DO^* = .9543E+01$
CHARACTERISTIC DEPTH	$Y_0 = .1557E+00$ FT	=	$.4745E-01$ M	
CHARACTERISTIC LENGTH	$X_0 = .1508E+03$ FT	=	$.4598E+02$ M	
CHAR'ISTIC DISCHARGE	$Q_0 = .4697E-01$ CFS	=	$.1330E+01$ LITERS/SEC	
CHARACTERISTIC TIME	$T_0 = .1297E+01$ MIN	=	$.7782E+02$ SEC	
CHARACTERISTIC SLOPE	$S_{00} = .1032E-02$	=	$.1032E-02$	

NUMERICAL SOLUTION PARAMETERS

ZERO-INERTIA (EQUILIBRIUM) SOLUTION

WHEN WATER VELOCITY IN COMPUTATIONAL STREAM IS ESSENTIALLY ZERO, INFILTRATION IS ASSUMED TO BE THAT OF LEVEL POOL(S)

INFILTRATION-COMPUTATION MODE MAZ= 7

TIME WEIGHTING FACTOR THETA= .600

COMPUTATIONAL TRAILING-EDGE DEPTH YREC= .001

DEPTH AND DISCHARGE FUNCTIONS ARE TREATED AS FULLY NONLINEAR

CONVERGENCE-CRITERIA RATIOS: RCMXR= .10E-03 RMMXR= .10E-03

ABSOLUTE MINIMUMS: RCMAXO= .10E-07 RMMAXO= .10E-07

MAXIMUM ALLOWABLE NUMBER OF ITERATIONS JMAX = 12

MESH DENSITY, MDENSE = 3 NSTD=20

RDX= .950 RLSTRM= .500 RDXU= 1.400 NYUDC=10

IMAX=\*\*\* TMAX =\*\*\*\*\* MIN \*\*\*\*\* HR TMAX\* = .2080E+08

STRMS 500. LISTING TQ-BREAK POINTS: NQBRK= 1

ITQBRK= 1 TQBRK= .1604E+03 KNDQBRK=-1

ITQBRK= 2 TQBRK= .2080E+09 KNDQBRK=-1

CHNLG 5000. ENTRIES: BETA=1.0000 ALPHA=1.0000 VXS1= .5764E+01 VXS2= .4539 AK= .5000

CHNLG END. TIP SHAPE FACTORS. RBETA= .5000 RABETA= .4075 RALPHA= .4075 EBI= .4539 GAMMWP= .4539 GAMMAZ= .9539 RAZ= .5118 RA= .6667

I	T	DT	QIN	YLB	M	WG	NP	TG	MO	IM	J	YLB	XRB	W	RVERR	YRB/QRO
1	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	1	1	1	0	0	1	0	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
2	.3402E-02	.3402E-02	.1408E+01	.5000E+00	1	1	2	2	5	1	5	.0000E+00	.3893E-02	.1144E+01	-.8873E-04	.0000E+00
3	.7728E-02	.4325E-02	.1000E+01	.5148E+00	1	1	3	2	4	1	4	.0000E+00	.7982E-02	.9452E+00	-.2595E-04	.0000E+00
4	.1327E-01	.5539E-02	.1000E+01	.5386E+00	1	1	4	2	4	1	4	.0000E+00	.1227E-01	.7749E+00	-.1544E-04	.0000E+00
5	.1997E-01	.6700E-02	.1000E+01	.5637E+00	1	1	5	2	4	1	4	.0000E+00	.1678E-01	.6727E+00	-.1015E-04	.0000E+00
6	.2748E-01	.7516E-02	.1000E+01	.5864E+00	1	1	6	2	4	1	3	.0000E+00	.2151E-01	.6297E+00	-.1132E-04	.0000E+00
7	.3591E-01	.8427E-02	.1000E+01	.6067E+00	1	1	7	2	4	1	3	.0000E+00	.2648E-01	.5897E+00	-.1206E-04	.0000E+00
8	.4521E-01	.9303E-02	.1000E+01	.6247E+00	1	1	8	2	4	1	3	.0000E+00	.3170E-01	.5609E+00	-.1053E-04	.0000E+00
9	.5546E-01	.1025E-01	.1000E+01	.6412E+00	1	1	9	2	4	1	3	.0000E+00	.3718E-01	.5345E+00	-.8620E-05	.0000E+00
10	.6669E-01	.1122E-01	.1000E+01	.6564E+00	1	1	10	2	4	1	3	.0000E+00	.4293E-01	.5125E+00	-.5878E-05	.0000E+00
11	.7895E-01	.1226E-01	.1000E+01	.6705E+00	1	1	11	2	4	1	3	.0000E+00	.4897E-01	.4925E+00	-.2789E-05	.0000E+00
12	.9231E-01	.1336E-01	.1000E+01	.6838E+00	1	1	12	2	4	1	3	.0000E+00	.5531E-01	.4749E+00	-.5136E-06	.0000E+00
13	.1068E+00	.1452E-01	.1000E+01	.6963E+00	1	1	13	2	4	1	3	.0000E+00	.6197E-01	.4586E+00	-.4239E-05	.0000E+00
14	.1226E+00	.1575E-01	.1000E+01	.7082E+00	1	1	14	2	4	1	3	.0000E+00	.6897E-01	.4439E+00	-.8209E-05	.0000E+00
15	.1396E+00	.1706E-01	.1000E+01	.7195E+00	1	1	15	2	4	1	3	.0000E+00	.7631E-01	.4303E+00	-.1243E-04	.0000E+00
16	.1581E+00	.1845E-01	.1000E+01	.7303E+00	1	1	16	2	4	1	3	.0000E+00	.8402E-01	.4178E+00	-.1721E-04	.0000E+00
17	.1780E+00	.1992E-01	.1000E+01	.7407E+00	1	1	17	2	4	1	3	.0000E+00	.9211E-01	.4063E+00	-.2216E-04	.0000E+00
18	.1995E+00	.2150E-01	.1000E+01	.7506E+00	1	1	18	2	4	1	3	.0000E+00	.1006E+00	.3954E+00	-.2744E-04	.0000E+00
19	.2227E+00	.2320E-01	.1000E+01	.7602E+00	1	1	19	2	4	1	3	.0000E+00	.1095E+00	.3847E+00	-.3330E-04	.0000E+00
20	.2477E+00	.2500E-01	.1000E+01	.7695E+00	1	1	20	2	4	1	3	.0000E+00	.1189E+00	.3748E+00	-.3949E-04	.0000E+00
21	.2746E+00	.2692E-01	.1000E+01	.7785E+00	1	1	21	2	4	1	3	.0000E+00	.1287E+00	.3654E+00	-.4604E-04	.0000E+00
22	.3034E+00	.2878E-01	.1000E+01	.7865E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.1391E+00	.3590E+00	-.5119E-04	.0000E+00
23	.3345E+00	.3110E-01	.1000E+01	.7949E+00	1	1	21	2	4	0	4	.0000E+00	.1499E+00	.3488E+00	-.4466E-04	.0000E+00
24	.3680E+00	.3346E-01	.1000E+01	.8029E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.1613E+00	.3404E+00	-.5718E-04	.0000E+00
25	.4039E+00	.3598E-01	.1000E+01	.8108E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.1733E+00	.3324E+00	-.6879E-04	.0000E+00
26	.4426E+00	.3866E-01	.1000E+01	.8184E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.1858E+00	.3248E+00	-.7972E-04	.0000E+00
27	.4841E+00	.4152E-01	.1000E+01	.8259E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.1990E+00	.3176E+00	-.8987E-04	.0000E+00
28	.5287E+00	.4455E-01	.1000E+01	.8331E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2129E+00	.3107E+00	-.9956E-04	.0000E+00
29	.5765E+00	.4778E-01	.1000E+01	.8401E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2274E+00	.3042E+00	-.1087E-03	.0000E+00
30	.6277E+00	.5121E-01	.1000E+01	.8469E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2427E+00	.2980E+00	-.1172E-03	.0000E+00
31	.6825E+00	.5487E-01	.1000E+01	.8535E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2587E+00	.2921E+00	-.1255E-03	.0000E+00
32	.7413E+00	.5876E-01	.1000E+01	.8598E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2755E+00	.2864E+00	-.1337E-03	.0000E+00
33	.8043E+00	.6297E-01	.1000E+01	.8660E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2932E+00	.2806E+00	-.1422E-03	.0000E+00
34	.8718E+00	.6751E-01	.1000E+01	.8720E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.3117E+00	.2748E+00	-.1513E-03	.0000E+00
35	.9448E+00	.7235E-01	.1000E+01	.8778E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.3317E+00	.2693E+00	-.1598E-03	.0000E+00

36	.1022E+01	.7742E-01	.1000E+01	.8835E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.3517E+00	.2642E+00	.1675E-03	.0000E+00
37	.1104E+01	.8284E-01	.1000E+01	.8889E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.3731E+00	.2593E+00	.1750E-03	.0000E+00
38	.1193E+01	.8862E-01	.1000E+01	.8941E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.3957E+00	.2545E+00	.1828E-03	.0000E+00
39	.1288E+01	.9479E-01	.1000E+01	.8992E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.4194E+00	.2498E+00	.1903E-03	.0000E+00
40	.1389E+01	.1014E+00	.1000E+01	.9040E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.4442E+00	.2453E+00	.1981E-03	.0000E+00
41	.1498E+01	.1084E+00	.1000E+01	.9087E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.4703E+00	.2408E+00	.2060E-03	.0000E+00
42	.1613E+01	.1159E+00	.1000E+01	.9132E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.4977E+00	.2365E+00	.2142E-03	.0000E+00
43	.1737E+01	.1239E+00	.1000E+01	.9175E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.5265E+00	.2323E+00	.2226E-03	.0000E+00
44	.1870E+01	.1324E+00	.1000E+01	.9216E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.5567E+00	.2282E+00	.2312E-03	.0000E+00
45	.2011E+01	.1415E+00	.1000E+01	.9255E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.5885E+00	.2242E+00	.2401E-03	.0000E+00
46	.2163E+01	.1513E+00	.1000E+01	.9293E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.6218E+00	.2203E+00	.2493E-03	.0000E+00
47	.2324E+01	.1617E+00	.1000E+01	.9329E+00	1	1	21	2	4	0	4	.0000E+00	.6568E+00	.2163E+00	.2285E-03	.0000E+00
48	.2497E+01	.1728E+00	.1000E+01	.9363E+00	1	1	21	2	4	0	4	.0000E+00	.6935E+00	.2126E+00	.2091E-03	.0000E+00
49	.2682E+01	.1846E+00	.1000E+01	.9396E+00	1	1	21	2	4	0	4	.0000E+00	.7321E+00	.2089E+00	.1911E-03	.0000E+00
50	.2879E+01	.1972E+00	.1000E+01	.9426E+00	1	1	21	2	4	0	4	.0000E+00	.7726E+00	.2053E+00	.1740E-03	.0000E+00

51	.3052E+01	.1735E+00	.1000E+01	.9451E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.8076E+00	.2019E+00	.1461E-03	.0000E+00
52	.3235E+01	.1822E+00	.1000E+01	.9474E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.8438E+00	.1986E+00	.1203E-03	.0000E+00
53	.3426E+01	.1913E+00	.1000E+01	.9495E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.8812E+00	.1959E+00	.9823E-04	.0000E+00
54	.3624E+01	.2009E+00	.1000E+01	.9516E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.9200E+00	.1931E+00	.7662E-04	.0000E+00
55	.3838E+01	.2109E+00	.1000E+01	.9536E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.9602E+00	.1904E+00	.5607E-04	.0000E+00
56	.4059E+01	.2214E+00	.1000E+01	.9554E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1002E+01	.1878E+00	.3598E-04	.0000E+00
57	.4292E+01	.2325E+00	.1000E+01	.9572E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1045E+01	.1851E+00	.1680E-04	.0000E+00
58	.4536E+01	.2441E+00	.1000E+01	.9589E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1089E+01	.1825E+00	-.2050E-05	.0000E+00
59	.4792E+01	.2564E+00	.1000E+01	.9605E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1136E+01	.1800E+00	-.2010E-04	.0000E+00
60	.5061E+01	.2692E+00	.1000E+01	.9619E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1183E+01	.1775E+00	-.3773E-04	.0000E+00
61	.5344E+01	.2826E+00	.1000E+01	.9634E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1233E+01	.1750E+00	-.5519E-04	.0000E+00
62	.5641E+01	.2968E+00	.1000E+01	.9647E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1284E+01	.1725E+00	-.7198E-04	.0000E+00
63	.5952E+01	.3116E+00	.1000E+01	.9660E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1337E+01	.1701E+00	-.8868E-04	.0000E+00
64	.6279E+01	.3272E+00	.1000E+01	.9672E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1392E+01	.1677E+00	-.1051E-03	.0000E+00
65	.6623E+01	.3435E+00	.1000E+01	.9683E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1449E+01	.1653E+00	-.1215E-03	.0000E+00
66	.6984E+01	.3607E+00	.1000E+01	.9694E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1507E+01	.1629E+00	-.1377E-03	.0000E+00
67	.7362E+01	.3788E+00	.1000E+01	.9704E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1568E+01	.1606E+00	-.1539E-03	.0000E+00
68	.7760E+01	.3977E+00	.1000E+01	.9714E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1631E+01	.1583E+00	-.1701E-03	.0000E+00
69	.8178E+01	.4176E+00	.1000E+01	.9724E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1696E+01	.1560E+00	-.1862E-03	.0000E+00
70	.8616E+01	.4385E+00	.1000E+01	.9732E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1764E+01	.1537E+00	-.2024E-03	.0000E+00
71	.9076E+01	.4604E+00	.1000E+01	.9740E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1833E+01	.1514E+00	-.2189E-03	.0000E+00
72	.9560E+01	.4834E+00	.1000E+01	.9748E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1905E+01	.1492E+00	-.2355E-03	.0000E+00
73	.1007E+02	.5076E+00	.1000E+01	.9756E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.1980E+01	.1469E+00	-.2519E-03	.0000E+00
74	.1060E+02	.5329E+00	.1000E+01	.9763E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.2057E+01	.1447E+00	-.2685E-03	.0000E+00
75	.1116E+02	.5596E+00	.1000E+01	.9770E+00	1	1	21	1	1	0	3	.0000E+00	.2137E+01	.1425E+00	-.2854E-03	.0000E+00

STRMS 2600+9. XG PASSED. TGVNFG= 2 MOD= 4 IWMFLG= 0 DELTAX(J,M)= .3821E-01

76	.1143E+02	.2748E+00	.1000E+01	.9773E+00	1	1	21	2	4	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.1391E+00	-.2844E-03	.0000E+00
77	.1194E+02	.5088E+00	.1000E+01	.9779E+00	1	1	21	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2721E-03	.1620E+00
78	.1248E+02	.5342E+00	.1000E+01	.9784E+00	1	1	21	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2604E-03	.2215E+00
79	.1304E+02	.5609E+00	.1000E+01	.9789E+00	1	1	21	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2494E-03	.3004E+00
80	.1363E+02	.5890E+00	.1000E+01	.9795E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2384E-03	.3429E+00
81	.1425E+02	.6184E+00	.1000E+01	.9799E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2281E-03	.3927E+00
82	.1490E+02	.6493E+00	.1000E+01	.9804E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2182E-03	.4257E+00
83	.1558E+02	.6818E+00	.1000E+01	.9809E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2087E-03	.4605E+00
84	.1629E+02	.7159E+00	.1000E+01	.9813E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1994E-03	.4869E+00
85	.1704E+02	.7517E+00	.1000E+01	.9818E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1907E-03	.5132E+00
86	.1783E+02	.7893E+00	.1000E+01	.9822E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1824E-03	.5349E+00
87	.1866E+02	.8287E+00	.1000E+01	.9826E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1742E-03	.5557E+00
88	.1953E+02	.8702E+00	.1000E+01	.9831E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1664E-03	.5739E+00
89	.2045E+02	.9137E+00	.1000E+01	.9835E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1591E-03	.5911E+00
90	.2141E+02	.9594E+00	.1000E+01	.9838E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1520E-03	.6066E+00
91	.2241E+02	.1007E+01	.1000E+01	.9842E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1451E-03	.6213E+00
92	.2347E+02	.1058E+01	.1000E+01	.9846E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1386E-03	.6348E+00
93	.2458E+02	.1111E+01	.1000E+01	.9850E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1323E-03	.6476E+00
94	.2575E+02	.1166E+01	.1000E+01	.9853E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1263E-03	.6595E+00
95	.2697E+02	.1224E+01	.1000E+01	.9857E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1205E-03	.6708E+00
96	.2826E+02	.1286E+01	.1000E+01	.9860E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1151E-03	.6814E+00
97	.2961E+02	.1350E+01	.1000E+01	.9863E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1098E-03	.6916E+00
98	.3103E+02	.1417E+01	.1000E+01	.9866E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1048E-03	.7012E+00
99	.3251E+02	.1488E+01	.1000E+01	.9870E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.1001E-03	.7103E+00
100	.3408E+02	.1563E+01	.1000E+01	.9873E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.9549E-04	.7191E+00

101	.3572E+02	.1641E+01	.1000E+01	.9876E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.9100E-04	.7274E+00
102	.3744E+02	.1723E+01	.1000E+01	.9879E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.8687E-04	.7354E+00
103	.3925E+02	.1809E+01	.1000E+01	.9881E+00	1	1	21	1	2	0	3	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.8297E-04	.7431E+00
104	.4115E+02	.1899E+01	.1000E+01	.9884E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.7940E-04	.7505E+00
105	.4314E+02	.1994E+01	.1000E+01	.9887E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.7611E-04	.7576E+00
106	.															

113	.6314E+02	.2947E+01	.1000E+01	.9907E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.5343E-04	.8057E+00
114	.6623E+02	.3094E+01	.1000E+01	.9909E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.5091E-04	.8109E+00
115	.6948E+02	.3249E+01	.1000E+01	.9911E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.4866E-04	.8159E+00
116	.7289E+02	.3411E+01	.1000E+01	.9913E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.4649E-04	.8207E+00
117	.7648E+02	.3582E+01	.1000E+01	.9915E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.4437E-04	.8254E+00
118	.8024E+02	.3761E+01	.1000E+01	.9917E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.4234E-04	.8299E+00
119	.8419E+02	.3949E+01	.1000E+01	.9919E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.4040E-04	.8343E+00
120	.8833E+02	.4146E+01	.1000E+01	.9921E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3852E-04	.8385E+00
121	.9269E+02	.4354E+01	.1000E+01	.9923E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3678E-04	.8427E+00
122	.9726E+02	.4571E+01	.1000E+01	.9925E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3510E-04	.8467E+00
123	.1021E+03	.4800E+01	.1000E+01	.9926E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3345E-04	.8506E+00
124	.1071E+03	.5040E+01	.1000E+01	.9928E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3198E-04	.8544E+00
125	.1124E+03	.5292E+01	.1000E+01	.9930E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3060E-04	.8581E+00
126	.1179E+03	.5556E+01	.1000E+01	.9932E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2915E-04	.8616E+00
127	.1238E+03	.5834E+01	.1000E+01	.9933E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2787E-04	.8651E+00
128	.1299E+03	.6126E+01	.1000E+01	.9935E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2655E-04	.8685E+00
129	.1363E+03	.6432E+01	.1000E+01	.9936E+00	1	1	21	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2527E-04	.8718E+00
130	.1431E+03	.6754E+01	.1000E+01	.9938E+00	1	1	25	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.3089E-04	.8750E+00
131	.1502E+03	.7092E+01	.1000E+01	.9939E+00	1	1	25	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2943E-04	.8781E+00
132	.1576E+03	.7446E+01	.1000E+01	.9941E+00	1	1	25	1	2	0	2	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2808E-04	.8812E+00

STRMS 1340. T(1) = .16036200E+03 IPTQBK= 134 ITQBKR= 1 KNOQBK=-1 TGVNFG=1  
 133 .1604E+03 .2733E+01 .1000E+01 .9941E+00 1 1 25 1 2 0 2 .0000E+00 .2175E+01 .0000E+00 -.2761E-04 .8823E+00

STRMS 1260. AT I=IPTQBK, THETA=.6000E+00

134	.1610E+03	.6770E+00	.0000E+00	.6729E+00	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.8810E+00
135	.1617E+03	.7108E+00	.0000E+00	.4361E+00	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.8718E+00
136	.1625E+03	.7464E+00	.0000E+00	.3190E+00	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.8458E+00
137	.1633E+03	.7837E+00	.0000E+00	.2122E+00	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.7978E+00
138	.1641E+03	.8229E+00	.0000E+00	.1423E+00	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2762E-04	.7274E+00
139	.1650E+03	.8640E+00	.0000E+00	.8067E-01	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.6391E+00
140	.1659E+03	.9072E+00	.0000E+00	.4238E-01	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2756E-04	.5435E+00
141	.1668E+03	.9526E+00	.0000E+00	.1176E-01	1	1	25	1	2	0	4	.0000E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2756E-04	.4510E+00
142	.1678E+03	.1000E+01	.0000E+00	-.1431E-02	1	1	24	1	2	0	4	.1036E-01	.2175E+01	.0000E+00	-.2755E-04	.3671E+00
143	.1689E+03	.1050E+01	.0000E+00	-.8957E-03	1	1	23	1	2	0	5	.2486E-01	.2175E+01	.0000E+00	-.2755E-04	.2941E+00
144	.1700E+03	.1103E+01	.0000E+00	-.1635E-02	1	1	20	1	2	0	4	.1134E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2757E-04	.2322E+00
145	.1711E+03	.1158E+01	.0000E+00	-.4350E-03	1	1	19	1	2	0	5	.1691E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.1806E+00
146	.1724E+03	.1216E+01	.0000E+00	-.8377E-03	1	1	18	1	2	0	4	.2471E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.1383E+00
147	.1736E+03	.1277E+01	.0000E+00	-.1984E-01	1	1	17	1	2	0	5	.3563E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2762E-04	.1042E+00
148	.1750E+03	.1340E+01	.0000E+00	.6049E-02	1	1	17	1	2	0	6	.3563E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.7690E-01
149	.1763E+03	.1340E+01	.0000E+00	-.1847E-01	1	1	16	1	2	0	7	.5091E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2758E-04	.5634E-01
150	.1777E+03	.1340E+01	.0000E+00	-.3066E-02	1	1	15	1	2	0	5	.7232E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.4086E-01

I	T	DT	QIN	YLB	W	MG	NP	TG	MO	IM	J	YLB	XR	W	RVERR	YRB/QRO
151	.1791E+03	.1407E+01	.0000E+00	.1432E-01	1	1	15	1	2	0	5	.7232E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.2874E-01
152	.1805E+03	.1478E+01	.0000E+00	.6326E-02	1	1	15	1	2	0	7	.7232E+00	.2175E+01	.0000E+00	-.2761E-04	.1945E-01
153	.1820E+03	.1478E+01	.0000E+00	-.1593E-04	1	1	14	1	2	0	7	.1023E+01	.2175E+01	.0000E+00	-.2760E-04	.1277E-01
154	.1835E+03	.1478E+01	.0000E+00	-.6032E-03	1	1	13	1	2	0	8	.1141E+01	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.8035E-02
155	.1848E+03	.1330E+01	.0000E+00	-.1497E-02	1	1	10	1	2	0	6	.1462E+01	.2175E+01	.0000E+00	-.2757E-04	.5030E-02
156	.1862E+03	.1530E+01	.0000E+00	-.1162E-03	1	1	9	1	2	0	8	.1558E+01	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.2928E-02
157	.1873E+03	.1197E+01	.0000E+00	.1067E-01	1	1	7	1	2	0	6	.1737E+01	.2175E+01	.0000E+00	-.2759E-04	.1637E-02

STRMS 4720. ALL Q(K,J,W) .LT. .1000E-02 remainder of stream infiltrates as stagnant pool at increased dt.  
 158 .1885E+03 .1197E+01 .0000E+00 -.1601E-02 1 1 6 1 2 0 6 .1820E+01 .2175E+01 .0000E+00 -.2761E-04 .7853E-03  
 159 .1897E+03 .1197E+01 .0000E+00 .6469E-02 1 1 4 1 2 0 7 .1973E+01 .2175E+01 .0000E+00 -.2762E-04 .2786E-03

WITH LENGTH REDUCED TO ZERO, STREAM DISAPPEARS.

NO STREAMS LEFT ON FIELD

TYPICAL NUMBER OF CELLS IN STREAM = 20

AVERAGE TIME STEP DT = 1.56 MIN = .026 HR DT\* = .1201E+01

IN EQUIVALENT Z-DISTRIBUTION CONSTRUCTION, XE(NZE+1) = .2175E+01 XU(MAZU+1) = .2175E+01 XU(MAZU+1) - XE(NZE+1) = -.2384E-06

MAZU = 24 NZE = 24 VZ = .3523E+02 VZE = .1672E+01 CHNSPC = .2108E+02 ERRV = .3169E-05 RERRV = .8994E-07

POST-IRRIGATION SYNOPSIS

..... ULTIMATE INFILTRATION PROFILE .....

K	INFILTRATED DEPTHS REPRESENT VOLUMES PER UNIT FIELD AREA				TA		TR		MSRGS	X METERS	Z CM	X FEET	Z IN
	X*	TA*	TR*	Z*	MIN	MIN	MIN	MIN					
1	.0000E+00	.0000E+00	.1668E+03	.8064E+00	.0	216.4	1	.0				.0	1.51
2	.1036E-01	.1079E-01	.1678E+03	.8056E+00	.0	217.7	1	.5			3.8	1.6	1.50
3	.2486E-01	.3316E-01	.1689E+03	.8046E+00	.0	219.0	1	1.1			3.8	3.7	1.50
4	.4516E-01	.7121E-01	.1691E+03	.8033E+00	.1	219.4	1	2.1			3.8	6.8	1.50
5	.7359E-01	.1333E+00	.1695E+03	.8016E+00	.2	219.8	1	3.4			3.8	11.1	1.50
6	.1134E+00	.2330E+00	.1700E+03	.7984E+00	.3	220.5	1	5.2			3.8	17.1	1.49
7	.1691E+00	.3914E+00	.1711E+03	.7952E+00	.5	222.0	1	7.8			3.8	25.5	1.49
8	.2471E+00	.6428E+00	.1724E+03	.7917E+00	.8	223.6	1	11.4			3.8	37.3	1.48
9	.3563E+00	.1039E+01	.1750E+03	.7869E+00	1.3	226.9	1	16.4			3.8	53.7	1.47
10	.5091E+00	.1662E+01	.1763E+03	.7814E+00	2.2	228.7	1	23.4			3.7	76.8	1.46
11	.7232E+00	.2639E+01	.1805E+03	.7736E+00	3.4	234.2	1	33.2			3.7	109.1	1.45
12	.1023E+01	.4173E+01	.1820E+03	.7671E+00	5.4	236.1	1	47.0			3.7	154.3	1.43
13	.1141E+01	.4824E+01	.1835E+03	.7638E+00	6.3	238.0	1	52.5			3.6	172.1	1.43
14	.1254E+01	.5465E+01	.1840E+03	.7608E+00	7.1	238.6	1	57.6			3.6	189.1	1.42
15	.1360E+01	.6093E+01	.1844E+03	.7579E+00	7.9	239.2	1	62.5			3.6	205.2	1.42
16	.1462E+01	.6705E+01	.1848E+03	.7547E+00	8.7	239.7	1	67.2			3.6	220.5	1.41
17	.1558E+01	.7302E+01	.1862E+03	.7521E+00	9.5	241.5	1	71.6			3.6	235.1	1.40
18	.1650E+01	.7881E+01	.1868E+03	.7496E+00	10.2	242.2	1	75.9			3.6	248.9	1.40
19	.1737E+01	.8443E+01	.1873E+03	.7470E+00	11.0	243.0	1	79.9			3.5	262.0	1.39
20	.1820E+01	.8986E+01	.1885E+03	.7448E+00	11.7	244.6	1	83.7			3.5	274.5	1.39
21	.1898E+01	.9512E+01	.1892E+03	.7429E+00	12.3	245.4	1	87.3			3.5	286.3	1.39
22	.1973E+01	.1002E+02	.1897E+03	.7414E+00	13.0	246.1	1	90.7			3.5	297.6	1.38
23	.2044E+01	.1051E+02	.1897E+03	.7430E+00	13.6	246.1	1	94.0			3.5	308.3	1.39
24	.2111E+01	.1098E+02	.1897E+03	.7531E+00	14.2	246.1	1	97.1			3.6	318.4	1.41
25	.2175E+01	.1143E+02	.1909E+03		14.8	247.7	1	100.0				328.1	

..... MEASURES OF MERIT OF COMPUTATION .....

(VOLUMES COMPUTED FOR ONE FURROW)

COMPUTATIONAL VOLUME BALANCE VQ\* = .1604E+03 VZ\* = .3523E+02 VRO\* = .1251E+03 ..... RELATIVE VOLUME ERROR = -.2764E-04

SYNOPSIS OF RESULTS OF IRRIGATION

STREAM 1		HOURS	MINUTES	DIMENSIONLESS	
T CO	(TIME OF CUT OFF)	3.47	208.00	.1604E+03	
T L	(TIME ADVANCE ENDS)	.25	14.83	.1143E+02	
T R	(TIME RECESSION STARTS AT UPSTREAM END)	3.61	216.39	.1668E+03	
T FR	(TIME RECESSION STARTS AT DOWNSTREAM END)	4.13	247.66	.1909E+03	
T E	(TIME ALL SURFACE WATER DISAPPEARS)	4.13	247.66	.1909E+03	
VOLUMES ARE GIVEN PER UNIT WIDTH OF FIELD					
V Q1 HYD	(APPLIED VOLUME -- GROSS)	178.7	16.60	.7609E+01	
V BK FLW	(VOLUME OF BACKFLOW AFTER CUTOFF)	.0	.00	-.8688E-05	
V Q	(NET INFLOW VOLUME)	178.7	16.60	.7609E+01	
V Z	(INFILTRATED VOLUME)	39.3	3.65	.1672E+01	
V RO	(RUNOFF VOLUME)	139.4	12.95	.5937E+01	
INFILTRATED DEPTHS REPRESENT VOLUMES PER UNIT FIELD AREA					
Y MAX U	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT UPPER END)	.15 FOOT	4.72 CM	.9941E+00	
Y MAX D	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT LOWER END)	.00 FOOT	.00 CM	.0000E+00	
Y MAX	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT ANY POINT)	.15 FOOT	4.72 CM	.9941E+00	
X YMAX	(LOCATION OF POINT OF MAXIMUM DEPTH)	.00 FOOT	.00 M	.0000E+00	
W P MAX	(MAXIMUM WETTED PERIMETER OF STREAM)	.89 FOOT	27.28 CM	.5749E+01	
Z MIN	(MINIMUM DEPTH OF INFILTRATION)	1.38 INCH	3.52 CM	.7414E+00	
Z MAX	(MAXIMUM DEPTH OF INFILTRATION)	1.51 INCH	3.83 CM	.8064E+00	
Z LQ	(AVERAGE LOW-QUARTER DEPTH OF INFILTRATION)	1.39 INCH	3.54 CM	.7461E+00	
Z REQ	(REQUIRED DEPTH OF INFILTRATION)	5.36 INCH	13.62 CM	.2871E+01	
Z Q	(AVERAGE APPLIED DEPTH VQ/L)	6.53 INCH	16.60 CM	.3498E+01	
Z AVG	(AVERAGE INFILTRATED DEPTH VZ/L)	1.44 INCH	3.65 CM	.7685E+00	
Z RO	(AVERAGE DEPTH OF RUNOFF VRO/L)	5.10 INCH	12.95 CM	.2730E+01	
Z DP ZREQ	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON GIVEN REQUIRED DEPTH)	.00 INCH	.00 CM	.0000E+00	
Z DP ZMIN	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON ZREQ = ZMIN)	.05 INCH	.13 CM	.2713E-01	
Z DP ZLQ	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON ZREQ = ZLQ)	.04 INCH	.11 CM	.2287E-01	
Z U ZREQ	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO REQUIRED DEPTH)	1.44 INCH	3.65 CM	.7685E+00	
Z U ZMIN	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO ZMIN)	1.38 INCH	3.52 CM	.7414E+00	
Z U ZLQ	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO ZLQ)	1.39 INCH	3.54 CM	.7457E+00	
UC C	(CHRISTIANSEN UNIFORMITY COEFFICIENT) (WEIGHTED)			.979	
UC H	(HSPA UNIFORMITY COEFFICIENT)			.975	
DU	(DISTRIBUTION UNIFORMITY ZMIN/ZAVG)			.965	
DU LQ	(LOW-QUARTER DISTRIBUTION UNIFORMITY ZLQ/ZAVG)			.971	
RP	(RUNOFF FRACTION IN PERCENT VRO/VQ)			78.03%	
IE	(IRRIGATION EFFICIENCY ZU/ZQ)	21.97%	21.19%	21.32%	
UZ	(USEFUL FRACTION OF INFILTRATED VOLUME ZU/ZAVG)	1.000	.965	.970	
SE	(STORAGE EFFICIENCY ZU/ZREQ)	26.77%	100.00%	99.95%	
AAP	(PERCENT OF TOTAL AREA ADEQUATELY IRRIGATED)	.00%	100.00%	86.60%	
DR	(DEFICIENCY RATIO, AVERAGE DEFICIT IN UNDERIRRIGATED AREA, PERCENT OF ZREQ)	73.23%		.41%	
XEQ ENDED	12:46:13.40				
ELAPSED XEQ TIME:	0: 0:43.22				

SIMULATION EXECUTED 1994 - 12 - 22  
XEQ STARTED 12:46:13.40

\*\*\*\*\* SURFACE-IRRIGATION-FLOW PROGRAM \*\*\*\*\* Version 20: 9/90\*\*

INTERACTIVE USERS -- POSITION PAPER OR CLEAR SCREEN FOR PROMPTS. THEN ENTER (LINE I, TSTMOD) -  
1 FOR A FRESH START ---  
2 TO CHANGE FIELD-DESIGN PARAMETERS -- SO,L,... ---  
3 TO CHANGE MANAGEMENT PARAMETERS -- ZREQ,QIN,TCO, ... ---  
4 TO CHANGE SOLUTION MODES -- SOLMOD,LINMOD,WAZ, ... ---  
5 TO CHANGE NUMERICAL SOLUTION PARAMETERS -- MDENSE/N(STD),DT, ... ---  
6 TO CHANGE DIAGNOSTIC LEVEL AND/OR PLOTTING FLAGS ---  
0 TO STOP ---

0

ANEXO 02

LISTA DE SIMBOLOS E NOTAÇÕES.

## LISTA DE SIMBOLOS E NOTAÇÕES

SIMBOLO	DESCRIÇÃO
A	área da seção transversal de fluxo.
A	área média das seções de montante e jusante do alemento de fluido.
AAD	área total adequadamente irrigada.
$A_0$	área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco.
$A_z$	volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco.
a	expoente da equação de infiltração de KOSTIAKOV.
$a_3$	parâmetro de ajustamento da equação do avanço (equação potência).
$a_4$	parâmetro de ajustamento da equação do avanço (equação parabólica)
$a_c$	aceleração convectiva.
$a_l$	aceleração local.
$a_t$	aceleração total.
B	parâmetro de ajustamento da equação de KOSTIAKOV.
$b_3$	parâmetro de ajustamento da equação do avanço (equação potência).
$b_4$	parâmetro de ajustamento da equação do avanço (equação parabólica)
C	coeficiente da equação empírica da vazão máxima não-erosiva.
$C_1$	coeficiente de ajuste na equação empírica da vazão máxima não-erosiva.
$D_{bi}$	volume de distribuição real da água infiltrada.
DMLMOD	sub-programa do modelo SRFR que define os parâmetros característicos.

$C_{CH}$	parâmetro de ajustamento da equação de Chézy.
$c$	parâmetro de ajustamento de equação de avanço de Willardigon e Bishop.
$d$	parâmetro de ajustamento de equação de avanço de Willardigon e Bishop.
$dx$	comprimento do elemento de fluido.
$DR$	razão de ineficiência.
$DU$	uniformidade de distribuição.
$DULQ$	uniformidade de distribuição no menor quartil.
$E$	espaçamento entre sulcos.
$EUA$	Estados Unidos da América.
$F$	número de Froude.
$F_f$	componente força de atrito da equação de conservação de momento.
$F_g$	componente força peso da equação da conservação de momento.
$F_p$	componente força de pressão da equação da conservação de momento.
$f$	coeficiente empírica da equação de avanço do serviço de conservação dos silos (SC, EUA).
$g$	aceleração da gravidade.
$h$	altura da lâmina d'água na equação de SALAZAR (1977).
$I$	taxa de infiltração por unidade de comprimento = $\partial A_z / \partial t$ .
$IE$	eficiência de irrigação.
$K$	número de estações ao longo do comprimento do sulco.
$k$	coeficiente da equação de infiltração de KOSTIAKOV.
$L$	compeimento do sulco.
$LINMOD$	sub-programa do modelo SRFR que define o grau de linearidade da equação.
$u$	expoente da equação da superfície livre da água.
$m$	massa.
$mv$	quantidade de movimentos.
$n$	constante de rugosidade da fórmula de Manning.

NCYCLE	dado de entrada do programa SRFR que define o número de pulsos da irrigação.
Q	vazão.
$Q_m$	vazão máxima não erosiva.
$Q_0$	vazão na entrada do sulco.
R	raio hidráulico.
ROT	sub-rotina do programa SRFR que define a razão entre o tempo de corte e tempo de irrigação.
RP	fração de run-off em percentagem.
RQ2Q1	sub-rotina do programa SRFR que define o fator de redução de vazão.
$r_y$	parâmetro da equação do balanço de volume.
$r_z$	parâmetro de equação do balanço de volume.
S	declividade do sulco na equação da vazão.
SCS	serviço de conservação dos solos dos Estados Unidos da América.
SE	eficiência de armazenamento.
$S_0$	declividade do fundo do sulco.
SOLMOD	sub-programa do modelo SRFR que processa a escolha do tipo de solução para as equações hidráulicas da irrigação por superfície.
St	declividade média da linha de energia.
S(t)	avanço da frente de onda na equação da potência.
SRFR	Surface Furrow. Programa desenvolvido por STRELKOFF (1990).
SRFR.DAT	arquivo de entrada de dados do programa SRFR.
SRFR.OUT	eficiência de armazenamento.
$T_{CO}$	tempo de irrigação.
$T_E$	tempo de depreção.
$T_{FR}$	tempo de recessão à montante do sulco.
$T_{INF}$	tempo de infiltração.
$T_R$	tempo de recessão à jusante do sulco.
STSMOD	entrada de dados do programa SRFR que define o tipo de simulação do programa.

$T_x$	tempo requerido para que a frente de avanço atinja a distância $x$ .
UCC	coeficiente de uniformidade de Christiansen.
UCH	coeficiente de uniformidade HSPA.
UZ	fração útil de volume infiltrado.
V	velocidade média.
Va	volume aplicado (VQI HID no programa SRFR).
VBX FLW	volume de refluxo depois do corte d'água.
Vd	volume de déficit de água.
$V_{INF}$	volume total de água infiltrada.
$V_{PP}$	volume perdido por percolação profunda.
$V_{RO}$	volume perdido por escoamento superficial.
$V_{RU}$	volume real de água necessária.
$V_U$	volume útil armazenado na zona de raízes.
$V_{UI}$	volume infiltrado nas porções sub-irrigadas do sulco.
$V_Z$	volume final infiltrado por unidade de comprimento dividido pelo espaçamento entre sulcos.
v	vetor velocidade
X	distância da frente de avanço.
x	distância ao longo da direção do fluxo de entrada.
$x_{ui}$	comprimento total da faixa de irrigação que recebe menos que a lâmina requerida de infiltração.
ZQ	lâmina média aplicada.
ZREQ	lâmina requerida de infiltração.
ZRQ	lâmina média de run-off.
Zu	lâmina média útil da infiltração.
ZU ZREP	lâmina infiltrada média $\leq$ ZREQ
ZU ZMIN	lâmina infiltrada média $\leq$ ZMIN
ZU ZLQ	lâmina infiltrada média $\leq$ ZLQ.
Zu(K)	volume infiltrado por unidade de comprimento.
$Z(x, t-T_x)$	lâmina de infiltração à distância $x$ da entrada, no tempo $t$ , na equação de determinação do volume infiltrado $V_z(t)$ .

Z AVG	lâmina infiltrada média.
ZDP REQ	lâmina de percolação profunda média em função da lâmina de infiltração requerida.
ZDP ZUN	lâmina de percolação profunda média em função da lâmina de infiltração mínima.
ZDP ZLQ	lâmina de percolação profunda média em função da lâmina de infiltração no menor quartil.
ZLQ	lâmina de infiltração média no menor quartil.
ZMAX	lâmina máxima de infiltração.
ZMIN	lâmina mínima de infiltração.
YMAX	lâmina superficial máxima.
YMAX O	lâmina superficial máxima à jusante do sulco.
YMAX U	lâmina superficial máxima à montante do sulco.
y	lâmina superficial d'água.
$\alpha_2$	parâmetro de ajustamento da equação de SALAZAR (1977).
$\alpha_3$	parâmetro de ajustamento da equação de SALAZAR (1977).
$\gamma$	peso específico.
$\lambda$	constante de rugosidade da equação de Sayre-Albertson.
$\Sigma F$	somatório de forças na segunda lei de Newton.