

DESENVOLVIMENTO DE UM " SOFTWARE " PARA O DIMENSIONAMENTO  
DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS VIA  
BALANÇO DE VOLUME

C342637

Disponível

RENÉ NENE CHIPANA RIVERA

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

631.587  
R522d  
1995  
ex. 2

FORTALEZA - 1995

UFC/BU/BCT 23/05/1997



R656313 Desenvolvimento de um "software"  
C342637 para o  
T631.587

R522d

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

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)

---

R522d Rivera, René Nene Chipana.

Desenvolvimento de um "software" para o dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos via balanço de volume / René Nene Chipana Rivera. – 1995.  
110 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 1995.

Orientação: Prof. Dr. Francisco de Souza.

Coorientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

1. Engenharia Agrícola. I. Título.


CDD 630

---





Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Agronomia com Área de concentração em Irrigação e Drenagem, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se a disposição dos interessados na Biblioteca Central e no departamento de Engenharia Agrícola da referida universidade.


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

  
René Nene Chipana Rivera

DISSERTAÇÃO APROVADA EM:

  
Francisco de Souza, PhD  
Orientador da Dissertação

  
Adunias dos Santos Teixeira, M.Sc.  
Co-Orientador da Dissertação

  
Moisés Custódio Saraiva Leão, PhD  
Conselheiro

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida.

Al Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (PEC/PQ CAPES), por ter-me selecionado e pelo apoio financeiro.

Al Prof. Francisco de Souza, pela orientação, incentivo e encaminhamento na arte da irrigação por superfície, além da colaboração recebida no decorrer do curso.

À minha mãe Eva pelo constante apoio e estímulo outorgado, mesmo à distância, sempre na procura e na esperança que virão tempos melhores.

Al Prof. Luiz Gonzaga A meu primeiro mestre pelos sábios ensinamentos e contribuição a meu pai Jorge, profissional.

Al Prof. Moisés Custódio Saraiva Leão pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência e boa vontade que sempre teve conosco.

## DEDICO

Aos Professores Luiz Carlos Uchoa Saunders e Paulo Teodoro de Castro pela simplicidade e praticidade de suas aulas.

Al colega Luiz Carlos Almeida de Castro, pela cooperação na coleta dos dados de campo.

Aos colegas e amigos do curso Rosa Meire, Luciano, Sales, Joséaldo, Eurípede, Luiz Carlos e Renato, pela sua amizade e apoio.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.



## AGRADECIMENTOS

### SUMÁRIO

À Universidade Federal do Ceará por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida. página 1

Ao Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (PEC/PG CAPES), por ter-me selecionado e pelo apoio financeiro. página 2

LISTA DE TABELAS..... página 3

Ao Prof. Francisco de Souza, pela orientação, incentivo e encaminhamento na arte da irrigação por superfície, além da colaboração recebida no decorrer do curso. página 4

ABSTRACT..... página 5

Ao Mestre e amigo Adunias dos Santos Teixeira pela dedicação ao presente trabalho e desinteressada ajuda nos momentos mais críticos. página 6

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS..... página 7

2.2 Ao Prof. Luiz Gonzaga Rebouças Ferreira, pelos sábios ensinamentos e contribuição a minha formação profissional. página 8

2.2.2 DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS..... página 9

2.3 Ao Prof. Moisés Custódio Saraiva Leão pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência e boa vontade que sempre teve conosco. página 10

3.0 METODOLOGIA..... página 11

3.1 Aos Professores Luiz Carlos Uchoa Saunders e Paulo Teodoro de Castro pela simplicidade e praticidade de suas aulas. página 12

3.1.1 Programa SIDIE..... página 13

3.1.2 Ao colega Luiz Carlos Almeida de Castro, pela cooperação na colheita dos dados de campo. página 14

3.1.1.4 Programa SDIST..... página 15

3.1.1.5 Aos colegas e amigos do curso Rosa Meire, Luciano, Sales, Josualdo, Eunildo, Luiz Carlos e Bitonho, pela sua amizade e apoio. página 16

3.1.2 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS..... página 17

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho. página 18



## SUMÁRIO

3.1.2.1 Dados Básicos.....	26
3.1.2.2 Cálculos Comuns aos Sistemas.....	página
3.1.2.3 Dimensionamento do Sistema de Irrigação por Sulcos	
LISTA DE FIGURAS.....	vii
3.1.2.4 Dimensionamento do Sistema de Irrigação por Sulcos	
LISTA DE TABELAS.....	ix
3.1.2.5 Dimensionamento do sistema com Reuso da Água de	
RESUMO.....	xi
3.1.2.6 Análises de Performance de Irrigação.....	60
ABSTRACT.....	xiii
3.2.1 OBTENÇÃO DE DADOS DE CAMPO.....	65
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	3
2.2 A IRRIGAÇÃO POR SULCOS.....	4
2.2.1 GENERALIDADES.....	4
2.2.2 DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS.....	5
2.2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS.....	10
2.3 EMPREGO DE PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO NA IRRIGAÇÃO.....	17
2.4 DESENVOLVIMENTO DE UM "SOFTWARE" EM LINGUAGEM PASCAL..	19
3.0 METODOLOGIA.....	22
3.1 DESENVOLVIMENTO DO "SOFTWARE".....	22
3.1.1 ESTRUTURAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS.....	22
3.1.1.1 Programa SIDIS.....	23
3.1.1.2 Programa SDISC.....	25
3.1.1.3 Programa SDISR.....	25
3.1.1.4 Programa SDIST.....	26
3.1.1.5 Programa SAIS.....	27
3.1.1.6 Programa SLAR.....	27
3.1.1.7 Programa SPAAS.....	27
3.1.2 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS E DETALHAMENTO DOS ALGORITMOS.....	28

## LISTA DE FIGURAS

página

3.1.2.1	Dados Básicos.....	28
3.1.2.2	Cálculos Comuns aos SiStemas.....	31
3.1.2.3	Dimensionamento do Sistema de Irrigação por Sulcos Convencionais.....	36
3.1.2.4	Dimensionamento do Sistema de Irrigação por Sulcos com Redução da Vazão.....	40
3.1.2.5	Dimensionamento do Sistema com Re-uso da Água de Escoamento.....	51
3.1.2.6	Análises da Performance da Irrigação.....	60
3.2	OBTENÇÃO DE DADOS PARA A VALIDAÇÃO DO PROGRAMA.....	65
3.2.1	OBTENÇÃO DE DADOS DE CAMPO.....	65
4.0	DESCRIÇÃO E UTILIZAÇÃO DO "SOFTWARE".....	68
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	73
5.1	VALIDAÇÃO DO "SOFTWARE".....	73
5.1.1	SULCOS CONVENCIONAIS.....	74
5.1.2	SULCOS COM REDUÇÃO DA VAZÃO.....	77
5.1.3	SULCOS COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO.....	81
5.1.4	DADOS DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DE MORADA NOVA.....	84
5.2	APLICAÇÃO DO SIDIS PARA A ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS DE PROJETO.....	89
5.2.1	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (n).....	89
5.2.2	COEFICIENTES DA FORMA DO SULCO ( $\rho_1$ e $\rho_2$ ).....	92
5.2.3	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE GARTON.....	95
5.3	COMPARAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS COM O SIDIS COM OUTROS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SULCOS CONVENCIONAIS.....	100
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	102
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
8.0	ANEXO.....	111
3.13	Fluxograma para calcular a relação entre o coeficiente de rugosidade e vazão, para a determinação da vazão admissível.....	38
3.14	Fluxograma para a apresentação do dimensionamento mais apropriado.....	39



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
3.1	Estrutura do "software".....	24
3.2	Fluxograma para a determinação do tempo de oportunidade.....	33
3.3	Fluxograma para o cálculo da vazão, área e tempo de avanço.....	37
3.4	Fluxograma para o cálculo da eficiência de aplicação (sulcos convencionais).....	41
3.5	Fluxograma para a determinação dos possíveis "layouts" do campo.....	42
3.6	Fluxograma para a determinação da melhor performance do sistema.....	44
3.7	Fluxograma para determinar o "layout" mais adequado.....	45
3.8	Fluxograma para o cálculo da vazão para a fase de avanço ( $Q_{av}$ ).....	47
3.9	Fluxograma para a determinação da vazão reduzida e possíveis "layouts" do campo....	49
3.10	Fluxograma para a determinação da vazão e tempo de irrigação para cada "layout" e escolha da disposição mais apropriada.....	52
3.11	Fluxograma para calcular as vazões, tempo de avanço e os coeficientes $\rho$ e $r$ para diferentes "layouts" do campo.....	53
3.12	Fluxograma para a determinação de "DPR", "TWR" e "Ea" para diferentes "layouts"....	57
3.13	Fluxograma para calcular a relação entre o número de lotes e vazão total e para a escolha da vazão adequada.....	58
3.14	Fluxograma para apresentação do dimensionamento mais apropriado.....	59



FIGURA

PÁGINA

## LISTA DE TABELAS

3.15	Fluxograma para determinar a performance do sistema com "L" e "Qs" variáveis.....	61
3.16	Fluxograma para ordenar de forma decrescente os dados em função da eficiência de aplicação.....	64
4.1	Estrutura do funcionamento do "software" "SIDIS".....	71
5.2	Curvas de avanço e recessão e lâmina infiltrada (primeira irrigação).....	86
5.2	Curvas de avanço e recessão e lâmina infiltrada (terceira irrigação).....	88
5.3	"Layout" final com base na melhor performance do sistema.....	76
5.4	Relação dos tempos de avanço, tempos de oportunidade e razões para as primeiras e irrigações subsequentes.....	77
5.5	Configuração do sistema de irrigação por sulcos com redução da vazão.....	74
5.6	Tempo de irrigação e desperdício do sistema.....	79
5.7	Configuração final do sistema de acordo com a melhor performance.....	80
5.8	Vazão por sulco (l/s/m), tempo de irrigação para todo o campo (dias) e para os lotes (dias).....	80
5.9	Relação da vazão por sulco, tempo de avanço e tempo de oportunidade para sistemas de irrigação com reruso.....	81
5.10	Configuração do sistema com reruso da água de escoamento para diferentes valores de vazão por sulco.....	82
5.11	Relação entre a vazão total e o número de lotes.....	83
5.12	Configuração final do sistema segundo a melhor performance.....	83

TABELA

PÁGINA

## LISTA DE TABELAS

5.13	Confronto entre os dados observados no campo e estimados pelo SÍDIS (primeira irrigação).....	85
TABELA	confronto entre os dados observados no campo e estimados pelo SÍDIS (terceira irrigação).....	87
3.1	Relação entre as formas típicas do sulco e os coeficientes empíricos $\rho_1$ e $\rho_2$ .....	29
3.2	Parâmetros de infiltração de KOSTIAKOV-LEWIS (adaptado por GHARBI, 1984).....	30
5.1	Dados utilizados nas simulações.....	74
5.2	"Layout" e resultados da simulação da irrigação para sulcos convencionais (WALKER e SKOGERBOE, 1977).....	75
5.3	"Layout" final com base na melhor performance do sistema.....	76
5.4	Relação dos tempos de avanço, tempos de oportunidade e vazões para as primeiras e irrigações subsequentes.....	77
5.5	Configuração do sistema de irrigação por sulcos com redução da vazão.....	78
5.6	Tempo de irrigação e desempenho do sistema.....	79
5.7	Configuração final do sistema de acordo com a melhor performance.....	80
5.8	Vazão por sulco ( $m^3/min$ ), tempo de irrigação para todo o campo (dias) e para um lote (min)...	80
5.9	Relação da vazão por sulco, tempo de avanço e tempo de oportunidade para sistemas de irrigação com re-uso.....	81
5.10	Configuração do sistema com re-uso da água de escoamento para diferentes valores de vazão por sulco.....	82
5.11	Relação entre a vazão total e o número de lotes.	83
5.12	Configuração final do sistema segundo a melhor performance.....	83



TABELA

PÁGINA

DESENVOLVIMENTO DE UM "SOFTWARE" PARA O DIMENSIONAMENTO

5.13 Confronto entre os dados observados no campo e os dados estimados pelo SIDIS (primeira irrigação)..... 85

5.14 Confronto entre os dados observados no campo e os dados estimados pelo SIDIS (terceira irrigação)..... 87

5.15 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (dados de WALKER e SKOGERBOE, 1987)... 90

5.16 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (solo arenoso)..... 91

5.17 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (solo argiloso)..... 91

5.18 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função dos fatores empíricos de forma do sulco ' $\rho_1$ ' e ' $\rho_2$ '..... 93

5.19 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função do fator empírico ' $\rho_1$ ' e mantendo ' $\rho_2$ ' constante ( $\rho_2=1,352$ )..... 94

5.20 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função do fator empírico ' $\rho_2$ ' e mantendo ' $\rho_1$ ' constante ( $\rho_1=0,582$ )..... 95

5.21 Efeito do tipo de solo e comprimento na performance do sistema com redução da vazão para o método de GARTON..... 96

5.22 Efeito do comprimento do sulco e lâmina de água na vazão e tempo de avanço sob condições de redução da vazão..... 98

5.23 Efeito do tipo de solo, na performance do sistema com redução da vazão para o método de GARTON (G) e o método do CRIDDLE (1/4)..... 99

5.24 Comprimento máximo recomendável do sulco obtido através de três métodos..... 100



## DESENVOLVIMENTO DE UM " SOFTWARE " PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS VIA BALANÇO DE VOLUME

Autor: René Nene Chipana Rivera

Orientador: Prof. PhD Francisco de Souza

Co-orientador: Prof. M.Sc. Adunias dos Santos Teixeira

### RESUMO

O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um programa computacional ("software") denominado SIDIS para o dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos abertos e em declive em três variantes (sulcos convencionais, com redução da vazão e com re-uso da água de escoamento). Para tal foi empregado o modelo de balanço de volume. O estudo foi desenvolvido em duas etapas: a primeira consistiu na elaboração do "software" e a segunda na validação do programa.

O "software" foi escrito na linguagem TURBO PASCAL Versão 7.0, e consta de sete programas executáveis: 1) O SIDIS é o programa principal e faz o gerenciamento e controle dos outros; 2) O SDISC realiza o dimensionamento dos sistemas de irrigação por sulcos convencionais; 3) O SDISR efetua o dimensionamento dos sistemas com redução da vazão; 4) O SDIST faz os cálculos para os sistemas com re-uso da água de escoamento; 5) O SAIS realiza a análise da irrigação; 6) O SLAR grava e lê os resultados obtidos com os programas anteriores e 7) SPAAS, que é o programa de ajuda ao usuário.

Para a validação do "software" gerado, foram utilizados dados empregados por outros autores e dados coletados no distrito de irrigação de Morada Nova. Os resultados obtidos nas simulações indicam que o modelo de balanço de volume dá uma boa aproximação do que acontece no campo, devendo-se as diferenças à variabilidade espacial e temporal das características de

infiltração do solo. Observou-se também que do ponto de vista do dimensionamento, os parâmetros empíricos que expressam a forma do sulco podem ser considerados constantes.

No o caso de sulcos com redução da vazão, os resultados mostraram que na maioria dos casos houve ganho no desempenho do sistema. Porém para certos tipos de solos a metodologia proposta por GARTON (1966) é inaplicável. Com relação aos sistemas com re- uso da água de escoamento, estes apresentaram os maiores índices de eficiência de aplicação, mas para certas condições como sulcos muito compridos, ou solos de textura arenosa a performance foi baixa.

Desta forma, comprovou-se o funcionamento adequado do SIDIS como ferramenta para simular e dimensionar os sistemas de irrigação por sulcos.

The study was done in two stages: first, the design of the software and second, the validation of the program.

The software was written in FORTRAN version 7.0 and consists of seven programs: 1) SIDIS, the main program that manages and controls the others; 2) SITSC that designs the irrigation systems of common furrows; 3) SPISB, that designs systems with cut-back inflow; 4) SDIOT, makes calculations for systems with reuse of runoff water; 5) SDIS, that makes the irrigation analysis; 6) SLAR, that makes the reading and recording of the data from the other programs and 7) SPAPC, that is the users help program.

For the validation of the software, were used data obtained by others researchers and data from the "Morada Nova" irrigations project. The results obtained in the simulations indicate that the balance of volume model gives a good approximation to the field situation and the differences are given to the spatial and temporal variability of the soil infiltration characteristics. Also, from the design viewpoints, the empirical parameters expressing the furrows shape can be considered constant.



DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TO DESIGN FURROW IRRIGATION  
SYSTEMS USING BALANCE OF VOLUME

Author: René Nene Chipana Rivera

Adviser: Prof. PhD Francisco de Souza

Co-adviser: Prof. M.Sc. Adunias dos Santos Teixeira

### ABSTRACT

The objective of this work was the development of a computer program named SIDIS, to design gradient open furrow irrigation systems with three options (conventional, with flow reduction and with reuse of runoff water), using the balance of volume model. The study was done in two stages: first the design of the software and second the validation of the program.

The software was written in TURBO PASCAL version 7.0 and consists of seven programs: 1) SIDIS, the main program that manages and controls the others; 2) SDISC that designs the irrigation systems of common furrows; 3) SDISR, that designs systems with cut-back inflow; 4) SDIST, makes calculations for systems with reuse of runoff water; 5) SAIS, that makes the irrigation analysis; 6) SLAR, that makes the reading and recording of the data from the other programs and 7) SPAAS, that is the users help program.

For the validation of the software, were used data obtained by others researchers and data from the "Morada Nova" irrigations project. The results obtained in the simulations indicate that the balance of volume model gives a good approximation to the field situation and the differences are given to the spatial and temporal variability of the soil infiltration characteristics. Also, from the design viewpoints, the empirical parameters expressing the furrows shape can be considered constant.



For the case of the furrows with cut-back inflow, in most cases the system's performance was increased. But for certain soils, the methodology proposed by GARTON (1966) is useless. Regarding the systems with reuse of runoff water, they show the best application efficiency indexes, but the performance was low for certain conditions like very long furrows or sandy soils.

Concluding, we can say that the SIDIS program behaved well as a tool to simulate and design furrow irrigation system.

baixos níveis de energia. Mas a facilidade de aplicação e a possibilidade de utilização em solos arenosos e com baixa capacidade de infiltração, são vantagens que os tornam interessantes para a irrigação de áreas com solos arenosos e com baixa capacidade de infiltração.

Dentre os sistemas de irrigação artificial, os sistemas de irrigação por sulcos apresentam uma série de vantagens, permitindo a utilização de águas de baixa qualidade, além de apresentar menores custos de operação.

Nos últimos vinte anos houve avanços significativos na tecnologia de irrigação por sulcos, com o uso de computadores para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação hidráulica de irrigação. Estes modelos são úteis para analisar a irrigação. Porém a complexidade dos cálculos matemáticos envolvidos fez com que alguns destes (hidráulico, zero-inércia e onda cinemática), não sejam utilizáveis do ponto de vista prático. Por este motivo os modelos são simplificados, como o de "balanço de volume", tornando-se mais simples, pois o procedimento baseia-se em cálculos algébricos e evita provavelmente a performance da irrigação. A simulação tem de ser aplicada em testes de campo e evita a realização de testes de campo, aplicando os resultados de testes.

Embora o modelo de balanço de volume seja simples e rápido, a obtenção de resultados matemáticos é complexa, além de grande quantidade de variáveis envolvidas, tornando a obtenção de resultados de irrigação. Mas, devido a complexidade apresentada com uma ferramenta para solução de testes

## 1. INTRODUÇÃO

A prática da irrigação por superfície é milenar e abrange aproximadamente 95% das terras irrigadas no mundo, que entre outras vantagens sobre os demais sistemas de irrigação requer baixos níveis de energia. Mas a sustentabilidade da agricultura irrigada através deste sistema, depende dos melhoramentos e inovações a serem feitas, devido à crescente demanda alternativa de água, e o desvio da água da irrigação para outros usos.

Dentre os sistemas de irrigação superficiais, os sulcos apresentam uma melhor capacidade para o manejo da água, permitindo uma maior tolerância às condições topográficas adversas, além de apresentar menores perdas por evaporação.

Nos últimos vinte anos houve avanços significativos na tecnologia da irrigação por superfície, como é o caso do desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação hidráulica da irrigação. Estes modelos são meios efetivos para analisar a irrigação. Porém a complexidade dos cálculos matemáticos envolvidos fez com que alguns destes (hidrodinâmico, zero-inércia e onda cinemática), não sejam utilizáveis do ponto de vista prático. Por este motivo os modelos mais simplificados, como o de "balanço de volume", começaram a se popularizar, pois o procedimento baseia-se em cálculos algébricos e simula razoavelmente a performance da irrigação. A simulação tem um aspecto fundamental que é evitar a realização de testes de campo, implicando na redução de custos.

Embora o modelo de balanço de volume seja simples, as equações e cálculos matemáticos envolvidos no dimensionamento, além da grande quantidade de variáveis a considerar, dificultam sobremaneira a elaboração de projetos de irrigação. Neste ponto a computação aparece como uma ferramenta para solucionar esses



problemas. Assim, a utilização de programas de computador ("software") na área da irrigação, permite contornar um aspecto muito questionado aos sistemas de irrigação por superfície, a automação. Porém, existem poucos "software" para o dimensionamento da irrigação por sulcos..

Por conseguinte, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa de computador para simular e dimensionar sistemas de irrigação por sulcos abertos e em declive (sulcos convencionais, sulcos com redução da vazão e sulcos com re-uso da água de escoamento), empregando os conceitos do modelo de balanço de volume.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo SKOGERBOE (1990) e PEREIRA et al. (1994), através da história os recursos hídricos e o desenvolvimento da irrigação têm exercido grande influência no desenvolvimento humano. As civilizações têm prosperado e sucumbido como resultado da agricultura irrigada. Em todo o mundo a água tem sido o fator mais limitante para o rendimento das culturas e produção de alimentos, influenciando também na localização dos núcleos habitacionais, crescimento de emprego, desenvolvimento regional, etc.

GOLDBERG (1974) e SKOGERBOE (1990), indicam que em mais de 90% das terras irrigadas no mundo predomina a irrigação superficial. Que para WALKER (1989) apresenta como principal problema a baixa eficiência de aplicação (em torno de 40%), provocada especialmente pelas perdas por percolação e escoamento superficial. Esta baixa eficiência deve-se sobretudo à falta de compreensão da hidráulica da irrigação por superfície, que começou a ser elucidada com os trabalhos de STRELKOFF em 1977.

A respeito, SKOGERBOE (1990), comenta que nas últimas décadas houve vários melhoramentos tecnológicos na irrigação, como o desenvolvimento da irrigação por aspersão e por gotejamento, o nivelamento de terras sob o sistema laser e o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever a irrigação superficial.

Do mesmo modo, WALKER (1993), cita que as pesquisas e melhoramentos feitos em irrigação por superfície no período de 1973 a 1993 ofuscaram a soma de todos os feitos na área até 1973, e que as descobertas nas próximas duas décadas talvez não sejam



muito significantes. Dos vários avanços obtidos, segundo ele são quatro os mais significativos:

- 1º o desenvolvimento de modelos hidráulicos para a simulação dos sistemas de irrigação por superfície;
- 2º a descoberta do conceito de fluxo em onda;
- 3º a adaptação do sistema laser para o nivelamento e sistematização de terras;
- 4º o desenvolvimento de novas metodologias de avaliação em tempo real.

O desenvolvimento desta ciência poderá ser favorecido com o crescente emprego de computadores para a resolução das complexas equações matemáticas que envolvem sua hidráulica, pois o fenômeno da irrigação abrange o conhecimento de uma série de fatores como dimensões da área, topografia, solo, clima, suprimento de água, etc (SOUZA, 1994).

## 2.2. A IRRIGAÇÃO POR SULCOS

### 2.2.1. GENERALIDADES

WALKER e SKOGERBOE (1987), afirmam que a irrigação por sulcos consiste na inundação de pequenos canais, onde a água aplicada infiltra-se através do perímetro molhado e move-se vertical e lateralmente no perfil do solo.

De acordo com OLITTA (1987), o método de irrigação por sulcos constitui o processo de aplicação de água mais conhecido e usado em todo o mundo, sendo inclusive um dos poucos métodos com tradição no Brasil. BERNARDO (1986), afirma que os custos de instalação e operação deste sistema não são elevados, principalmente no que se refere ao consumo de energia, constituindo, portanto, um dos métodos de irrigação com menor custo de implantação e operação.

Para WALKER (1989), dentre as desvantagens da irrigação por sulcos destacam-se a acumulação de sais entre sulcos; a dificuldade de movimento de maquinaria agrícola; incremento da possibilidade de erosão com vazões não adequadas; alta necessidade de mão de obra para operar eficientemente o sistema; e a dificuldade de automação.

### 2.2.2. DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

GATES e CLYMA (1984), ARRUDA (1993), e diversos autores são unânimes ao afirmar que a elaboração de projetos de irrigação é o ponto de partida para quem quer utilizar alguma técnica de irrigação, tendo este o objetivo final de mostrar as diferentes opções para a escolha de um dos sistemas de irrigação, visando sempre selecionar valores dos parâmetros de irrigação para uma eficiente aplicação da água, o que permitirá planejar melhor as atividades de operação, manutenção do sistema e, por fim, a avaliação econômica do projeto.

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), antes do dimensionamento do sistema de irrigação por superfície devem ser feitas considerações prévias em relação à sua performance. Em outras palavras, a uniformidade e eficiência podem ser previstas conhecendo-se parâmetros como vazão, tempo de aplicação, características de infiltração, declividade, comprimento do campo e lâmina de água a aplicar.

Conforme CUENCA (1989), e FRIZZONE (1993), existem duas óticas de projeto de sistemas de irrigação por superfície: aquela baseada em guias obtidos através de testes empíricos no campo ("regra da carona"), e a escola que prefere aplicar sofisticada análise hidráulica. Já AGUIAR (1994), indica que 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 e d) modelos matemáticos.



Tradicionalmente o dimensionamento da irrigação por sulcos é feito através de aproximações empíricas. Guias gerais para a seleção apropriada das variáveis do projeto para condições de locais específicos foram indicados em MARR (1967). De forma similar mas com informações mais detalhadas e baseados em dados empíricos, tabelas indicando comprimento dos sulcos segundo o tipo de solo, declividade e lâmina de água aplicada foram recomendadas por WITHERS e VIPOND (1974) e BOOHER (1974). Critérios gerais para seleção do comprimento mais adequado, vazão do projeto e tempo de irrigação foram apresentados por CRIDDLE et al. (1956).

CRIDDLE et al. (1956), recomendam que o comprimento do sulco mais adequado para certas condições do terreno deve ser determinado através de ensaios de campo, sugerindo que o comprimento do sulco deve ser tal que a água atinja o final do campo em 1/4 do tempo de oportunidade (regra de um quarto). OLITTA (1987), indica que apesar desta generalização ter sido largamente usada, ela não é totalmente adequada devido às variações das características de infiltração dos solos.

As soluções hidráulicas requerem mais dados de campo que as relações empíricas. Devendo o projetista ter maior grau de confiança nas primeiras (CUENCA, 1989). Os critérios empíricos podem ser empregadas para uma primeira aproximação da factibilidade do projeto, que pode ser extremamente útil nas discussões iniciais com os clientes. Os resultados das soluções hidráulicas para as diferentes opções do projeto não devem ser consideradas absolutas mas uma aproximação da solução, isto porque os solos em geral apresentam grande variabilidade espacial e temporal.

O Serviço de Conservação de Solos (SCS-USDA) dos Estados Unidos (1979) desenvolveu um procedimento semi-racional usando a aproximação do balanço de volume. Na década de 80 este procedimento foi muito utilizado, pois elimina as dificuldades apresentadas para outros métodos e permite um dimensionamento mais confiável (CUENCA, 1989; RODRIGUES e SOUZA, 1991).

O modelo do SCS é utilizado para selecionar valores das variáveis do sistema e variáveis operacionais do projeto. Em geral um grande número de possíveis combinações dessas variáveis são analisadas até obter-se a combinação dos resultados que produzem a melhor performance do sistema. As variáveis do sistema consideradas no projeto são o comprimento do sulco, o espaçamento entre sulcos, a declividade do sulco, a seção transversal do sulco e a lâmina de água aplicada. As variáveis operacionais são a vazão por sulco e o tempo total.

GATES e CLYMA (1984), e REDDY e CLYMA (1987), baseados nas equações do SCS-USDA, apresentaram sistemas de dimensionamento por sulcos para melhorar a performance estacional e a performance econômica, respectivamente.

Empregando a mesma metodologia, RODRIGUES e SOUZA (1991), dimensionaram um sistema de irrigação por sulcos abertos e em declive, analisando as relações entre o comprimento do sulco, a vazão, a declividade e a lâmina líquida e sua influência sobre o tempo de irrigação, percolação profunda, escoamento superficial e eficiência de aplicação.

Visando facilitar o uso da metodologia do SCS-USDA (1979), MERRIAM (1988), apresentou um procedimento gráfico simplificado capaz de determinar parâmetros como eficiência potencial de aplicação, uniformidade de distribuição da água no sulco, e perdas por percolação e escoamento.

Para superar alguns problemas inerentes à aplicação das metodologias anteriores, WALKER e SKOGERBOE (1987) desenvolveram uma metodologia racional e computadorizada de elaboração de projetos de irrigação por superfície, baseada no modelo de balanço de volume. Este método apresenta vantagens sobre os conceitos teóricos dos modelos hidrodinâmicos e zero-inércia, principalmente porque simula a irrigação com alto grau de confiança e sem as complicações dessas abordagens.

PEREIRA (1995), afirma que na atualidade os modelos de simulação são bastante utilizados para projetar sistemas de irrigação. Através de processos iterativos obtém-se a geometria e



os parâmetros de irrigação que produzem os valores máximos dos parâmetros de performance, como uniformidade de distribuição (UD) e eficiência de aplicação (Ea).

CUENCA (1989), afirma que qualquer resultado nas soluções dos problemas do projeto deve ser considerado sob dois critérios: o da exatidão dos dados de entrada e o da adequabilidade das soluções. A entrada de dados simplesmente não garante a precisão nos resultados.

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), o projetista em geral tem um dos dois objetivos ao dimensionar um sistema de irrigação por sulcos: projetar uma nova área de irrigação ou redimensionar um sistema já existente. Porém em ambos casos os dados requeridos podem ser divididos em seis categorias gerais:

1. natureza da fonte de água;
2. topografia do campo;
3. características físicas e químicas do solo;
4. padrão de crescimento da cultura e demanda temporal de água;
5. condições econômicas e de mercado na área do projeto;
6. práticas culturais empregadas na fazenda;

CRIDDLE et al. (1956), OLITTA (1987), WALKER e SKOGERBOE (1987), RODRIGUES e SOUZA (1991), indicam que o procedimento de dimensionamento tem início com a definição dos parâmetros de infiltração (incluindo as mudanças no tempo), a geometria, declividade e comprimento do sulco, lâmina de água e resistência ao fluxo. A taxa de avanço e recessão bem como o nível de performance no campo são estimados para várias combinações de vazão por sulco e tempo de irrigação. Serão selecionados para o projeto aqueles valores que implicam em eficiências mais elevadas.

SCALOPPI (1986) e FRIZZONE (1993), afirmam também que para obter-se alta eficiência e uniformidade, repondo-se a quantidade de água adequada para o desenvolvimento das culturas, deve-se ter uma combinação adequada dos parâmetros envolvidos no dimensionamento, ou seja, comprimento, vazão, tempo de irrigação,

espaçamento entre sulcos, dentre outros. Sugerem ainda que o ponto mais crítico no dimensionamento de sulcos abertos e em declive consiste na previsão da fase de avanço.

Assim, no dimensionamento de um sistema de irrigação por sulcos deve-se obter: (1) vazão por sulco, (2) comprimento do sulco, (3) tempo de aplicação, (4) declividade do sulco, e (5) grau de automação. A declividade e o comprimento do campo são frequentemente especificados pelos fazendeiros em função da eficiência de operação dos equipamentos, restando então como variáveis a determinar a vazão de entrada e o tempo de aplicação.

REDDY e CLYMA (1987) complementam afirmando que no dimensionamento adequado de um sistema de irrigação deve-se considerar retornos econômicos da cultura e custos de operação do sistema, maximizando os benefícios.

Para WALKER e SKOGERBOE (1987), no dimensionamento dos sistemas de irrigação por sulcos normalmente têm-se três alternativas de projeto: (1) sistema de sulcos convencionais, (2) sistemas com redução de vazão e, (3) sistemas com re-uso da água de escoamento.

Os sistemas de irrigação com redução da vazão foram desenvolvidos com a finalidade de incrementar a eficiência de aplicação ( $E_a$ ), reduzindo as perdas por escoamento superficial ("runoff") e percolação profunda. Podem ser empregadas duas estratégias de redução de vazão. A primeira é adequada quando existe disponibilidade de mão de obra ou um elevado nível de automação, capaz de acompanhar a complexa programação ou ajustar a vazão do sulco. Esta estratégia deve prover vazão suficiente no início do sulco para completar a fase de avanço em  $1/4$  do tempo de oportunidade, para posteriormente reduzir a vazão e adicionar-se a um novo lote. Isto é possível com quatro lotes operando simultaneamente e quando se tem um alto nível de manejo da água.

Na segunda estratégia, são projetados para operar em lotes de dois, um na fase de avanço e outro na fase de armazenamento. Assim, tanto na fase de avanço como na fase de armazenamento o tempo será igual ao tempo de oportunidade. Um dos sistemas com



redução de vazão mais comuns foi proposto por GARTON (1966), o qual consiste em dispor orifícios (ou outro sistema de distribuição de água) em canais para derivar duas vazões diferentes aos sulcos (devido às diferenças de carga entre os orifícios).

Quando a água de escoamento é capturada e reutilizada, a eficiência de aplicação pode ser substancialmente melhorada. O dimensionamento deste sistema é muito mais complexo do que o convencional, por terem-se duas fontes de água simultaneamente.

A maior complexidade dos sistemas com re-uso representa a estratégia para recircular a água de drenagem. Uma opção é bombear a água de drenagem do primeiro lote e incrementar o número de sulcos no próximo lote. A outra é empregar a água de drenagem para irrigar outras seções do campo. Em qualquer caso o reservatório e o sistema de bombeamento precisam ser cuidadosamente controlados.

Cada um dos sistemas descritos deve ser suficientemente flexível para se adequar às condições do campo, onde a rugosidade e taxa de infiltração variam consideravelmente de irrigação para irrigação

PEREIRA (1995) ao fazer uma análise do estado dos sistemas de irrigação por sulcos concluiu que os progressos atuais na descrição superficial e subsuperficial do fluxo possibilitam o uso de modelos de simulação com fins de dimensionamento, adotando os "software amigáveis" e outras ferramentas como suporte para as decisões a serem tomadas.

### 2.2.3. MODELOS MATEMÁTICOS DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Vários modelos matemáticos visando descrever o fenômeno da irrigação por superfície foram apresentados na literatura. Estes variam no nível de sofisticação, indo de modelos algébricos, fundamentados no princípio de conservação da massa a modelos mais complexos como os hidrodinâmicos, os quais consistem na solução completa das equações de Saint-Venant (equação da continuidade e

da conservação da quantidade de movimento) que governam o fluxo de água em canais em regime não-permanente e variado (SOUZA, 1984).

KATAPODES e STRELKOFF (1977) comentam que os modelos matemáticos empregados para analisar a irrigação por superfície foram desenvolvidas visando os seguintes objetivos:

a). descrever os processos físicos com uma completa base teórica com o mínimo de dados de campo ou parâmetros experimentais;

b). avaliar numericamente os modelos matemáticos com a finalidade de melhorar sua estabilidade numérica e exatidão;

c). incluir cada fase física da irrigação por superfície, i.e., avanço, armazenamento, depleção e recessão;

d). simplificar a estrutura de execução de cálculos com o mínimo de gasto de tempo.

De acordo com isso, os modelos matemáticos podem ser classificados por ordem decrescente de complexidade, em quatro categorias:

- 1º modelo hidrodinâmico;
- 2º modelo zero-inércia;
- 3º modelo de onda cinemática;
- 4º modelo de balanço de volume.

#### a) MODELO HIDRODINÂMICO

Para SAKKAS e STRELKOFF (1974), os modelos hidrodinâmicos são os mais completos e baseiam-se na solução completa das equações da continuidade e momento (equações de Saint Venant), levando em conta a profundidade de fluxo e a velocidade do fluxo em canais abertos. A solução dessas equações é dificultada pelo fato da velocidade de avanço e recessão não serem conhecidas a priori.

KATAPODES e STRELKOFF (1977), apresentaram um modelo hidrodinâmico para a irrigação, indicando que a solução do modelo



hidrodinâmico é a mais geral e exata. Já Para o caso da irrigação por sulcos, SOUZA (1981) desenvolveu um modelo hidrodinâmico não linear, afirmando que a aproximação hidrodinâmica é a mais sofisticada técnica de solução numérica para as equações de Saint Venant.

BAUTISTA e WALLANDER (1992), desenvolveram um modelo hidrodinâmico da irrigação por sulcos com pontos especificados no espaço.

Devido à complexidade em se relacionar matematicamente a função de infiltração do solo com a geometria do sulco, um modelo hidrodinâmico completo da irrigação não foi ainda desenvolvido.

#### **b) MODELO ZERO INÉRCIA**

Baseados na assunção de que os termos de inércia e aceleração na equação do momento podem ser negligenciados na maioria das condições da irrigação por superfície, STRELKOFF e KATAPODES (1977) propuseram uma solução simplificada chamada de zero-inércia. Nesta condição o número de Froude aproxima-se de zero, Fato que também foi comprovado por SOUZA (1981).

As primeiras aplicações deste modelo limitaram-se às bacias e sistemas de faixas, porém posteriormente ELLIOT et al. (1982) fizeram generalizações para sulcos. O modelo de zero-inércia foi testado para uma faixa ampla de condições de campo, apresentando valores confiáveis.

Neste contexto estão inseridos os trabalhos de SCHMITZ e SEUS(1992), que tomando por base as soluções analíticas das equações de zero inércia, apresentaram um estudo para desenvolver um modelo analítico mais exato e econômico para simular o avanço da água na irrigação por sulcos (ZIFA).

#### **c) MODELO DE ONDA CINEMÁTICA**

Os modelos da análise de onda cinemática ignoram a equação do momento, isto é, desprezam, além dos termos de inércia, o

terceiro termo da equação dinâmica, o gradiente de pressão da água, tornando-se "cinemáticas" (WALKER e SKOGERBOE, 1987, e SCHMITZ e SEUS, 1992).

A hipótese de fluxo uniforme simplifica imensamente a análise hidráulica da irrigação por sulcos, sendo os resultados de simulação satisfatórios, comparados com dados de campo (WALKER e SKOGERBOE, 1987). Contudo, para o caso da irrigação por sulcos, esses modelos também envolvem soluções numéricas complexas com custo computacional elevado (SCHMITZ e SEUS, 1992).

#### d) MODELO DE BALANÇO DE VOLUME

Devido a complexidade dos modelos apresentados, foram desenvolvidos os modelos algébricos, os quais baseiam-se no princípio de conservação da massa ou do balanço de volume. Esta aproximação estabelece que a qualquer momento, o volume total de água fornecido a um sulco é igual a soma dos volumes superficial e infiltrado. Essencialmente esses modelos substituem a equação do momento linear por hipóteses relativas à lâmina ou área da seção transversal no sulco ou faixa. Em geral, a sua aplicação é mais fácil durante a fase de avanço, sendo que a extensão dos mesmos às outras fases do processo de irrigação requer um maior número de hipóteses (LEVIEN e SOUZA, 1987).

Os modelos foram inicialmente desenvolvidos para simular a fase de avanço na irrigação por faixas, ficando a cargo de STRELKOFF e KATAPODES (1977) apresentar o primeiro modelo completo e simplificado para simular todas as fases da irrigação por faixas, bem como o cálculo de escoamento, percolação e curvas de avanço e recessão.

LEVIEN e SOUZA (1987), introduzindo alguns aspectos empíricos como o fator de forma superficial e subsuperficial desenvolveram um modelo algébrico para o fluxo na irrigação por sulcos, visando simular a performance do sistema de irrigação por sulcos abertos e em declive. Os dados de entrada para o



mencionado modelo foram: comprimento, declividade, coeficiente de rugosidade de Manning, parâmetros de infiltração de KOSTIAKOV, fator de forma do sulco, vazão de entrada e tempo de corte. Toda essa informação foi necessária para estimar a distribuição da água e eficiência de aplicação.

Um modelo de avanço em faixas usando o princípio do balanço de volume melhorado foi apresentado por VALIANTZAS (1993), que empregou um ajuste do fator de forma da superfície adicionando-o à equação de movimento de zero-inércia e sendo avaliado no começo e no final da faixa. Por outro lado, ANDRADE (1994), desenvolveu um modelo matemático simplificado também para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos, utilizando células de espaço pré-fixadas e rugosidade variável. O modelo tem por base a associação da equação de Manning para movimento uniforme de água em canais com a equação de infiltração de Kostiakov.

#### - TEORIA DO MODELO DE BALANÇO DE VOLUME

A equação de balanço de volume para um sulco pode ser expressa para a fase de avanço, conforme desenvolvido por WALKER e SKOGERBOE (1987) do seguinte modo:

$$Q.t = V_y + V_z \quad (01)$$

onde Q é a vazão na entrada do sulco durante o tempo t. O produto Q.t (volume) deve ser sempre igual à soma do volume armazenado temporariamente na superfície ( $V_y$ ) e o volume que infiltrou no solo ( $V_z$ ).

Com relação a  $V_y$ , qualquer que seja a forma do perfil superficial da água, pode-se fazer a hipótese de que a área da seção transversal média,  $\bar{A}_y$ , permanecerá constante.

O volume de água sobre a superfície do solo pode ser obtido integrando a área de fluxo sobre a distancia de avanço (WALKER e SKOGERBOE, 1987), expressa pela seguinte relação:

$$V_y = \int_0^{x_a} A_y \cdot \theta dx = \bar{A} \cdot X_a \quad (02)$$

Partindo-se da hipótese de que a lâmina de água na entrada do sulco,  $Y_0$ , corresponde a lâmina normal de fluxo uniforme  $Y_n$  para a vazão aplicada,  $Q$ , a área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco,  $A_0$ , para um dado valor de  $Y_n$  pode ser representada pelo seguinte produto:

$$\bar{A}_y = A_0 \cdot r_y \quad (03)$$

onde  $r_y$  é um fator que expressa a forma do perfil superficial, isto é, a relação entre a área do perfil superficial real e a área do retângulo,  $A_0 \cdot X_a$ . Das equações (02) e (03) tem-se uma nova expressão para  $V_y$ :

$$V_y = A_0 \cdot r_y \cdot X_a \quad (04)$$

A maior dificuldade do procedimento do balanço de volume está na estimativa das áreas médias superficial e infiltrada. O volume infiltrado,  $V_z$ , pode ser visto como sendo a integral da área infiltrada  $A_z$ , ao longo do sulco:

$$V_z = \int_0^{x_a} A_z \cdot (y, t) dt \quad (05)$$

e do mesmo modo como foi feito para o perfil superficial, pode-se expressar o volume infiltrado em termos de área média infiltrada. Assim,

$$V_z = \bar{A}_z \cdot X_a = A_{z_0} \cdot r_z \cdot X_a \quad (06)$$

onde  $A_z$  é o volume infiltrado na entrada do sulco por unidade de comprimento e  $r_z$  um fator que expressa a forma do perfil subsuperficial.



Fazendo as respectivas substituições tem-se uma nova expressão para o balanço de volume num sulco:

$$Q.t = A_o.r_y.X_a + A_{z_o}.r_z.X_a \quad (07)$$

Segundo LEVIEN e SOUZA (1987), pelo arranjo da equação (07) pode se expressar o avanço,  $X_a$ , em função dos demais parâmetros:

$$X_a = (Q.t)/(A_o.r_y + A_{z_o}.r_z) \quad (08)$$

onde:

$Q$  = vazão aplicada ( $m^3.s^{-1}$ );

$t$  = tempo de avanço (s);

$A_o$  = área da seção transversal na entrada do sulco, que depende da forma do mesmo ( $m^2$ );

$A_{z_o}$  = área infiltrada acumulada na entrada do sulco em ( $m^2$ );

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

$X_a$  = distancia de avanço no tempo  $t$  (m).

Para um sulco de forma parabólica, a área da seção transversal,  $A_o$ , é dada por:

$$A_o = (B.Y)/(M+1) \quad (09)$$

em que  $B = CY^M$  (10)

onde:

$B$  = largura da superfície livre da água (m);

$C$  e  $M$  = constantes ( $C$  em  $m^{1-M}$ ).

A área infiltrada acumulada pode ser calculada como sendo:

$$A_{z_o} = P_m.z(t) \quad (11)$$

onde  $P_m$  é o perímetro molhado e  $z(t)$  a lâmina infiltrada acumulada expressa pela equação de Kostiakov:

$$z = kt^a \quad (12)$$

Na expressão (10), quando a lâmina de água,  $Y$ , for muito pequena em relação a  $B$ , o perímetro molhado será aproximadamente igual a  $B$ , isto é:

$$P_m \cong B = CY^M \quad (13)$$

SOUZA (1981), demonstrou que:

$$r_y = 1/(\beta(M+1) + 1) \quad (14)$$

e

$$r_z = 1/(\beta M + a + 1) \quad (15)$$

onde  $\beta = 3/7$ .

WALKER e SKOGERBOE (1987), LEVIEN e SOUZA (1987), aplicando dados de campo ao modelo apresentado e a outros modelos mais complexos como zero-inércia e hidrodinâmico, concluíram que os resultados produzidos pelo modelo do balanço de volume foram razoáveis e em muitos casos, mais exatos.

### 2.3. EMPREGO DE PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO NA IRRIGAÇÃO

Provavelmente, a evolução de maior relevância na irrigação por superfície foi o desenvolvimento e aplicação de microcomputadores em rotinas de projeto e operação de sistemas (WALKER, 1989).

Para PEREIRA (1995), os grandes avanços em modelos de simulação, em conjunto com o progresso na elaboração do "software amigáveis", abriram campo para a geração de ferramentas



apropriadas para projetar sistemas de irrigação por superfície. Porém, em muitos casos o conhecimento insuficiente dos complexos processos envolvidos dificultam a utilização apropriada dos "software". A este respeito, ARRUDA e SOUZA (1993), afirmam que a elaboração de projetos de irrigação requer a análise de um número muito grande de variáveis, sendo o computador uma ferramenta da maior utilidade.

THOMAS e McCLEADOM (1988), ao referirem-se ao uso de programas na computação citam os "sistemas especialistas" e os define como sendo programas computadorizados projetados para emular a lógica e processos do raciocínio de especialistas humanos e que podem solucionar problemas no campo da "expertise" (habilidade e raciocínio), o que THOMAS e McCLEADOM (1988) consideram uma tarefa extremamente ambiciosa. De fato, provavelmente nunca os "sistemas especialistas" responderão a todas as situações numa área específica, tal como o faz a pessoa humana mas mesmo assim, os "sistemas especialistas" são de grande valia na área da engenharia hidráulica.

Vários pesquisadores desenvolveram modelos de simulação baseados em técnicas convencionais de programação algorítmica. Entre eles podemos citar STRELKOF que em 1985 e 1990 apresentou os programas computadorizados BRDRFLW (elaborado com base na linguagem FORTRAN4) e SRFR (escrito em FORTRAN ANSI 77) para modelar o fenômeno do fluxo de água sobre a superfície na irrigação por faixas e sulcos, respectivamente. Os programas foram elaborados com base nas teorias de zero-inércia e onda cinemática.

MERKLEY (1987), desenvolveu o "software" Usu Main System Hydraulic Model. O modelo simula o fluxo da água em canais. A linguagem de programação empregada foi o PASCAL 3.3. Posteriormente ROGERS e MERKLEY (1993), descreveram e analisaram dito programa para determinar o fluxo em canais abertos sob condições transientes.

Também HOLLY Jr e PARRISH III (1993), descreveram e avaliaram o programa CARIMA, que simula o fluxo (transiente) sob

condições de superfície livre simples ou sistemas múltiplos de rios ou canais.

SOUZA (1991) e GUIMARÃES (1993), respectivamente, elaboraram a avaliação e manejo computadorizado da irrigação das culturas do milho e algodão. Eles empregaram o "software" CROPWAT desenvolvido por SMITH em 1989.

ARRUDA (1993) e MAIA (1994), desenvolveram "software" de cálculo para projetos de irrigação por gotejamento-aspersão e localizada, respectivamente. Eles utilizaram a linguagem de programação TURBO PASCAL.

VOGEL e HOPMANS (1992), empregaram o programa de computação SWMII ("Soil Water Model") para formular a análise bidimensional da infiltração em sistema de irrigação por sulcos.

Na mesma linha TURBAK e MOREL-SEYTOUX (1988) recorreram aos programas computadorizados SIRCIR (irrigação superficial com taxa de infiltração constante) e SIRVIR (irrigação superficial com taxa de infiltração variável), para obter uma solução analítica da irrigação por superfície sob condições de taxa de infiltração constante e variável, respectivamente.

BODLA et al. (1994) propuseram um "sistema especialista" para o manejo de irrigação por faixas. Do mesmo modo ELDIN e AL-AMOUD (1994), apresentaram um controle via computador para automatizar o calendário da irrigação baseado no conteúdo de água no solo.

#### 2.4. O DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE EM LINGUAGEM PASCAL

Segundo ARRUDA (1993), o primeiro passo na rotina do desenvolvimento do "software" consiste na identificação do problema. Uma vez que se tenha uma boa definição do problema pode-se investigar os métodos para a sua solução e em seguida selecionar a melhor opção para tal. Logo inicia-se a codificação, para depois fazer-se a depuração, ou seja, a remoção do erros de código. Em seguida o programa é submetido a testes e validação.



EGEBERG (1994), considera que na atualidade existe a chamada "crise do software" gerada devido à complexidade em manejar a maioria dos "software" atuais. As expectativas dos usuários são pela produção de "software" mais "amigáveis" ("user friendly"), o que pode ser alcançado com o emprego da programação orientada a objetos.

KHAMBATA (1984), define o "software" como toda atividade associada ao desenvolvimento e operação bem sucedida de um sistema de computação, que não seja próprio do "hardware". O mesmo autor comenta que para o desenvolvimento do "software" devem-se seguir os seguintes estágios:

- 1º Especificação e declaração do problema .
- 2º Projeto do programa, para solucionar o problema.
- 3º Codificação do problema em linguagem simbólica (transcrição do programa).
- 4º Tradução para linguagem de máquina. O programa fonte é transformado em programa objeto.
- 5º Verificação do programa (depuração).
- 6º Validação do programa (teste). Envolve testes no programa, a fim de se verificar se ele atende às necessidades originais a que se propõe.

Dentre as diversas linguagens de programação disponíveis, o PASCAL vem atingindo popularidade entre os cientistas. Segundo PASAHOW (1989), a linguagem PASCAL foi inventada pelo Prof. Nicklaus Wirth. O projeto desta linguagem foi elaborado dentro dos princípios de uma linguagem anterior, a ALGOL-60. Uma característica importante dessa linguagem é sua ênfase em programação estruturada.

O PASCAL é compacto e abrangente, onde todos os recursos necessários para se programar em alto nível estão presentes. Todos os programas têm um cabeçalho e um corpo. No cabeçalho os dados são declarados e definidos; no corpo define-se o processamento (PASAHOW,1989).

Muitos computadores de grande porte e todos os microcomputadores suportam uma ou mais versões da linguagem PASCAL, e uma rica variedade de dialetos está disponível em microcomputadores. Dentre eles, o mais notável é o TURBO PASCAL.

De acordo com O'BRIEN (1992), o TURBO PASCAL tem-se mantido na vanguarda de inovação em "software" pelos últimos sete anos. Atualmente oferece aos programadores uma maior aproximação com o Turbo Vision, a primeira estrutura de aplicação para o DOS. O TURBO PASCAL combina os benefícios da programação estruturada em PASCAL com um "array" de recursos inteiramente novos, incluindo a programação orientada para objeto e o Turbo Vision.

O Turbo Pascal se caracteriza pelo compilador rápido interativo que possui. Permite escrever programas com o editor embutido, compilá-los com o compilador, executá-los sem ter que deixar o ambiente e depois examinar cuidadosamente o programa com o depurador interativo durante a execução. Este conjunto de componentes é chamado ambiente integrado de desenvolvimento (AID) (WEISKAMP, 1992).



### 3. METODOLOGIA

Na elaboração do "software" foram considerados os sistemas irrigação por sulcos abertos e em declive em três modalidades:

- sulcos convencionais (sem redução e sem re-uso);
- sulcos com redução de vazão;
- sulcos com re-uso da água de escoamento ("tailwater").

Para tal fim, utilizou-se a metodologia proposta por WALKER e SKOGERBOE (1987) e WALKER (1989), baseada na teoria do balanço de volume, a qual considera que a irrigação deve ser projetada tanto para as primeiras irrigações como para as subsequentes, devido as características de infiltração do solo variarem ao longo das irrigações.

#### 3.1. DESENVOLVIMENTO DO "SOFTWARE"

O "software" denominado de SIDIS (Sistema para o Dimensionamento da Irrigação por Sulcos), foi desenvolvido em base aos conceitos de programação estruturada aplicada a elaboração de projetos de irrigação por sulcos.

##### 3.1.1. ESTRUTURAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

A partir dos programas gerados em linguagem simbólica, realizou-se a compilação e tradução para a linguagem de máquina. A linguagem de programação empregada foi a versão 7.0 do TURBO PASCAL.

O "software" assim desenvolvido consta de sete programas executáveis, quais sejam:

- Sistema para o Dimensionamento da irrigação por

Sulcos (SIDIS.EXE).

- Sistema para o Dimensionamento de Sulcos Convencionais (SDISC.EXE).
- Sistema para o Dimensionamento de Sulcos com Redução da Vazão (SDISR.EXE).
- Sistema para o Dimensionamento de Sulcos com Re-uso da Água de Escoamento ("tailwater") (SDIST.EXE)
- Sistema para a Análise da Irrigação por Sulcos (SAIS.EXE).
- Sistema para Leitura e Apresentação dos Resultados (SLAR.EXE)
- Sistema de Ajuda ao Usuário (SPAAS.EXE)

A estruturação do "software" é apresentada na FIGURA 3.1, onde se observam os níveis de processamento dos programas de dimensionamento.

Para uma melhor compreensão e solução o "software" foi dividido em vários módulos.

#### 3.1.1.1. PROGRAMA SIDIS

Este programa, faz o gerenciamento e controle do funcionamento dos outros programas, estando dividido nos seguintes módulos:

- Módulo 1: realiza a apresentação do "software" na tela.
- Módulo 2: responsável pela entrada e armazenamento em disco dos dados necessários ao dimensionamento dos sistemas. Em alguns casos, como para os coeficientes empíricos de forma de sulco, parâmetros de infiltração e lâmina líquida, são apresentadas janelas com tabelas de dados.
- Módulo 3: executa os cálculos comuns ao dimensionamento, tais como, o tempo de oportunidade e tempo de avanço.
- Módulo 4: controla o fluxo e execução dos outros programas.



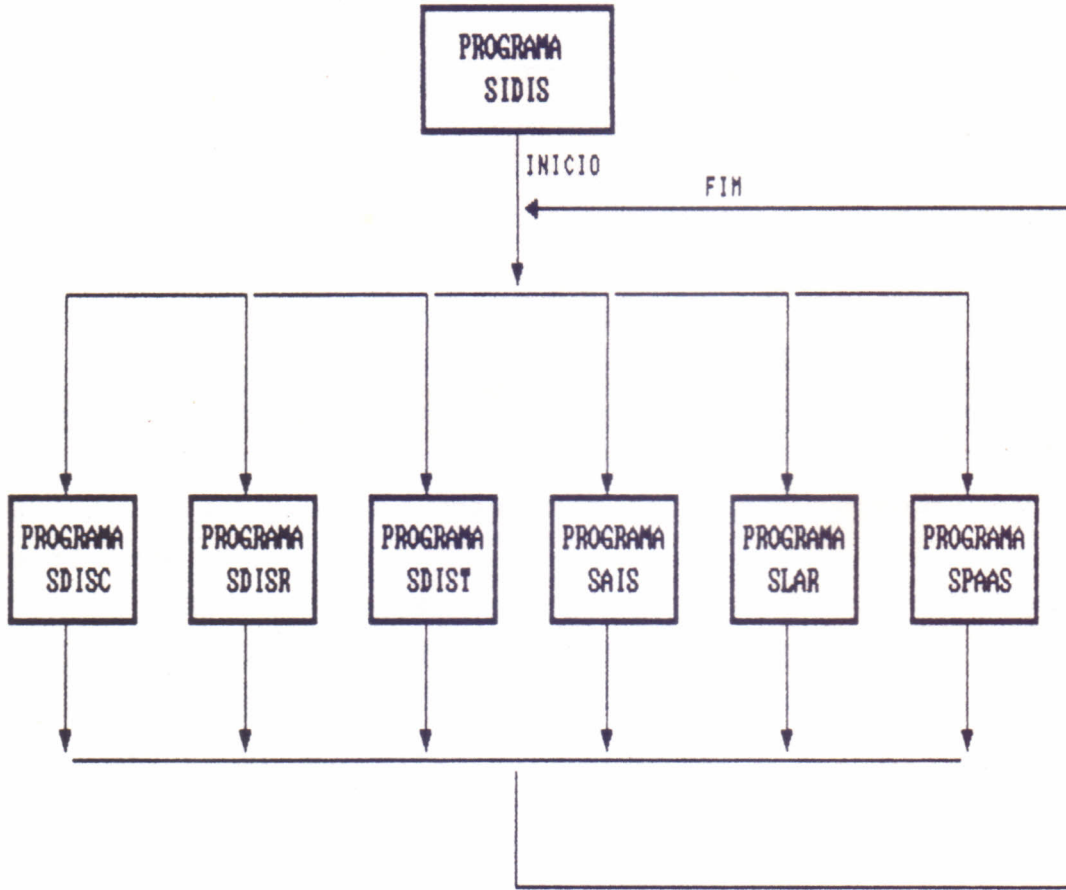


FIGURA 3.1 ESTRUTURA DO "SOFTWARE"

### 3.1.1.2. PROGRAMA SDISC

O programa SDISC realiza o dimensionamento do sistema de irrigação por sulcos convencionais, sendo composto dos seguintes módulos:

- Módulo 1: contém os procedimentos que envolvem os cálculos comuns.

- Módulo 2: faz a elaboração dos possíveis "layouts" do campo, determinando para cada um deles o número de lotes, número de sulcos por lote, tempo de avanço, tempo de oportunidade e eficiência de aplicação.

- Módulo 3: escolhe a alternativa que gera a melhor performance do sistema, baseado na eficiência de aplicação.

- Módulo 4: executa o dimensionamento por sulco. Aplicável quando a largura do campo e a vazão disponível não estão definidos.

- Módulo 5: armazena em disco os resultados das simulações.

- Módulo 6: expõe os resultados na tela e impressora.

- Módulo 7: controla a rotina que possibilita continuar com os cálculos ou sair do programa.

### 3.1.1.3. PROGRAMA SDISR

Este programa realiza o dimensionamento do sistema de irrigação por sulcos com redução da vazão, os módulos que o compõem são:

- Módulo 1: determina a vazão por sulco para a fase de avanço, cuidando que esta seja inferior a vazão máxima não erosiva.

- Módulo 2: faz o cálculo da vazão reduzida do sulco na fase de armazenamento. Também determina os possíveis "layouts" do campo, segundo o número de lotes.

- Módulo 3: determina a vazão total requerida e o turno de rega (intervalo entre irrigações) para cada disposição,



escolhendo a alternativa que mais se adequa às condições do campo.

- Módulo 4: armazena em disco os resultados obtidos nas simulações.

- Módulo 5: apresenta os dados na tela e impressora.

- Módulo 6: controla a rotina que permite ao usuário decidir entre continuar com as simulações ou interromper a execução do programa.

#### 3.1.1.4. PROGRAMA SDIST

O programa SDIST leva a cabo o dimensionamento dos sistemas com re-uso da água de escoamento, estando dividido nos seguintes módulos:

- Módulo 1: calcula a vazão por sulco que resulta num tempo de avanço entre 25 a 30% do tempo de oportunidade. Também realiza a determinação dos coeficientes "p" e "r" para diferentes vazões e tempos de avanço.

- Módulo 2: faz a determinação do volume total infiltrado, das perdas por percolação profunda, das perdas por escoamento superficial e da eficiência de aplicação para diferentes vazões.

- Módulo 3: calcula as diferentes opções de "layout" do campo e para cada uma delas determina a vazão requerida, escolhendo a melhor disposição, determinando o número de sulcos por lote e a vazão de bombeamento.

- Módulo 4: armazena em disco os resultados do dimensionamento.

- Módulo 5: possibilita a alteração de alguns parâmetros de entrada para prosseguir com os cálculos ou simplesmente interromper a execução do programa.

- Módulo 6: permite interromper a execução do programa ou mudar os valores de alguns parâmetros e prosseguir com os cálculos.

### 3.1.1.5. PROGRAMA SAIS

Realiza a análise da performance da irrigação para diferentes valores de comprimento e vazão do sulco. Os módulos que o compõem são:

- Módulo 1: Calcula o tempo de avanço, tempo de oportunidade, tempo de corte e a eficiência de aplicação para diversas combinações de comprimento e vazão.

- Módulo 2: seleciona os valores de L e Qs que geram a melhor performance.

- Módulo 3: dispõe em ordem decrescente os valores da eficiência de aplicação e escolhe os 50 maiores valores de Ea.

- Módulo 4: armazena os resultados das simulações em disco.

- Módulo 5: executa a saída de resultados na tela e/ou impressora.

- Módulo 6: permite a interrupção do programa ou continuação das simulações.

### 3.1.1.6. PROGRAMA SLAR

Este programa recupera resultados das simulações executadas anteriormente e armazenados em disco para qualquer um dos programas apresentados. Os resultados são apresentados na tela e/ou impressora.

### 3.1.1.7. PROGRAMA SPAAS

Contém uma rotina de ajuda ao usuário apresentando explicações sobre os diversos passos a seguir na execução do "software", nas distintas modalidades de dimensionamento. Esclarece pontos como a natureza dos dados a serem introduzidos no programa, os diversos menus, as mensagens de execução, etc.



### 3.1.2. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS E DETALHAMENTO DOS ALGORITMOS

#### 3.1.2.1. DADOS BÁSICOS

Os dados necessários para aplicar esta metodologia são os seguintes:

- vazão disponível (QT)
- comprimento máximo do sulco (L);
- coeficiente de rugosidade de Manning (n);
- declividade (So);
- largura do campo (W);
- espaçamento entre sulcos (wf);
- velocidade média da água (V);
- coeficientes empíricos da forma de sulco ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ );
- parâmetros de infiltração do solo (a, k, fo), para as primeiras e irrigações subsequentes;
- lâmina líquida (Zn);
- turno de rega (TR);

A velocidade média da água no sulco (V), de acordo com WALKER e SKOGERBOE (1987), deve variar entre 8 e 13 m/min, dependendo do nível de suscetibilidade do solo à erosão.

Para o coeficiente de rugosidade de Manning (n), recomenda-se adotar o valor 0,02 em solos previamente irrigados, 0,04 em solos recém cultivados e 0,15 em solos onde a vegetação densa dificultar o movimento da água. Geralmente para fins de projeto, assume-se o valor 0,04 para "n".

Os coeficientes empíricos de forma variam segundo a seção do sulco. WALKER (1989), relacionou os fatores de forma com o tipo do sulco, conforme apresentado na TABELA 3.1.

TABELA 3.1 Relação entre as formas típicas do sulco e os coeficientes empíricos  $p$  e  $p_e$ .

FATOR	FORMA DO SULCO		
	triangular (57°)	triangular (68°)	triangular (75°)
$p$	0,464	0,487	0,503
	1,333	1,333	1,333
	trapezoidal (1:1,4)*	trapezoidal (1:0,95)	trapezoidal (1:0,75)
$p$	0,498	0,513	0,432
	1,325	1,329	1,290
	parabólico (BN)	parabólico (BM)	parabólico (BL)
$p$	0,582	0,591	0,585
	1,352	1,361	1,366

FONTE: WALKER (1989).

\*: inclinação do talude.

BN, BM, BL: base estreita, média e larga, respectivamente.

Para os parâmetros de infiltração, caso não se disponha de dados de campo, sugere-se o uso das tabelas adotadas por WALKER (1989), que relacionam esses parâmetros com o tipo de solo, conforme a TABELA 3.2.

TABELA 3.2 Parâmetros de infiltração de KOSTIAKOV - LEWIS  
(adaptado por GHARBI, 1984).

curva No FAMILIA	k m <sup>3</sup> /m.min	a	fo m <sup>3</sup> /m.min	tipo de solo
0,05	0,00426	0,258	0,000022	argiloso
0,10	0,00383	0,317	0,000035	
0,15	0,00360	0,357	0,000046	
0,20	0,00346	0,388	0,000057	franco argiloso
0,25	0,00337	0,415	0,000068	
0,30	0,00330	0,437	0,000078	
0,35	0,00326	0,457	0,000088	
0,40	0,00324	0,474	0,000098	
0,45	0,00321	0,490	0,000107	franco siltoso
0,50	0,00320	0,504	0,000117	
0,60	0,00320	0,529	0,000136	
0,70	0,00321	0,550	0,000155	
0,80	0,00324	0,568	0,000174	
0,90	0,00328	0,584	0,000193	franco arenoso
1,00	0,00332	0,598	0,000212	
1,50	0,00361	0,642	0,000280	arenoso
2,00	0,00393	0,672	0,000339	

FONTE: WALKER (1989).



Quando se dispõe de valores dos parâmetros físicos do solo a lâmina líquida pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$Z_n = (CC - PM)/100 \cdot p_a/p_w \cdot p_r \cdot f \quad (16)$$

sendo:

$Z_n$  = lâmina líquida de água por "pr" de profundidade (m);

CC = conteúdo de água do solo a capacidade de campo (%massa);

PM = conteúdo de água no ponto de murcha permanente (%massa);

$p_a$  = densidade aparente do solo ( $g/cm^3$ );

$p_w$  = densidade da água ( $g/cm^3$ );

pr = profundidade efetiva das raízes (m);

f = fator de disponibilidade de água para a cultura (decimal).

O turno de rega é determinado com a seguinte equação:

$$TR = Z_n \cdot ET_c^{-1} \cdot 1000 \quad (17)$$

sendo:

TR = turno de rega (dias);

ETc = evapotranspiração máxima da cultura (mm/dia);

### 3.1.2.2. CÁLCULOS COMUNS AOS SISTEMAS

No dimensionamento das diversas variantes de irrigação por superfície, existem cálculos que são comuns, tais como: tempo de oportunidade (Tr) e tempo de avanço ( $T_L$ ).

#### a) TEMPO DE OPORTUNIDADE

Para a estimativa da infiltração e, em consequência do tempo de oportunidade, adotou-se o modelo de Kostiaikov-Lewis.

$$Z_r = K \cdot Tr^a + f_o \cdot Tr \quad (18)$$

onde:

$$Z_r = Z_n \cdot w_f;$$

$Z_r$  = lâmina requerida ( $m^3$  de água/m de profundidade);

$a$  = coeficiente de infiltração (adimensional);

$k$  = coeficiente de infiltração ( $m^3/m \cdot \text{min}$ );

$T_r$  = tempo de oportunidade (min);

$f_o$  = velocidade de infiltração básica ( $m^3/\text{min} \cdot m$ );

$w_f$  = espaçamento entre sulcos (m).

$Z_r$  em  $m^3/m$  é obtido multiplicando-se  $Z_n$  em m pelo espaçamento entre sulcos ( $w_f$ ). Os valores de  $k$ ,  $a$ ,  $f_o$ , e espaçamento entre sulcos são dados de projeto, assim como o volume por unidade de comprimento requerido para repor a umidade da zona radicular.

No dimensionamento, o tempo de oportunidade ( $T_r$ ) é calculado em função de  $Z_r$  empregando-se o método iterativo de Newton-Raphson. Esta rotina de cálculo é composta dos seguintes passos:

- (1) deve-se assumir um valor inicial para  $tr_1$ ;
- (2) calcula-se o tempo estimado de  $tr_{i+1}$ , baseado na seguinte equação:

$$Tr_{i+1} = Tr_i + \frac{Z_r - k \cdot Tr_i^a - f_o \cdot Tr_i}{a \cdot k \cdot Tr_i^{a-1} / Tr_i + f_o} \quad (19)$$

(3) comparam-se os valores do tempo de oportunidade inicial com o calculado, se eles forem aproximadamente iguais, o processo finaliza, do contrário, substitui-se o valor do tempo de oportunidade calculado, isto é:  $Tr_i = Tr_{i+1}$ , e repetem-se os passos 2 e 3. Esta metodologia de cálculo está ilustrada na FIGURA 3.2

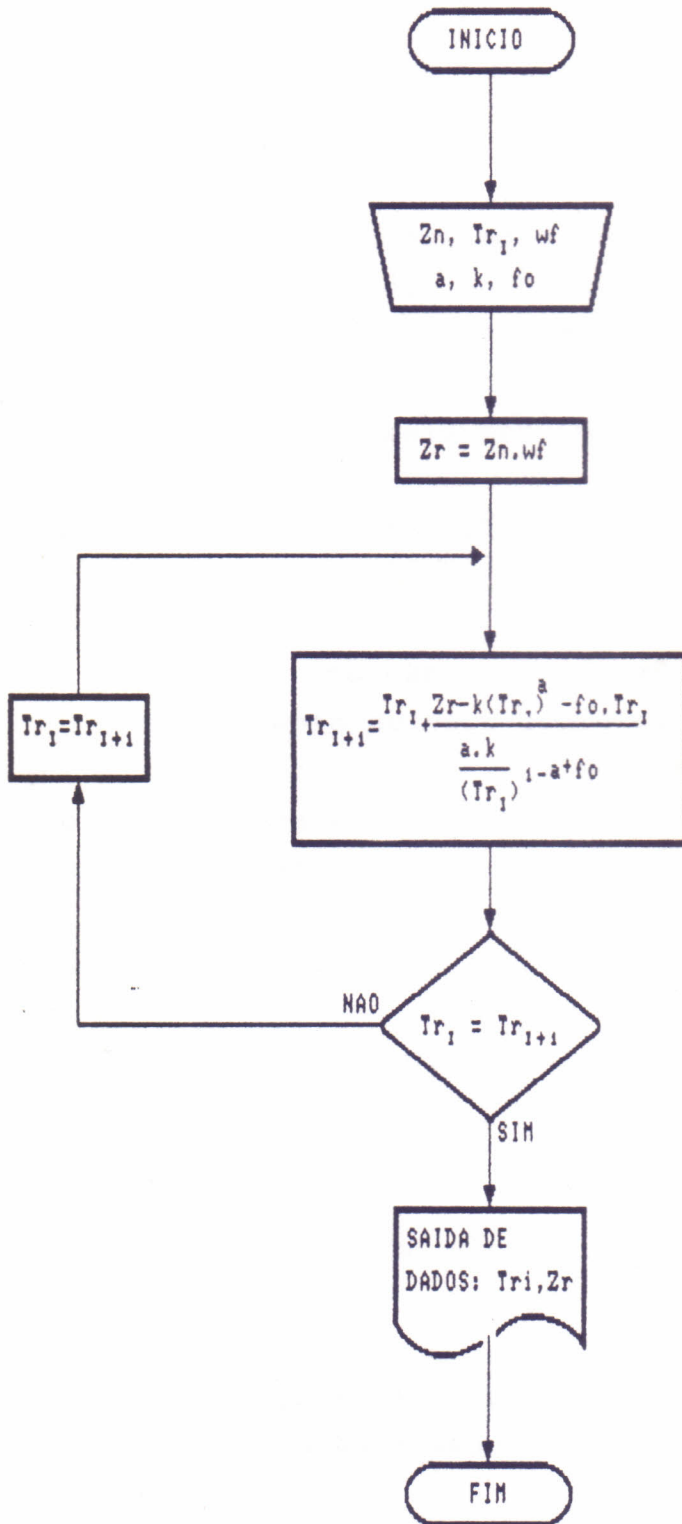


FIGURA 3.2 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE OPORTUNIDADE

R.656313



## b) TEMPO DE AVANÇO

Antes da determinação do tempo de avanço deve-se calcular a vazão por sulco e a área média molhada.

A vazão por sulco ( $Q_s$ ) é função da vazão disponível e do número de sulcos por lote, porém, é limitada pela vazão máxima não erosiva ( $Q_{max}$ ), obtida pela seguinte expressão:

$$Q_{max} = (V_{max} p^2 \cdot n / (60 p_2 S_o^{0.5}))^{1/(p-1)} \quad (20)$$

sendo,

$Q_{max}$  = vazão máxima não erosiva ( $m^3/m$ );

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning;

$p$ ,  $p_2$  = coeficientes empíricos de forma do sulco;

$S_o$  = declividade do sulco ( $m/m$ );

$V_{max}$  = Velocidade média máxima da água no sulco ( $m/min$ ).

Para sulcos em declive, a área média molhada ( $A_o$ ) ou seção transversal por onde passa o fluxo de água, pode ser determinada através da equação de Manning, ou seja:

$$A_o = (Q_o \cdot n / (60 \cdot p_2 S_o^{0.5}))^{1/p} \quad (21)$$

Observando-se a equação (21), verifica-se que embora " $A_o$ " varie ao longo do sulco, assume-se um valor constante para a solução do problema.

O tempo de avanço ( $T_L$ ) é obtido pelo método do balanço de volume, conforme expressão a seguir:

$$Q_s \cdot T_L - 0,77 \cdot A_o \cdot L - \sigma_z \cdot k \cdot T_L \cdot L - \sigma'_z \cdot f_o \cdot T_L = 0 \quad (22)$$

onde  $\sigma_z$  é o fator de forma subsuperficial da água infiltrada, determinado através da seguinte relação:

$$\sigma_x = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad (23)$$

sendo:

$a$  = parâmetro de infiltração;

$r$  = coeficiente da função do tempo de avanço;

e

$$\sigma'_x = 1/(1+r) \quad (24)$$

Como a equação (22) contém duas incógnitas,  $T_L$  e " $r$ ", usa-se um processo iterativo aplicado a dois pontos, metade do comprimento ( $0,5L$ ) e comprimento total ( $L$ ), para a sua solução, conforme os passos a seguir:

(1). O expoente do tempo de avanço " $r$ " tipicamente varia entre 0,3 a 0,9, então inicializa-se " $r_1$ " com um valor estimado (próximo a 0,5);

(2). Calcula-se  $\sigma_x$  e  $\sigma'_x$ ;

(3). Determina-se o tempo de avanço ( $T_L$ ) utilizando o procedimento de Newton-Raphson:

a). faz-se inicialmente  $(T_{L1}) = 5,0(Ao.L/Qs)$  (25)

b). se  $\Delta = \sigma_x \cdot k(T_{L1})^r \cdot L$  (26)

e  $Y = \sigma'_x \cdot fo(T_{L1}) \cdot L$  (27)

então

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} - \frac{Qs(T_{L_i}) - 0,77AoL - \Delta - Y}{Qs - \Delta/T_{L_i} - \sigma'_x foL} \quad (28)$$

c). compara-se o valor inicial estimado do tempo de avanço ( $T_{L_i}$ ) com o valor calculado ( $T_{L_{i+1}}$ ). Se os mesmos forem semelhantes parte-se para uma nova etapa, caso contrário  $T_{L_i}$

assume o valor de  $T_{L_{i+1}}$  e é substituído na equação (28), repetindo-se os passos (b) e (c) até que a condição de igualdade entre  $T_{L_i}$  e  $T_{L_{i+1}}$  seja atingida.

Note-se que se a vazão de entrada ( $Q_s$ ) for muito pequena, este procedimento pode falhar. Então a vazão deverá ser incrementada ou o comprimento do sulco reduzido.

d). Calcula-se o tempo de avanço para a metade do comprimento, fazendo  $T_L = T_{0,5L}$ , e do mesmo modo para  $T_L$ , substituindo  $L$  por  $0,5L$ , e  $T_L$  por  $T_{0,5L}$ .

(4). calcula-se o valor de "r" com a seguinte fórmula:

$$r_{i+1} = \frac{\ln(2)}{\ln(T_L/T_{0,5L})} \quad (29)$$

(5). compara-se o valor inicial estimado de "r" com o valor calculado. Se forem suficientemente semelhantes o procedimento é finalizado, se não faz-se  $r_i = r_{i+1}$ , repetindo-se os passos 2 a 4.

A sequência de cálculo do tempo de avanço esta ilustrada no fluxograma da FIGURA 3.3

A determinação de  $T_L$  é um procedimento básico para o balanço de volume, sendo fundamental para a determinação da vazão máxima que se pode utilizar para completar a fase de avanço. Similarmente é usado para determinar a vazão mínima, como no caso de sistemas com redução de vazão. O cálculo de  $T_L$  é executado repetidamente na otimização do projeto ou das operações do projeto.

### 3.1.2.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS CONVENCIONAIS

Uma vez definidos os dados de entrada, deve-se calcular a vazão máxima não erosiva (equação (20)) de modo que a vazão por sulco não ultrapasse este valor. Em seguida, deve-se determinar o



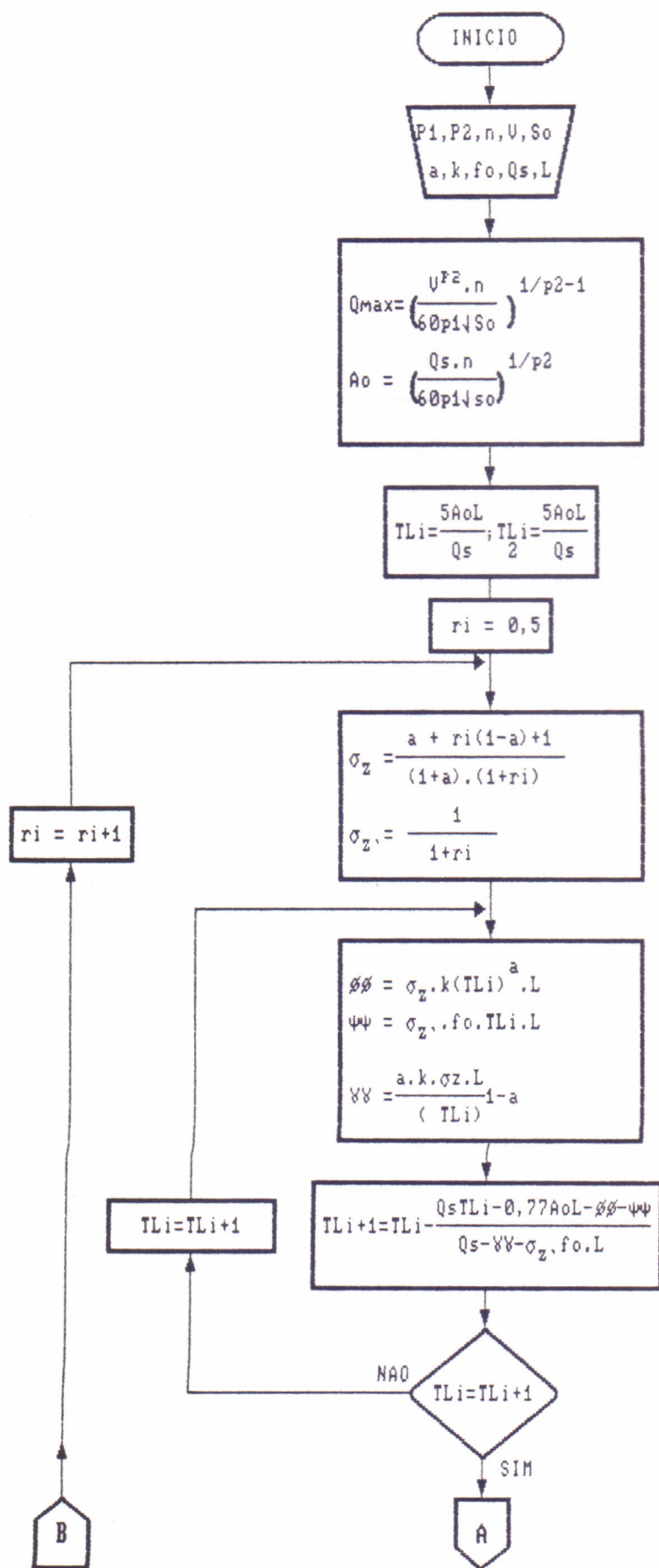


FIGURA 3.3 FLUXOGRAMA PARA O CALCULO DA VAZAO, AREA E TEMPO DE AVANCO

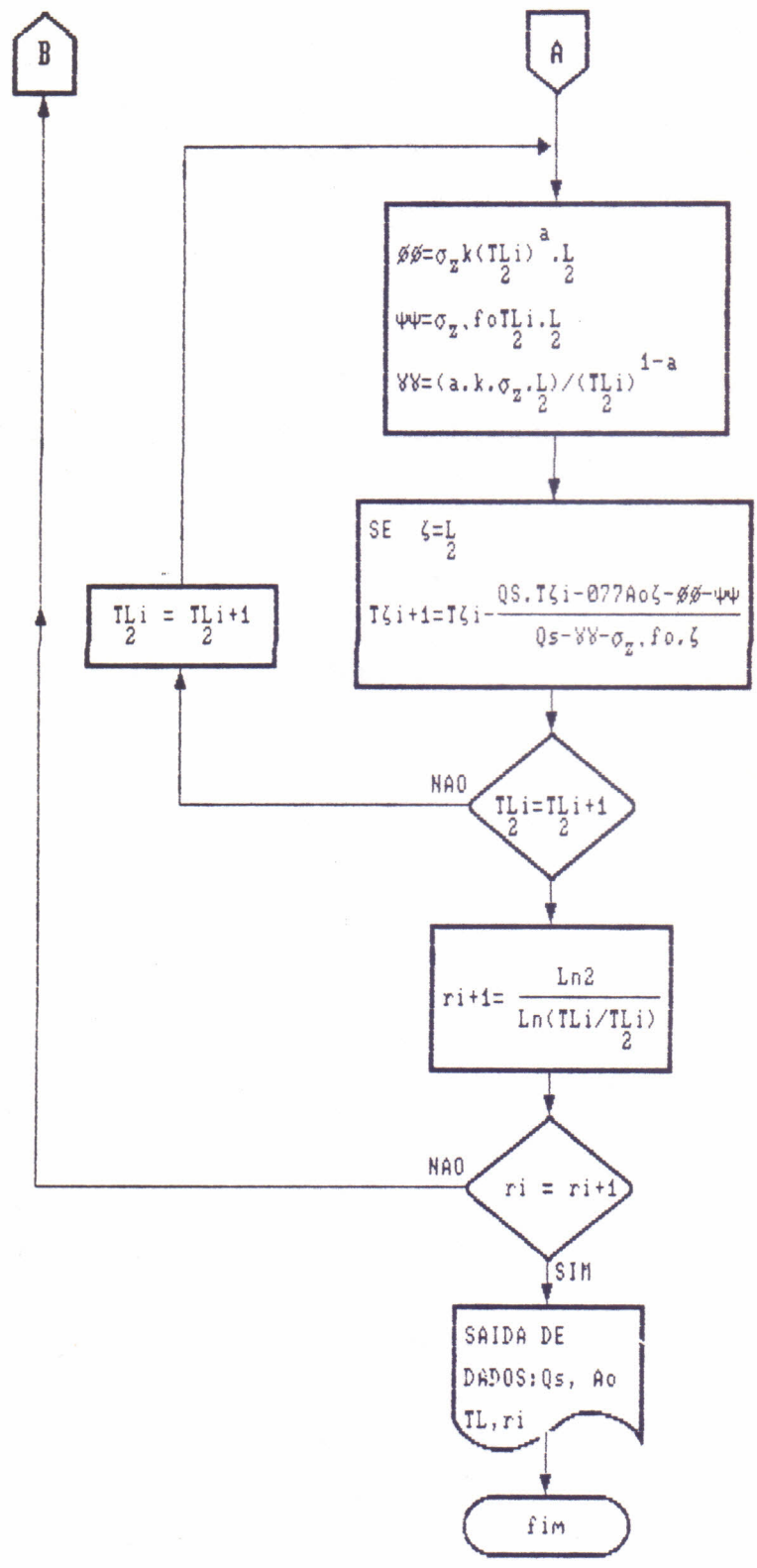


FIGURA 3.3 FLUXOGRAMA PARA O CALCULO DA VAZAO, AREA E TEMPO DE AVANCO ( CONTINUACAO)

número mínimo de sulcos por lote ( $N_{sl}$ ), conforme expressão a seguir.

$$N_{sl} = QT/Q_{max} \quad (30)$$

Quando não há restrição de vazão, o número total de sulcos no campo ( $N_{st}$ ) é determinado pela largura do campo ( $W$ ) e pelo espaçamento entre sulcos ( $w_f$ ), ou seja.

$$N_{st} = W/w_f \quad (31)$$

Se  $N_{sl}$  for maior que  $N_{st}$ , o número de lotes será restrito a um ( $01$ ), ou seja:

$$N_{sl} = N_{st}$$

sendo a vazão por sulco ( $Q_s$ ) calculada por:

$$Q_s = QT/N_{sl} \quad (32)$$

caso  $Q_s$  seja maior que  $Q_{max}$ , faz-se  $Q_s = Q_{max}$ .

O número máximo de lotes aplicáveis ao campo ( $N_L$ ) é obtido empregando-se uma vazão por sulco igual à vazão máxima não erosiva, através da expressão:

$$N_L = N_{st}/N_{sl} \quad (33)$$

A partir de  $N_L$  e mediante um processo iterativo obtém-se diferentes alternativas de "layout" do campo com o intuito de dar maior flexibilidade ao projetista. Para cada disposição ("layout") determina-se o número de sulcos por lote (fazendo-se sempre  $N_L$  e  $N_{sl}$  números inteiros), o tempo de avanço ( $T_L$ ), tempo de oportunidade ( $T_r$ ), o tempo de corte ( $T_{co}$ ) e a eficiência de aplicação ( $E_a$ ).



A eficiência de aplicação ( $E_a$ ) é calculada através da seguinte relação:

$$E_a = Z_r.L / (Q_s.T_{co}) \quad (34)$$

sendo,

$T_{co}$  = tempo de corte (min).

A sequência desses cálculos é sintetizada na FIGURA 3.4 e sua checagem na FIGURA 3.5, onde as palavras ÁREA, TEMPAV, TEMPOP e EFAPLIC, referem-se a procedimentos para determinar  $A_o$ ,  $T_L$ ,  $T_r$  e  $E_a$ , respectivamente.

No passo seguinte escolhe-se o "layout" com melhor performance ( $E_a$ ) segundo o fluxograma da FIGURA 3.6.

A seguir verifica-se se o turno de rega calculado ( $TR_i$ ) é menor que o turno de rega pré-determinado ( $TR$ ) e se a eficiência de aplicação é maior que 30%. Caso as duas condições não sejam satisfeitas, os cálculos são reinicializados e é apresentada uma mensagem de esclarecimento, conforme fluxograma da FIGURA 3.7.

Este processo é repetido para as irrigações subsequentes.

#### 3.1.2.4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS COM REDUÇÃO DE VAZÃO

Para dimensionar este tipo de sistema optou-se pela metodologia proposta por GARTON (1966), que consiste de duas estratégias: i) trabalhar com dois lotes simultaneamente, sendo que enquanto um estiver na fase de avanço o outro estará na fase de armazenamento; ii) selecionar um valor de vazão por sulco ( $Q_{av}$ ) em que o tempo de avanço seja semelhante ao tempo de oportunidade, isto é:

$$T_L = T_r$$

Nesta estratégia primeiro deve-se determinar a vazão para a fase de avanço ( $Q_{av}$ ), para isso, inicialmente calcula-se o tempo

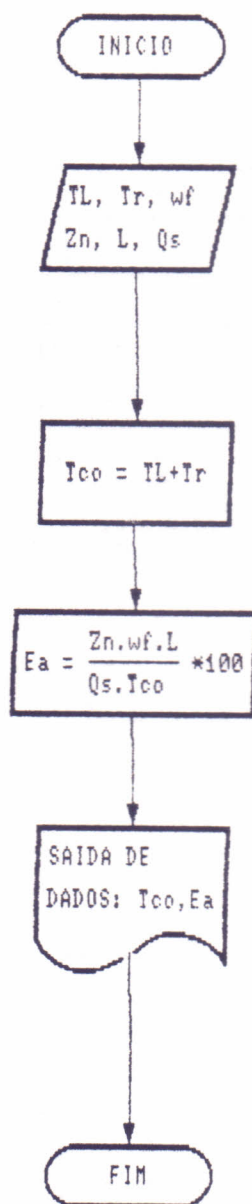


FIGURA 3.4 FLUXOGRAMA PARA O CALCULO DA EFICIENCIA DE APLICACAO (SULCOS CONVENCIONAIS)

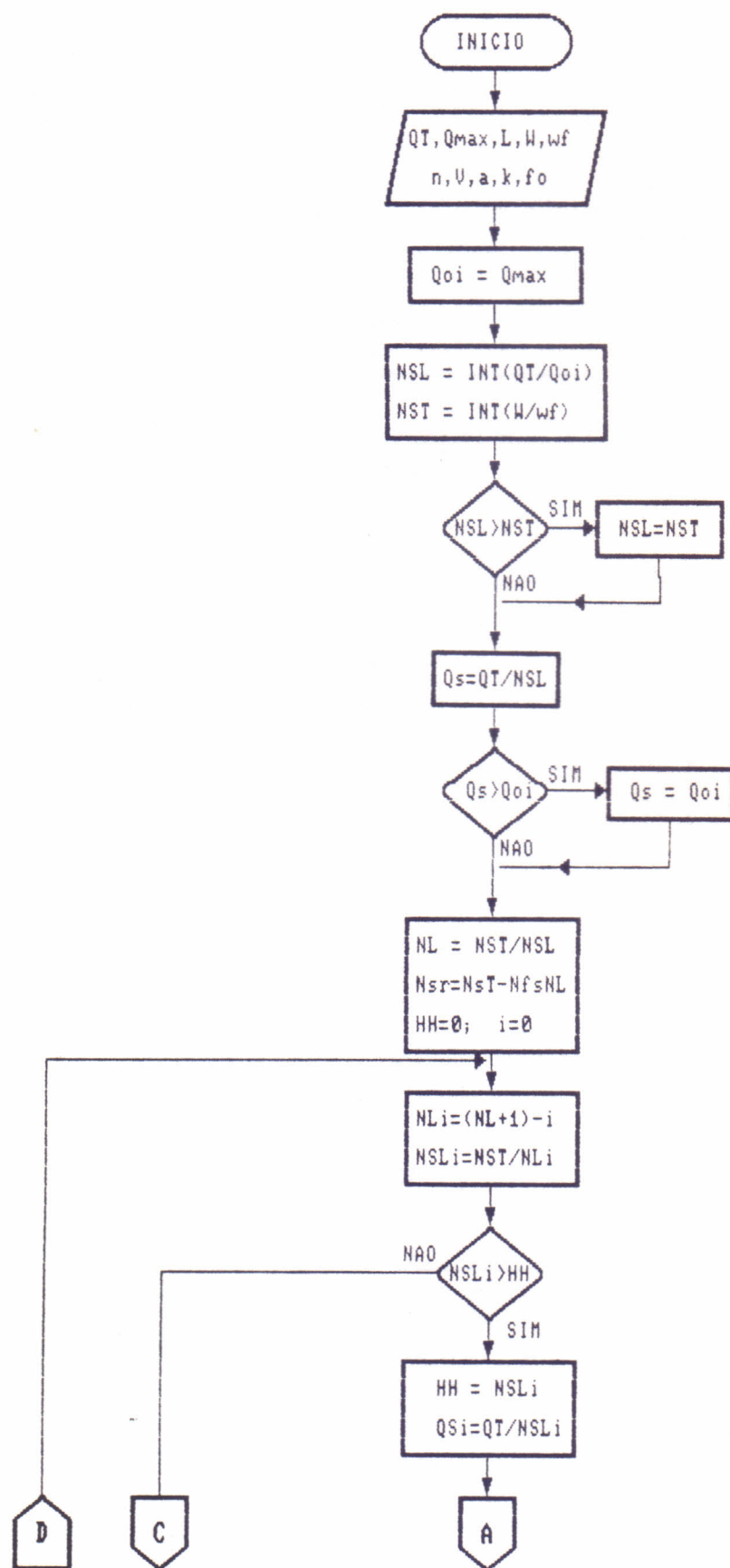


FIGURA 3.5 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DOS POSSÍVEIS "LAYOUTS" DO CAMPO



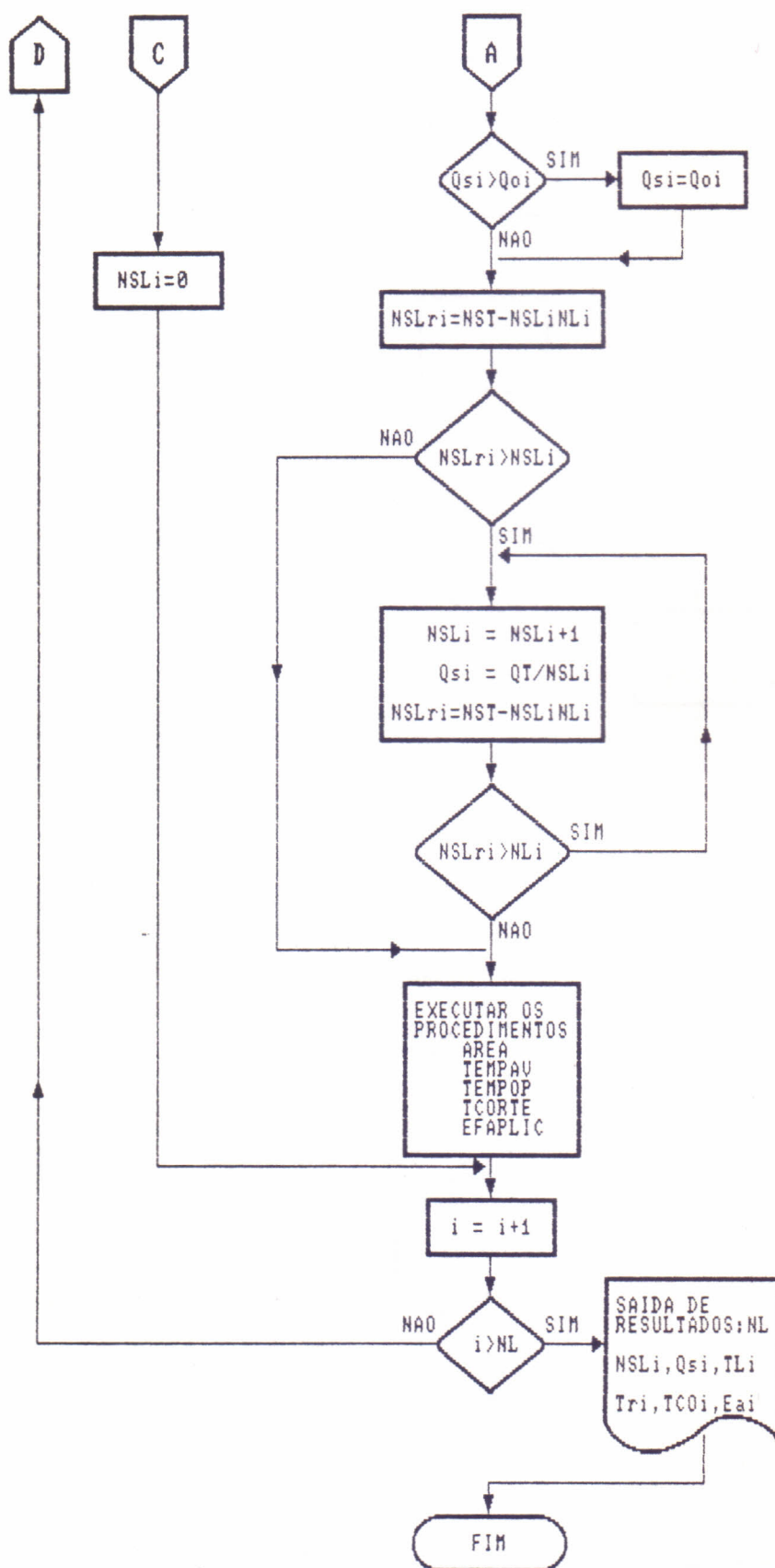


FIGURA 3.5 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DOS POSSÍVEIS "LAYOUTS" DO CAMPO (CONTINUAÇÃO)

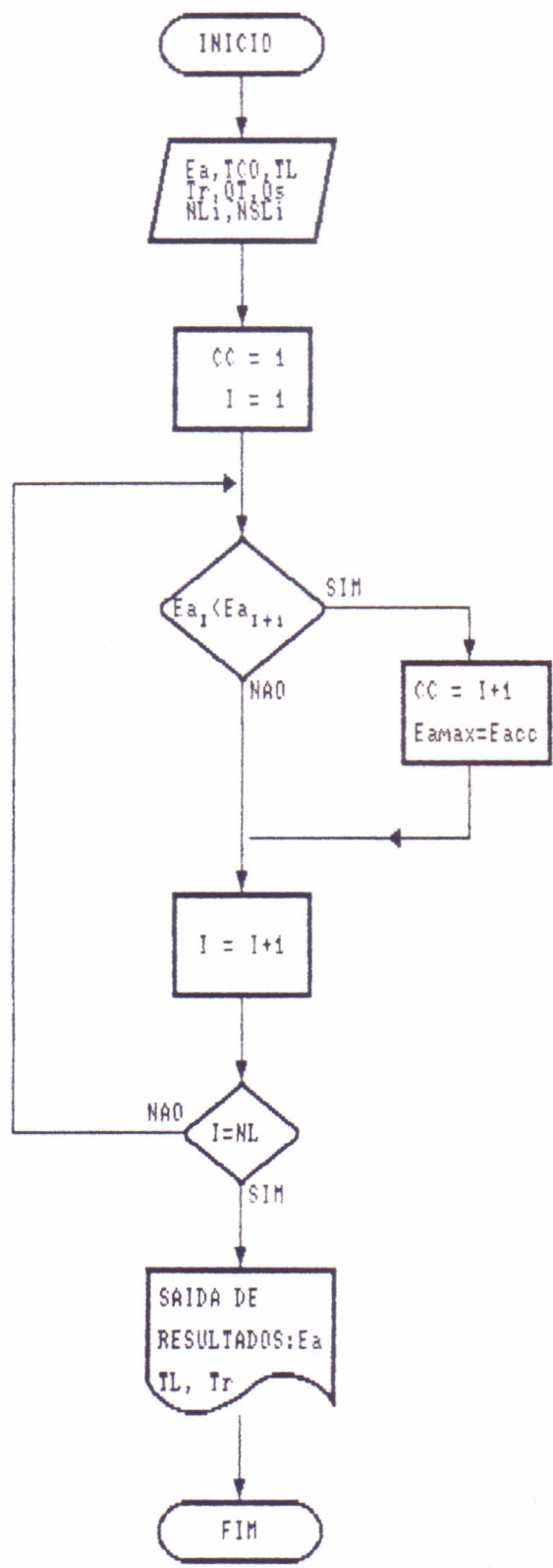


FIGURA 3.6 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DA MELHOR PERFORMANCE DO SISTEMA

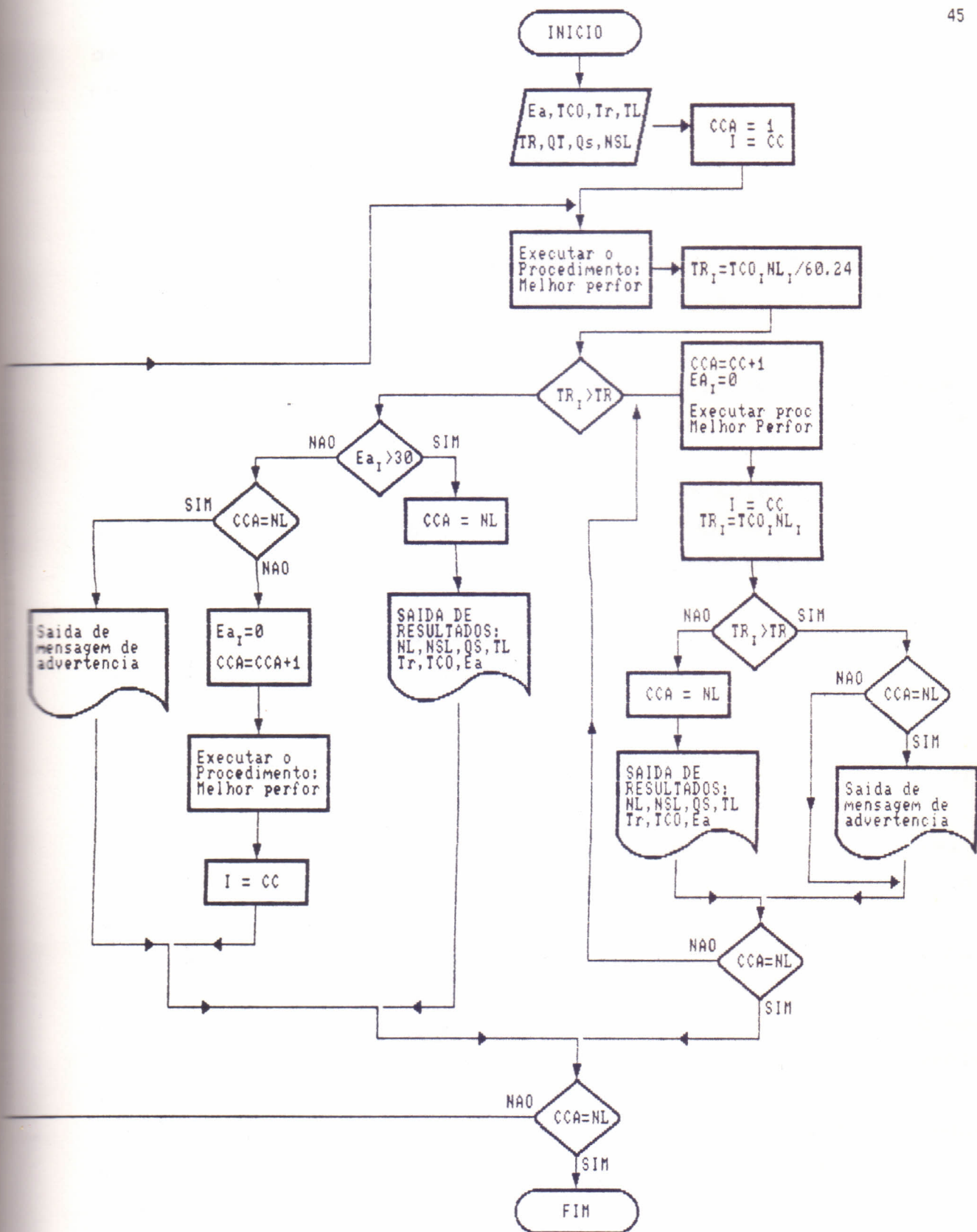


FIGURA 3.7 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAR O "LAYOUT" MAIS ADEQUADO



de oportunidade ( $T_r$ ) e o tempo de avanço ( $T_L$ ) empregando-se a metade da vazão máxima não erosiva, isto é:

$$Q_{av} = Q_{max}/2;$$

caso o tempo de avanço calculado seja diferente do tempo de oportunidade, mediante um processo iterativo faz-se variar a vazão, aumentando ou diminuindo conforme o caso, ou seja:

$$Q_s = Q_s \pm 0,01/10^x \quad (35)$$

até que o tempo de avanço seja igual ao tempo de oportunidade.

Na equação (35) "x" é um auxiliar incrementado conforme os ciclos de cálculo de  $T_L$ .

Caso os dados de entrada não permitam obter esta igualdade, a lâmina líquida e/ou o comprimento do sulco deverão ser modificados. A metodologia de cálculo está descrita na FIGURA 3.8.

Uma vez determinada a vazão para a fase de avanço, calcula-se a vazão para a fase de armazenamento ou vazão reduzida ( $Q_{red}$ ) pela seguinte expressão:

$$Q_{red} = 1,1 * f_o * L \quad (36)$$

Neste caso a vazão foi incrementada em 10% acima da velocidade básica de infiltração, assegurando que a água atingirá o final do sulco.

Caso a vazão reduzida produzida seja maior que a vazão da fase de avanço, o programa é finalizado para que o projetista revise os valores de L e/ou  $Z_n$  e reinicie os cálculos. O mesmo acontece quando a vazão por sulco, ( $Q_s$ ), para a fase de avanço é superior a  $Q_{max}$ .

Obtida a vazão reduzida, determina-se a relação de redução da vazão (CBR), útil na determinação do número de sulcos por lote. A CBR é calculada tanto para as primeiras irrigações quanto

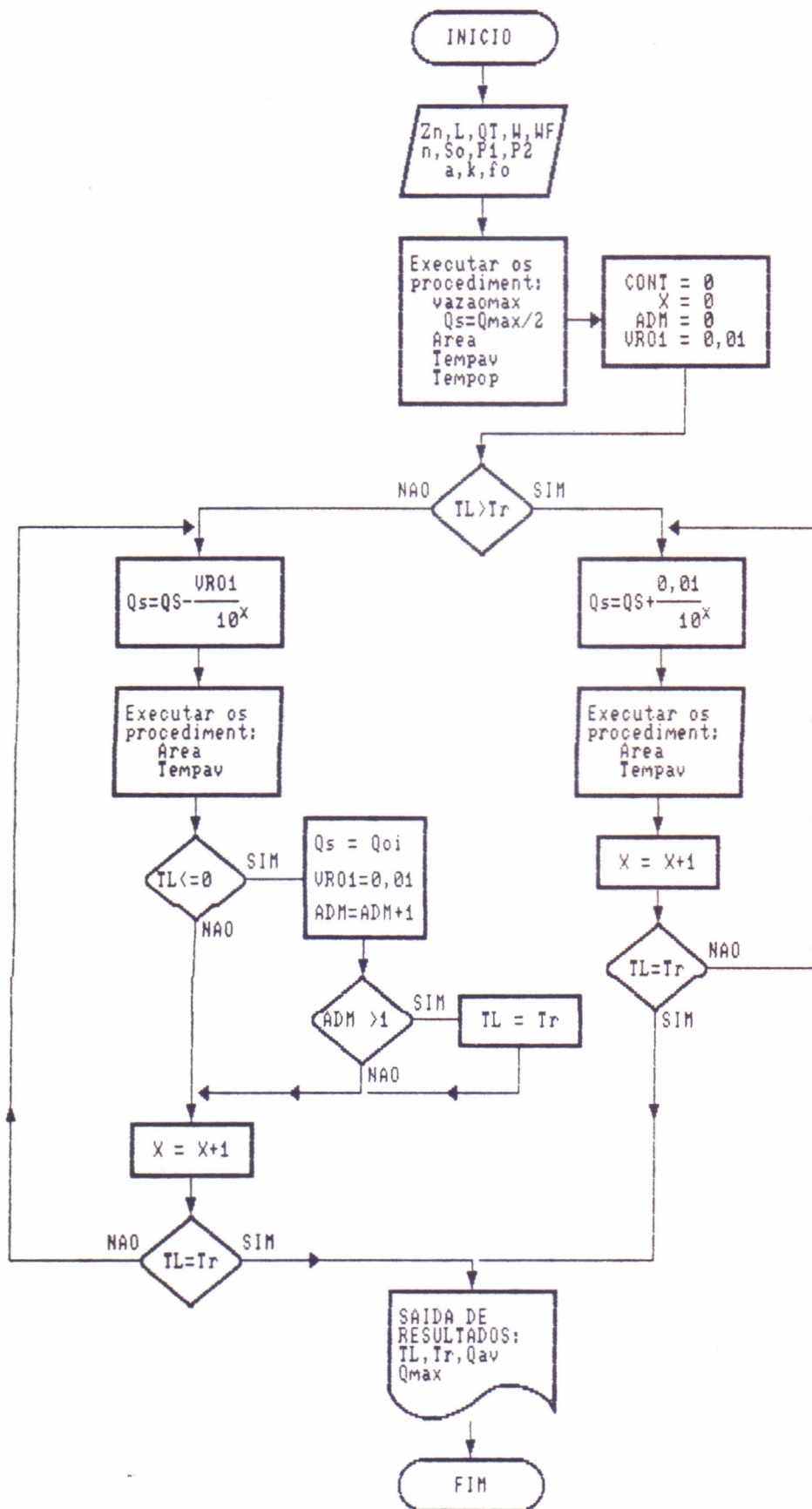


FIGURA 3.8 FLUXOGRAMA PARA O CALCULO DA VAZAO PARA A FASE DE AVANCO (Qav)

para as subsequentes, sendo o dimensionamento fortemente influenciado pelas últimas. Assim,

$$CBR = Q_{red}/Q_{av} \quad (37)$$

O número de sulcos por lote, determinase utilizando-se a relação proposta por SOUZA (1994), em que:

$$N_{s11} = \frac{N_{st}}{\sum_{j=0}^{k-1} (k-j)(-CRB)^j} \quad (38)$$

sendo,

$N_{s11}$  = número de sulcos no primeiro lote;

$N_{st}$  = número total de sulcos;

$k$  = total de lotes no campo.

o número de sulcos nos lotes restantes ( $N_{sli}$ ) é determinado através da seguinte relação:

$$N_{sli} = N_{s11} - N_{s(i-1)} \cdot CRB \quad (39)$$

onde :

$i$  = número do lote.

A sequência de todos esses cálculos é ilustrada no fluxograma da FIGURA 3.9.

Com o intuito de melhorar as opções do projetista, apresentam-se diferentes "layouts", que vão desde campos divididos em 2 lotes, a campos com 14 lotes.

Para cada "layout" determina-se o tempo de irrigação de todo o campo ( $TR_i$ ) e a eficiência de aplicação ( $E_{ai}$ ):

$$E_{ai} = (Z_r \cdot L) / (T_L \cdot (Q_{av} + Q_{red})) \quad (40)$$



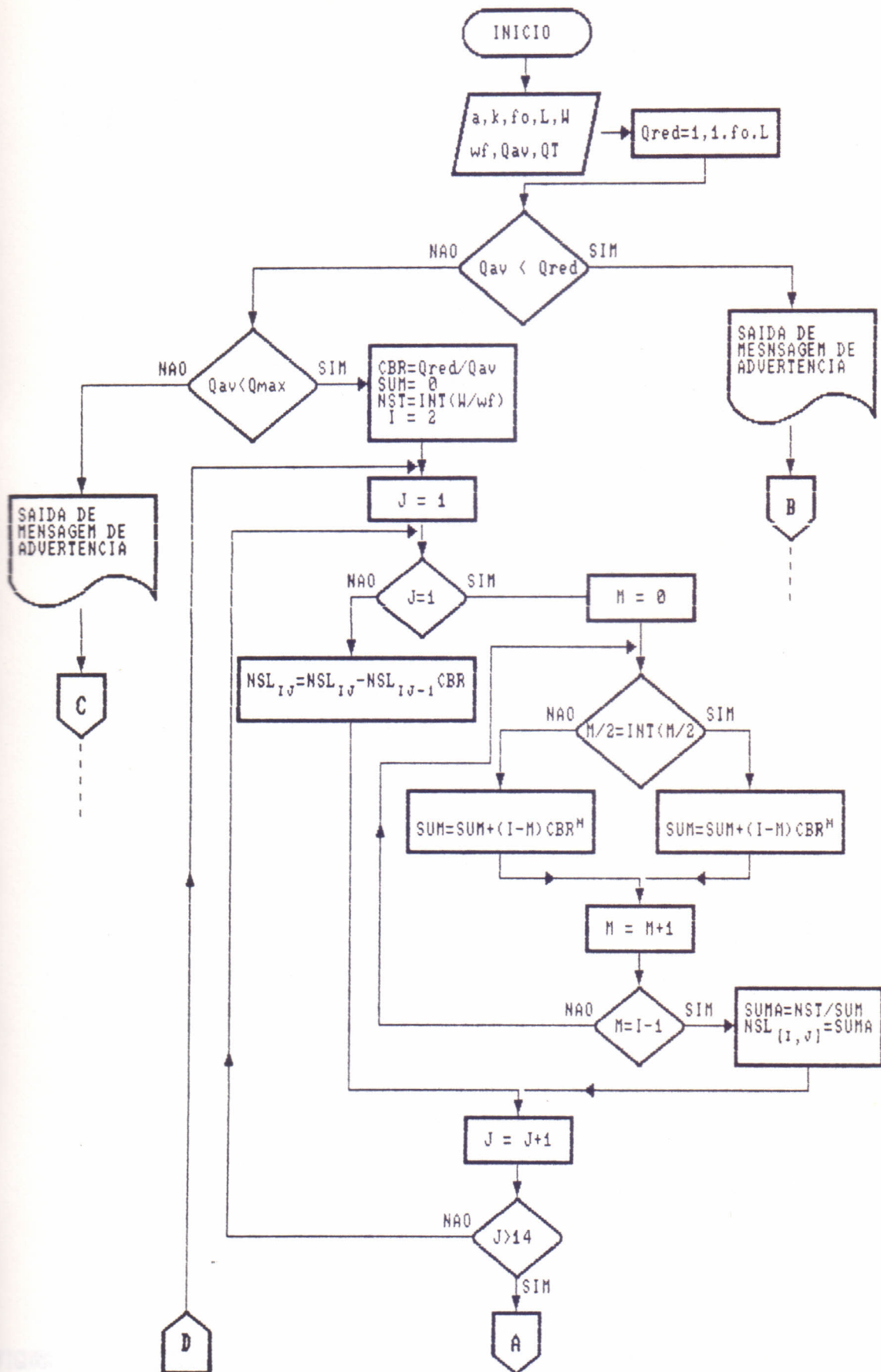


FIGURA 3.9 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO REDUZIDA E POSSÍVEIS "LAYOUTS" DO CAMPO

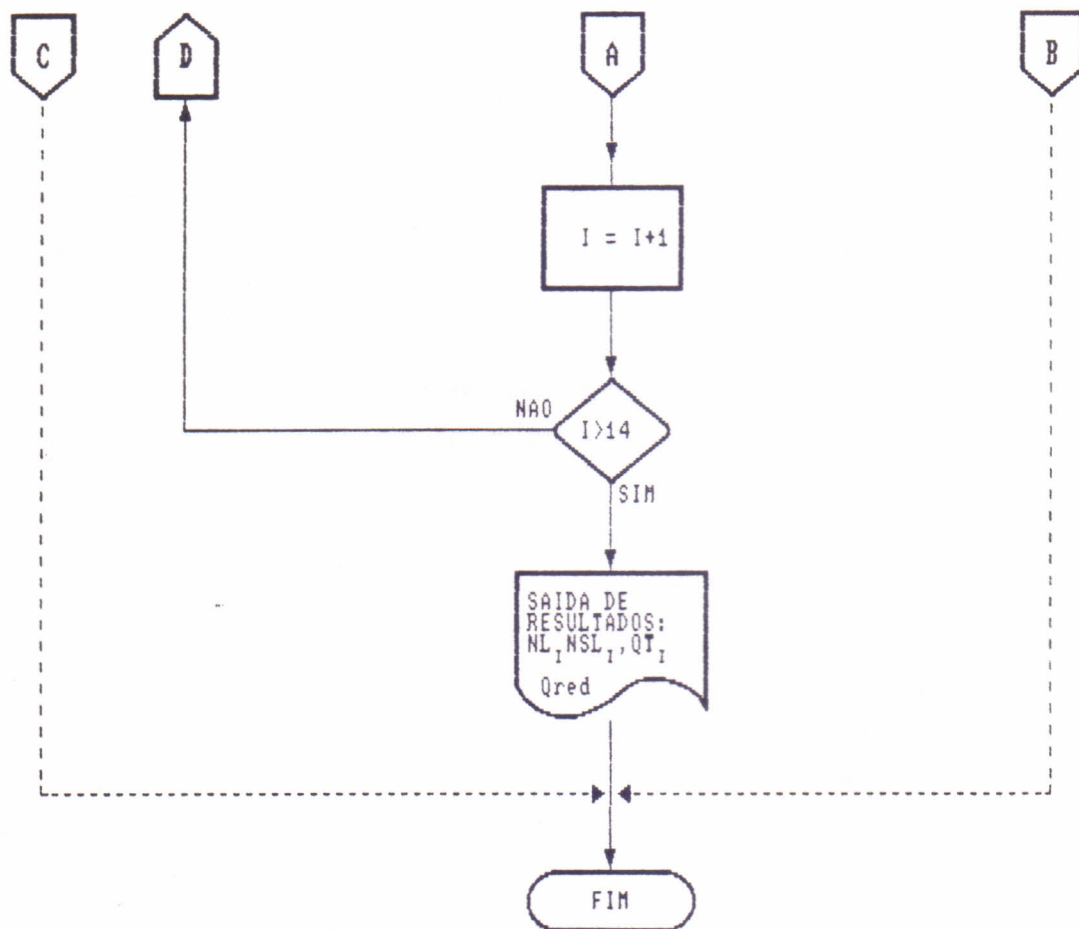


FIGURA 3.9 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO REDUZIDA E POSSÍVEIS "LAYOUTS" DO CAMPO (CONTINUAÇÃO)

Posteriormente elege-se o "layout" em que a vazão total determinada ( $QT_i$ ) e turno de rega determinado ( $TR_i$ ) sejam menores ou iguais a  $QT$  e  $TR$ , respectivamente. O fluxograma da FIGURA 3.10 mostra todos os passos seguidos. O mesmo cálculo é repetido para as irrigações subsequentes.

### 3.1.2.5. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO

Este tipo de sistema fundamenta-se no fato de que a água que escoar no primeiro lote é coletada e reutilizada para a irrigação, incrementando assim o número de sulcos dos lotes subsequentes.

Para reduzir ao máximo as perdas por percolação profunda, a vazão do sulco deverá estar próxima da vazão máxima não erosiva. Um sistema ótimo requer geralmente que a fase de avanço seja completada entre 20 a 30% do tempo de oportunidade (CRIDDLE, 1956).

Para simplificar a operação do sistema considerou-se que o volume de água coletado no primeiro lote é constante, ou seja, em todos os lotes o volume de água coletado será o mesmo e, portanto, o número de sulcos adicionais a irrigar entre o segundo e o último lote também serão os mesmos.

As etapas seguintes no dimensionamento destes sistemas são apresentados a seguir:

Calcula-se a vazão máxima não erosiva, a área média molhada no sulco, o tempo de avanço, o tempo de oportunidade e o tempo de corte, através dos procedimentos VAZÃO<sub>MAX</sub>, ÁREA, TEMP<sub>AV</sub> e TEMP<sub>OP</sub>, respectivamente, conforme apresentados na FIGURA 3.11. Compara-se o tempo de avanço com o tempo de oportunidade, se este for menor que 25% do tempo de oportunidade, reduz-se a vazão por sulco ( $Q_{s_i}$ ), fazendo:

$$Q_{s_i} = Q_{s_{i-1}} \cdot (1 - 0,001) \quad (41)$$



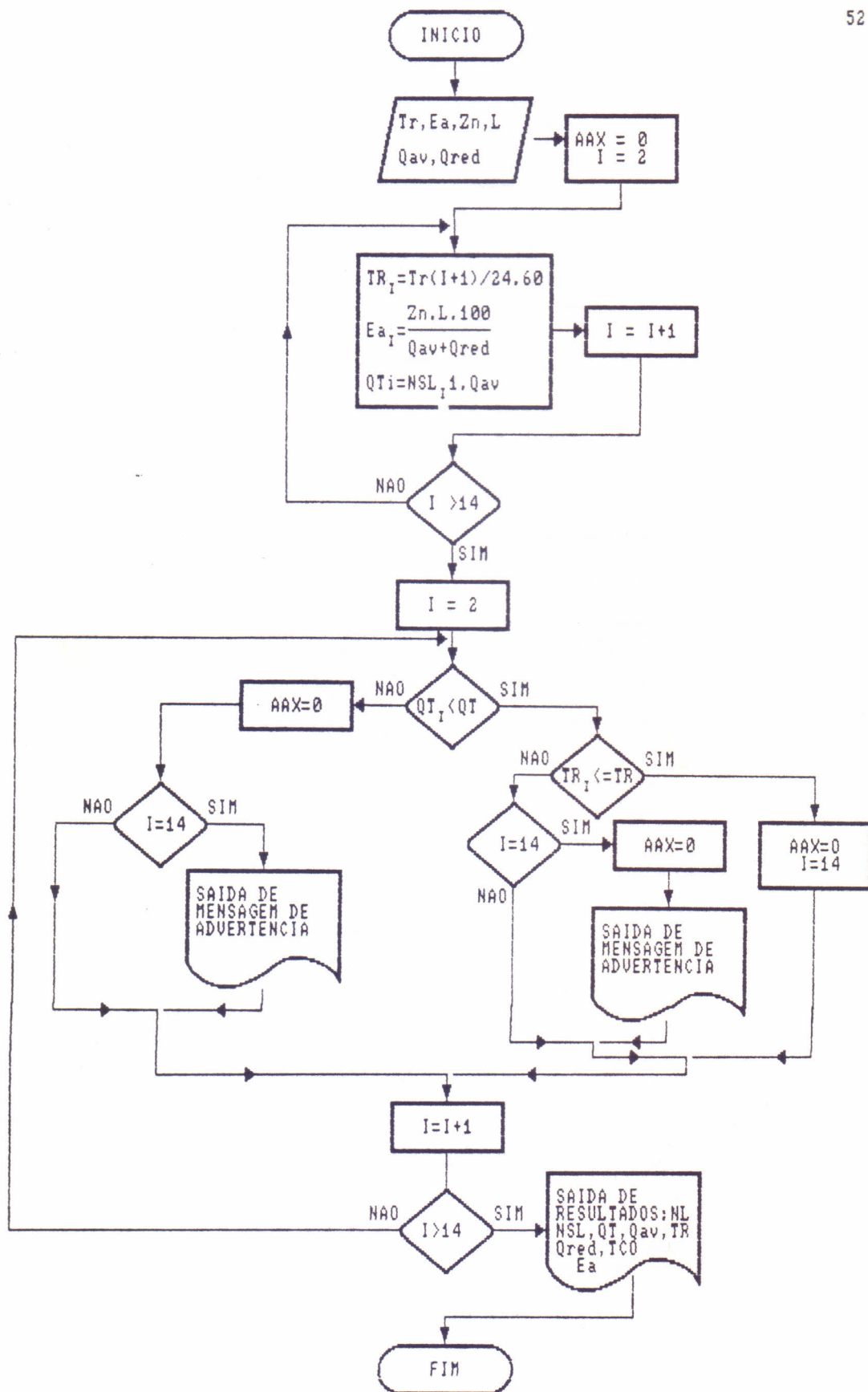


FIGURA 3.18 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINACAO DA VAZAO E TEMPO DE IRRIGACAO PARA CADA "LAYOUT" E ESCOLHA DA DISPOSICAO MAIS APROPRIADA

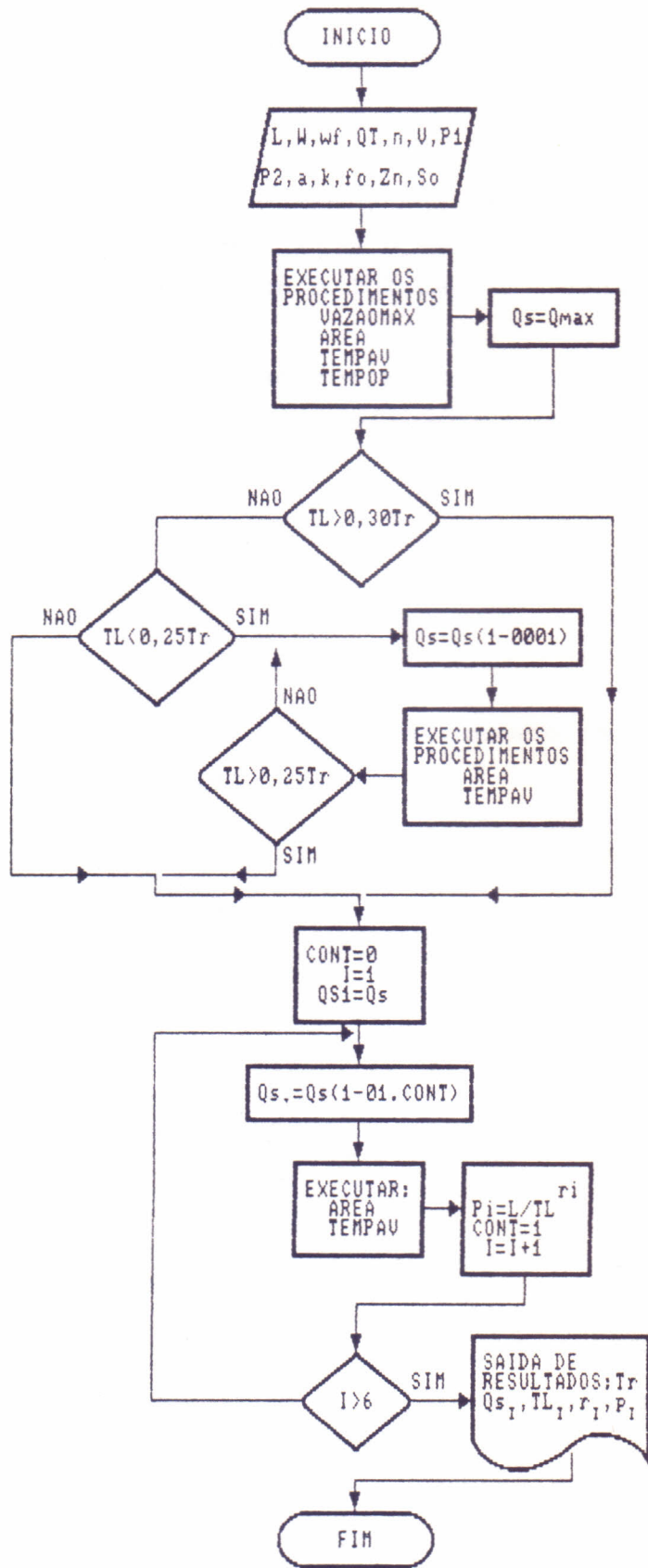


FIGURA 3.11 FLUXOGRAMA PARA CALCULAR AS VAZOES, TEMPOS DE AVANCO E OS COEFICIENTES p e r PARA DIFERENTES "LAYOUTS" DO CAMPO

até obter-se uma vazão em que o tempo de avanço esteja entre 25 - 30% do tempo de oportunidade. Caso o tempo de avanço calculado empregando a  $Q_{max}$  seja superior a 30% de  $T_r$ , faz-se  $Q_s=Q_{max}$  e os cálculos continuam.

Uma vez determinada a vazão por sulco ( $Q_s$ ), calculam-se seis diferentes tempos e coeficientes de avanço com seis diferentes vazões, decrementando-se 10% por vez. A função de avanço empregada é:

$$L = p T_L^r \quad (42)$$

sendo,

$L$  = comprimento do sulco considerado (m);

$T_L$  = tempo de avanço (min);

"p" e "r" = coeficientes empíricos da equação de avanço;

Desta forma obtêm-se seis diferentes disposições do campo ("layout"). Esta sequência de cálculos é esquematizada na FIGURA 3.11.

A eficiência de aplicação ( $E_a$ ) é determinada através do cálculo das perdas por percolação profunda (DPR) e escoamento superficial (TWR). No entanto, deve-se determinar previamente a lâmina total de água infiltrada. Para isto divide-se o campo em dez partes iguais ( $A_x$ ), ou seja:

$$A_x = L/10 \quad (43)$$

calcula-se então o tempo para a água atingir cada um desses pontos com base na seguinte relação:

$$T_L = (L/p)^{1/r} \quad (44)$$

e calcula-se o tempo de oportunidade em cada ponto, ou seja:

$$T_r = T_{co} - T_L \quad (45)$$



a lâmina infiltrada nesse ponto é obtida com a equação de Kostiakov-Lewis (equação 18).

O volume total infiltrado por unidade de profundidade ou a lâmina total infiltrada é determinada mediante integração numérica da equação (18) utilizando a regra do trapézio, resultando em:

$$Z_{int} = Z_{in0} + 2Z_{in1} + 2Z_{in2} + \dots + Z_{inn} \quad (46)$$

onde,

$Z_{int}$  é a soma das lâminas infiltradas ao longo do sulco. O volume total infiltrado ( $V_{oli}$ ) é obtido por:

$$V_{oli} = L.Z_{int}/(2*10) \quad (47)$$

Em seguida determina-se o volume requerido ( $V_{olr}$ ), o volume total aplicado ( $V_{olt}$ ), as perdas por percolação profunda (DPR), as perdas por escoamento superficial (TWR), o volume escoado por sulco ( $V_{sr}$ ), e a eficiência de aplicação ( $E_a$ ), utilizando-se as equações (48) a (53), apresentados a seguir:

$$V_{olr} = Z_n.wf.L \quad (48)$$

$$V_{olt} = Q_s.T_{co} \quad (49)$$

$$DPR = (V_{olt} - V_{olr}).100/V_{olt} \quad (50)$$

$$TWR = (V_{olt} - V_{oli}).100/V_{olt} \quad (51)$$

$$V_{sr} = TWR.V_{olt}/100 \quad (52)$$

$$E_a = 100 - DPR \quad (53)$$

Neste caso, no cálculo da  $E_a$  não são consideradas as perdas por escoamento superficial, uma vez que o volume escoado será reutilizado. Estes cálculos são efetuados para os seis "layouts"

definidos previamente, estando sua sequência apresentada na FIGURA 3.12.

Para determinar o "layout" final do campo, calcula-se o número de lotes irrigáveis com a vazão disponível, utilizando-se a equação a seguir:

$$NL = (Nst.Qs - QT)/(QT.(1 + twr/100)) + 1 \quad (54)$$

A partir deste cálculo apresentam-se diversas opções de "layouts", com a vazão total requerida (QTK) para cada disposição, ou seja:

$$QTK = Nst.Qs/(1 + (NL - 1)(1 + TWR)) \quad (55)$$

Escolhe-se então a vazão total menor ou igual à vazão disponível, tal como ilustrado na FIGURA 3.13. Feito isso determina-se o número de sulcos no primeiro lote (Nsl1), o volume total escoado (Vtro), a vazão de bombeamento (QBOM), o número de sulcos nos lotes intermediários ((Nslin) e o número de sulcos no último lote (Nslf). Para tal utilizam-se as equações (56) a (60), apresentadas a seguir:

$$Nsl1 = QTK/Qs \quad (56)$$

$$Vtro = Vsr.Nsl \quad (57)$$

$$QBOM = Vtro /Tco \quad (58)$$

$$Nslin = QT.(1+TWR/100)/Qs \quad (59)$$

$$Nslf = Nst - (Nsl1+(NL-2).Nslin) \quad (60)$$

O fluxograma da FIGURA 3.14 ilustra a sequência apresentada. Todo este processo é repetido no cálculo das irrigações subsequentes.

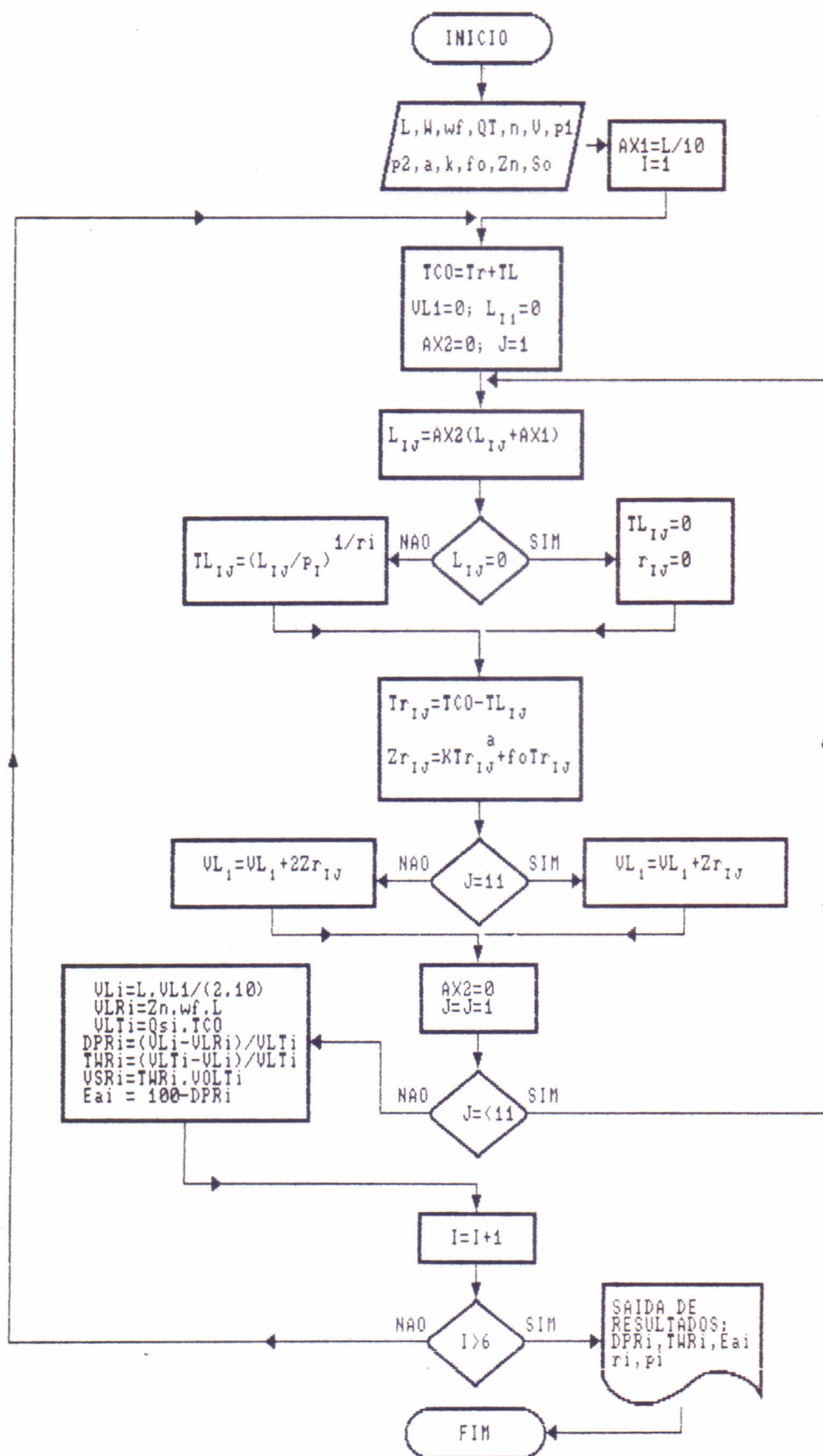


FIGURA 3.12 FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DE "DPR", "TWR" E "Ea" PARA DIFERENTES "LAYOUTS"



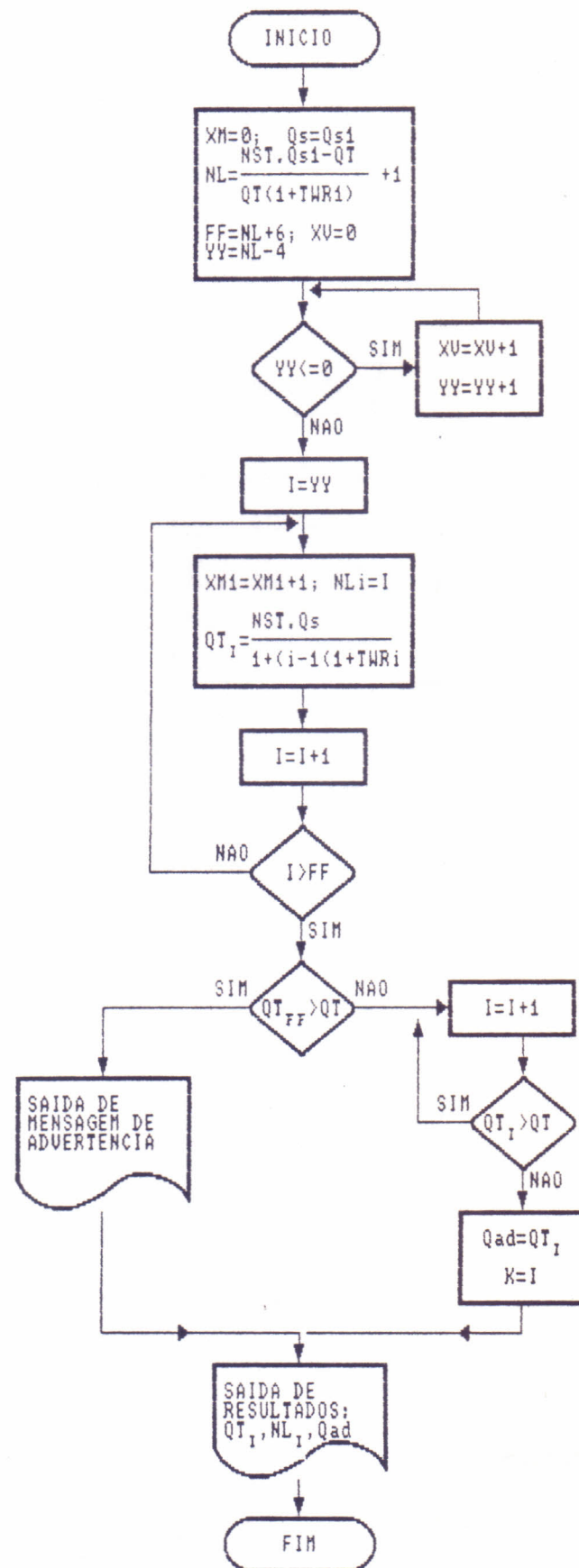


FIGURA 3.13 FLUXOGRAMA PARA CALCULAR A RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE LOTES E A VAZÃO TOTAL PARA A ESCOLHA DA VAZÃO ADEQUADA

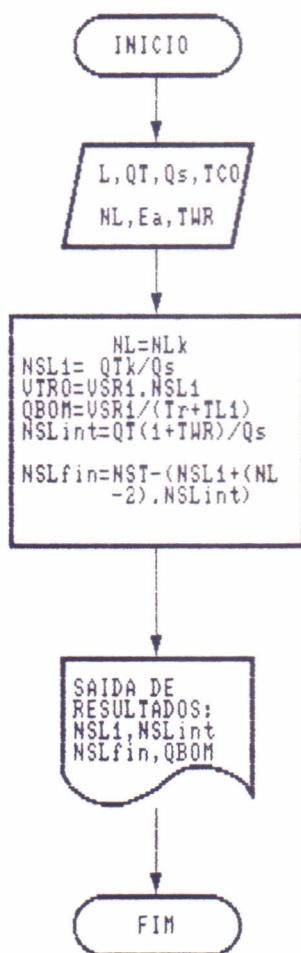


FIGURA 3.14 FLUXOGRAMA PARA A APRESENTAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO MAIS APROPRIADO

### 3.1.2.6. ANÁLISES DA PERFORMANCE DA IRRIGAÇÃO

Com a finalidade de conhecer a melhor performance do sistema, para diferentes opções de comprimento e vazão fez-se um algoritmo com a seguinte sequência:

Inicialmente calcula-se a vazão máxima não erosiva, se esta for maior que  $0,35 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $5,83 \text{ l/s}$ ), faz-se  $Q_s = 0,35$ , caso contrário  $Q_s = Q_{\text{max}}$ .

Os cálculos compreendem três ciclos, o primeiro consiste em testar 10 diferentes comprimentos (LONGI), obtidos dividindo-se o comprimento total (L) em 10 partes (RED), ou seja:

$$\text{RED} = L/10$$

$$\text{LL}_i = \text{LL}_{i-1} + \text{RED}$$

para cada comprimento (LL) testam-se 30 diferentes vazões (REDI):

$$\text{REDI} = Q_s/30$$

Neste primeiro ciclo serão obtidos 300 valores e para cada um desses valores serão calculados o tempo de avanço, tempo de oportunidade, tempo de corte e a eficiência de aplicação.

Posteriormente, elegem-se os valores de L e  $Q_s$  que resultam na maior eficiência. Ao valor de L selecionado são somados e subtraídos cinco valores de RED ( $L/10$ ), um a um, gerando desta forma, dez valores de comprimento (LONGI). O mesmo é feito com a vazão escolhida, sendo gerados 30 valores. São então executados os cálculos para ciclos subsequentes. A sequência de cálculos anteriormente descrita é apresentada na FIGURA 3.15.

Uma vez obtidos os 900 valores de  $E_a$  (300 por ciclo), os mesmos são ordenados de forma decrescente (FIGURA 3.16), para que sejam escolhidos os 50 maiores valores de  $E_a$  superiores a 30%.



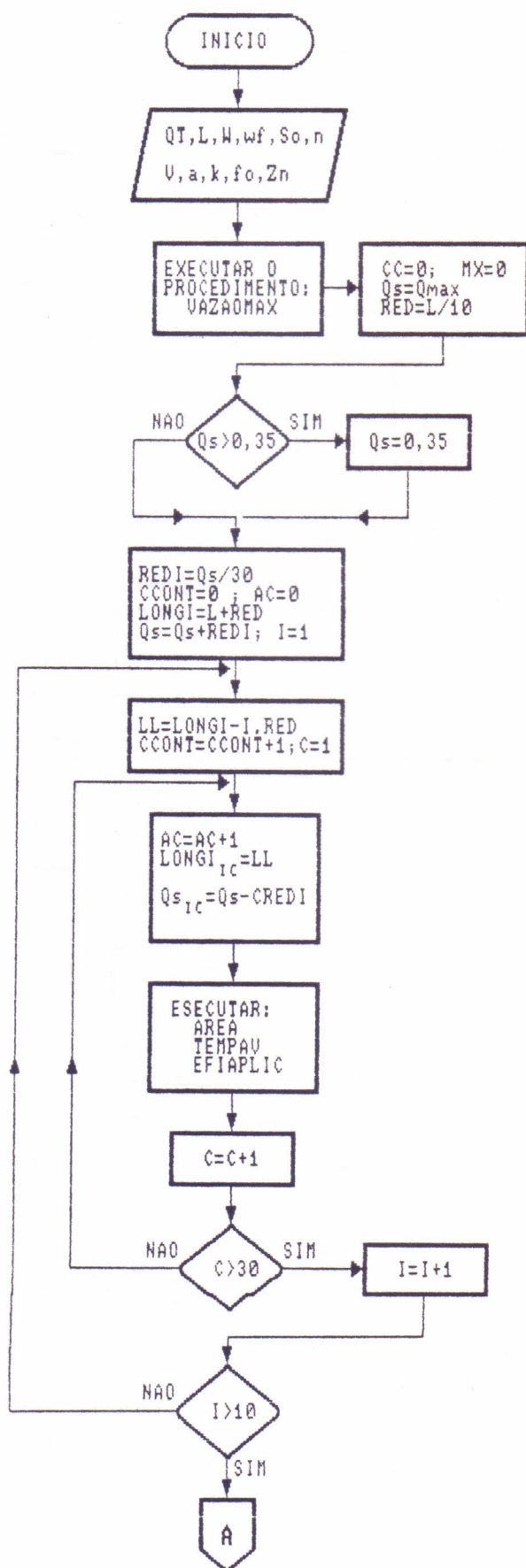


FIGURA 3.15 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAR A PERFORMANCE DO SISTEMA COM "L" E "Qs" VARIÁVEIS

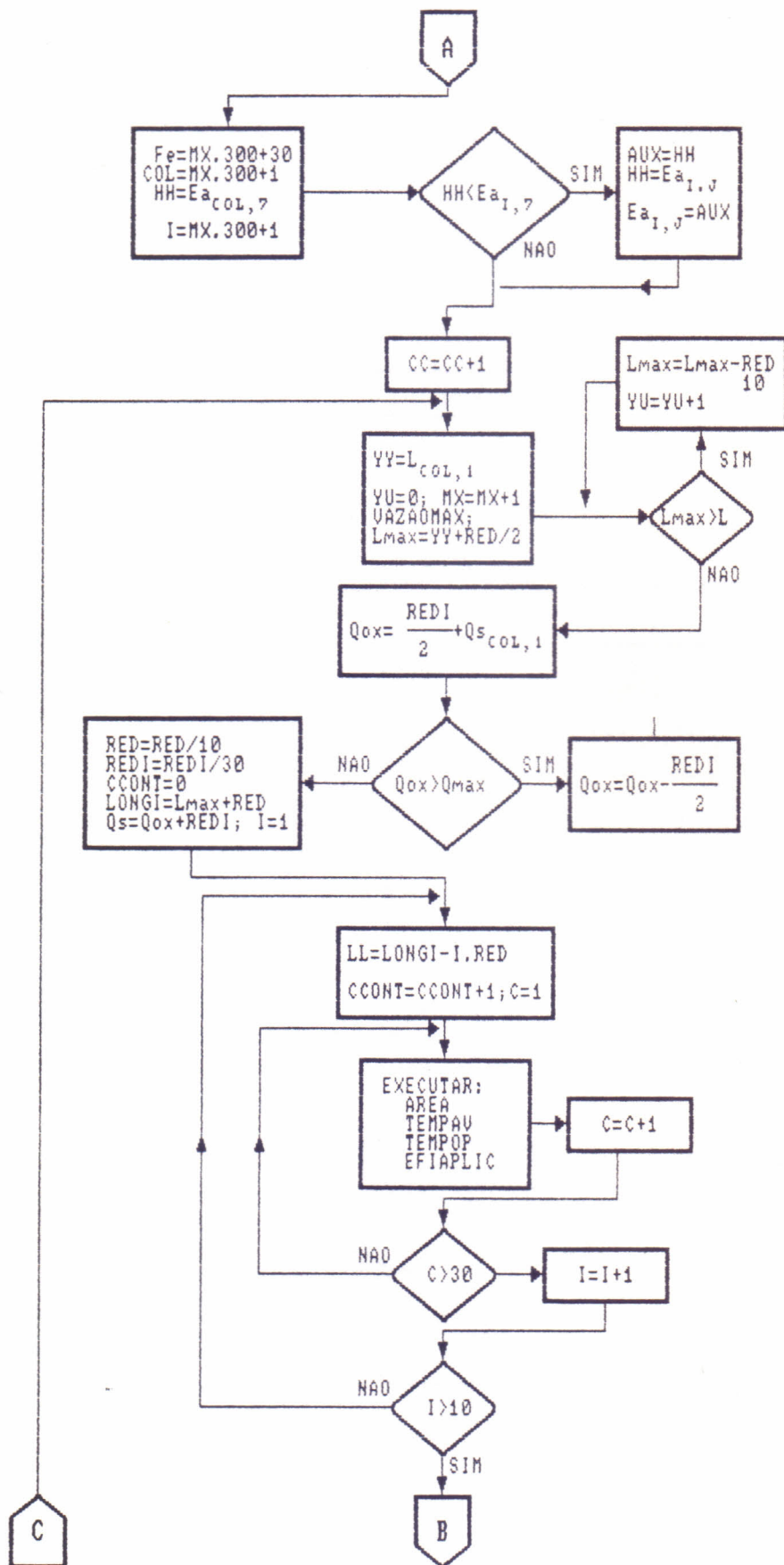


FIGURA 3.15 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAR A PERFORMANCE DO SISTEMA COM "L" E "Qs" VARIÁVEIS (CONTINUAÇÃO).

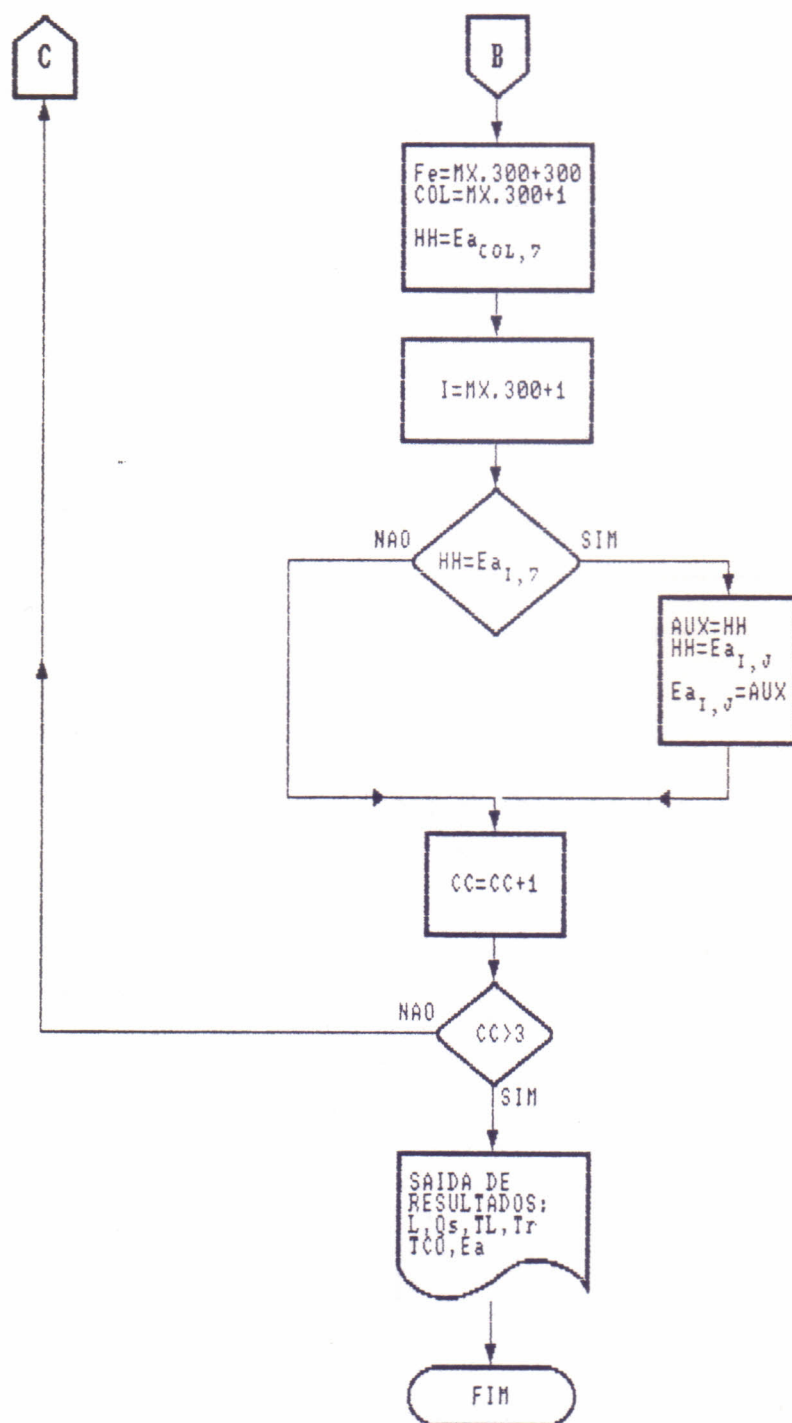


FIGURA 3.15 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAR A PERFORMANCE DO SISTEMA COM "L" E "Qs" VARIÁVEIS (CONTINUAÇÃO)



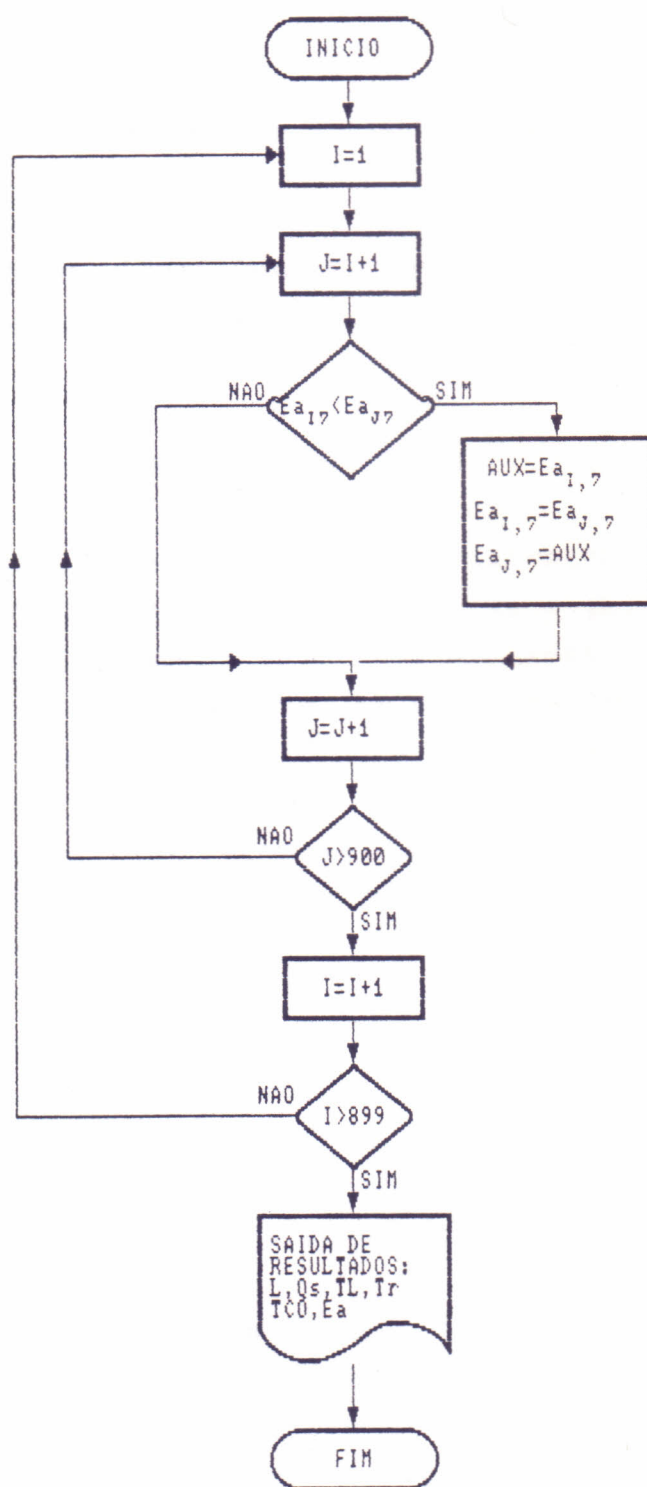


FIGURA 3.16 FLUXOGRAMA PARA ORDENAR DE FORMA DECRESCENTE OS DADOS EM FUNCAO DA EFICIENCIA DE APLICACAO

### 3.2. OBTENÇÃO DE DADOS PARA A VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Para validar o "software" foram utilizados dados originários de WALKER e SKOGERBOE (1987), WALKER (1989), SOUZA et al. (1987), como também dados coletados em campo no distrito de irrigação de Morada Nova-CE.

#### 3.2.1. OBTENÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Para determinar os parâmetros de infiltração ( $a$ ,  $k$ ,  $f_0$ ) e os coeficientes empíricos de forma do sulco ( $\rho$  e  $\rho_c$ ), como também a performance da irrigação, realizaram-se testes de campo no perímetro irrigado de Morada Nova, em uma área de 8250 m<sup>2</sup> com 110 m de comprimento por 75 m de largura e declividade no sentido longitudinal de 3%. Foi adotada a seguinte sequência dos passos:

1) inicialmente coletaram-se do solo amostras para a caracterização físico-hídrica do solo (densidade aparente, conteúdo de umidade a capacidade de campo e ponto de murcha permanente);

2) as calhas Parshall de 1" foram calibradas utilizando-se como método padrão o volumétrico;

3) os sulcos foram construídos seguindo o sentido do maior comprimento e espaçados a um metro de distância. Logo procedeu-se a implantação da cultura do feijão de corda (*Vigna unguiculata* L. Walp) Var Epace 10.

4) três sulcos representativos da área foram selecionados. O sulco central foi empregado para as medições e os sulcos laterais como bordadura para evitar o movimento lateral da água.

5) foram instaladas estacas espaçadas a cada 10 m uma da outra, identificando as estações de medição.

6) foram instaladas calhas Parshall no início e no final do sulco teste.

7) com a ajuda de um perfilômetro, determinou-se antes e depois da irrigação, a seção transversal de escoamento.

8) posteriormente, derivou-se aos sulcos vazões entre 0,7 e 1,0 l/s.

9) registrou-se então o tempo para a água atingir cada estação, bem como a vazão de entrada ( $Q_{en}$ ). Após a frente de avanço atingir o final do sulco, determinou-se, em intervalos regulares de tempo a vazão de entrada e saída ("runoff"). A irrigação foi concluída após a estabilização da vazão de saída ( $Q_{est}$ );

10) imediatamente após o corte do fornecimento de água, registrou-se o instante em que a água desapareceu do começo do sulco (depleção) e o tempo em que a água desapareceu da superfície do sulco nas diferentes estações (recessão).

Para o cálculo dos coeficientes de infiltração e coeficientes da forma do sulco, empregou-se a metodologia dos "dois pontos" baseada no modelo do balanço de volume, apresentada por ELLIOT e WALKER (1982).

Esta metodologia consiste em tomar um segmento do sulco compreendido entre dois pontos (metade do comprimento e comprimento total) e para cada um desses pontos estimar o tempo de avanço e o volume infiltrado. Para tanto foram empregadas as equações (42) e (22).

Na aplicação deste método é imprescindível o conhecimento da área da seção transversal,  $A_o$ , e perímetro molhado,  $P_m$ , os quais foram estimadas pelas seguintes equações:

$$A_o = mD^f \quad (61)$$

$$P_m = \gamma D^v \quad (62)$$

sendo,

$D$  = Largura do sulco (m);

$A_o$  = área da seção transversal de escoamento, em  $m^2$ ;

$P_m$  = perímetro molhado, em m.

$m, f, \gamma, v$  = coeficientes empíricos das equações da área e perímetro.



A combinação das equações (61) e (62) com a equação de Manning resulta:

$$A_0 = k' [Q_s \cdot n / (60 \cdot S_0^{0,485})]^{1/k''} \quad (63)$$

$$k'' = [3 \cdot n / (5 \cdot f - 2v)] \quad (64)$$

$$k' = m [y^{0,67} / m^{1,67}]^{k''} \quad (65)$$

Posteriormente calculou-se o parâmetro "fo" através das hidrógrafos de entrada e saída da água no sulco, ou seja:

$$f_0 = (Q_s - Q_{est}) / L \quad (66)$$

onde:

fo = velocidade de infiltração básica (m<sup>3</sup>/m.min);

Qs = vazão de entrada (m<sup>3</sup>/min);

Qest = vazão de saída estável (m<sup>3</sup>/min).

Para o cálculo de "a" e "k" utilizou-se o seguinte artifício: como a equação (22) é aplicada na metade do comprimento do sulco e no comprimento total, pode-se obter o volume infiltrado na metade do sulco (V<sub>0,5L</sub>) e no comprimento total (V<sub>L</sub>), respectivamente por:

$$V_{0,5L} = 2Q_s \cdot T_{0,5L} / L - \sigma_x \cdot A_0 - \sigma_z \cdot f_0 \cdot T_{0,5L} \quad (67)$$

$$V_L = Q_s \cdot T_L / L - \sigma_x \cdot A_0 - \sigma_z \cdot f_0 \cdot T_L \quad (68)$$

resultando,

$$a = \ln(V_L / V_{0,5L}) / (\ln(T_L / T_{0,5L})) \quad (69)$$

e,

$$k = V_L / (\sigma_z \cdot T_L^a) \quad (70)$$

Os parâmetros assim determinados serão utilizados posteriormente na avaliação e dimensionamento.

#### 4.0. DESCRIÇÃO E UTILIZAÇÃO DO "SOFTWARE"

Embora o programa computacional SIDIS tenha uma estrutura simples, de modo a ser facilmente compreensível pelo usuário, para a sua utilização é imprescindível um certo conhecimento das técnicas do dimensionamento da irrigação superficial.

Como indicado anteriormente, o programa foi desenvolvido na linguagem de programação TURBO PASCAL 7.0, sendo compatível com computadores pessoais no padrão IBM PC XT/AT, operando em ambiente MS-DOS na versão 3.0 ou superior.

Uma vez instalado o "software", deve-se executar o programa principal (SIDIS), digitando o mesmo nome seguido da tecla <ENTER>. Depois da tela de apresentação, aparecerá o menu principal:

##### MENU PRINCIPAL

ENTRADA DE DADOS VIA TECLADO?	DIGITE (1)
RECUPERAÇÃO DE DADOS DE ARQUIVO EM DISCO?	DIGITE (2)
OBSERVAR RESULTADOS DE PROJETOS ANTERIORES?	DIGITE (3)
OBSERVAR O MANUAL DE REFERÊNCIA	DIGITE (4)
VOLTAR AO D.O.S.	DIGITE (5)

DIGITE O VALOR DE SUA ESCOLHA ==> ( )

Para selecionar uma opção deve-se digitar o número correspondente, seguido da tecla <ENTER>.

A primeira opção refere-se aos dados de entrada necessários ao dimensionamento. Deve ser efetuada cuidadosamente para evitar resultados imprecisos. O programa emite um sinal sonoro e uma mensagem na base da tela se o dado de entrada for inválido, por exemplo, uma letra ao invés de um número, um valor fora da faixa. Neste processo, caso o usuário deseje mudar algum dado já entrado, deverá esperar até a entrada total dos dados, quando é

apresentada uma mensagem solicitando a confirmação ou não dos dados. Caso o usuário deseje gravar os dados de entrada, deverá digitar o nome do arquivo e o caminho. O programa automaticamente designará a extensão "INP" aos arquivos deste tipo.

Na segunda opção, quando o usuário preferir recuperar dados do disco, deverá digitar o nome do arquivo (sem a extensão) e o caminho.

Pela terceira opção, pode-se optar por observar os resultados de outros projetos, produto de simulações feitas anteriormente, estando disponíveis quaisquer das seguintes opções:

SULCOS CONVENCIONAIS  
 SULCOS COM REDUÇÃO DE VAZÃO  
 SULCOS COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO  
 ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO

Para o caso de sulcos convencionais os arquivos são identificados pela extensão "OUT", devendo o usuário digitar apenas o nome e "caminho" do arquivo, omitindo a extensão. Para os casos de sulcos com redução de vazão, com re-uso da água de escoamento e análise da irrigação, as extensões dos arquivos são "RED", "TAI" e "LIS", respectivamente.

A quarta opção consta basicamente de algumas informações que irão auxiliar no uso do "SIDIS". Este manual poderá ser impresso facilmente pelo usuário, desde que responda afirmativamente a solicitação do programa.

Concluída a entrada de dados por qualquer via, o programa exhibe o menu secundário "DIMENSIONAMENTO", apresentando as seguintes alternativas:

SULCOS CONVENCIONAIS ?	DIGITE (1)
SULCOS COM REDUÇÃO DE VAZÃO ?	DIGITE (2)
SULCOS COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO ?	DIGITE (3)
FAZER UMA ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO ?	DIGITE (4)
VOLTAR AO MENU PRINCIPAL ?	DIGITE (5)



O dimensionamento de sulcos convencionais pode ser feito levando em conta o campo todo ou sulcos individuais. No primeiro caso, o programa realiza o dimensionamento para o campo projetado, ou seja, considerando toda a largura do terreno, dividindo-o em lotes e calculando a maior eficiência segundo a vazão e número de sulcos por lote. Já na segunda parte (menu terciário), o "SIDIS" faz o dimensionamento por sulco sem levar em conta a largura total do campo (item 3.1.2.3.).

Finalizados os cálculos para todo o lote é apresentada na tela o MENU TERCIÁRIO com as seguintes opções:

CONTINUAR COM OS CÁLCULOS E TENTAR NOVAMENTE?  
REALIZAR O DIMENSIONAMENTO POR SULCO E NÃO POR LOTE?  
VOLTAR AO MENU DIMENSIONAMENTO?

Na segunda e terceira opções o dimensionamento é feito para sistemas com redução e re-uso da água de escoamento, como descrito nos itens 3.1.2.4. e 3.1.2.5., respectivamente.

A opção ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO do menu secundário executa a simulação da irrigação, variando o comprimento (L) e a vazão (Qs) (item 3.1.2.6.). Deve-se esclarecer que esta rotina não foi desenvolvida com o objetivo de dimensionamento, mas para orientar ao usuário sobre os possíveis eventos da irrigação em função de (L) e (Qs).

Todas as opções do menu dimensionamento apresentam o menu terciário para o caso de o usuário desejar continuar com os cálculos, variando valores dos parâmetros. A estrutura de funcionamento do SIDIS está melhor ilustrada na FIGURA 4.1

ORDSC=OBSERV RESULT SULCOS CONVENCIONAIS  
 ORD SRU=OBSERV RESULT SULCOS COM REDUCAO  
 ORD SRU=OBSERV RESULT SULCOS COM RE-USO  
 ORDSIS=OBSERV RESULT DO ANALISE DA IRRIG  
 DIM SUL N/L= DIMENSIONAMENTO POR SULCO  
 E NAO POR LOTE  
 TENT NOV CALC=TENTAR NOVAMENTE COM  
 OS CALCULOS  
 VOLT MPRI=VOLTAR AO MENU  
 PRINCIPAL

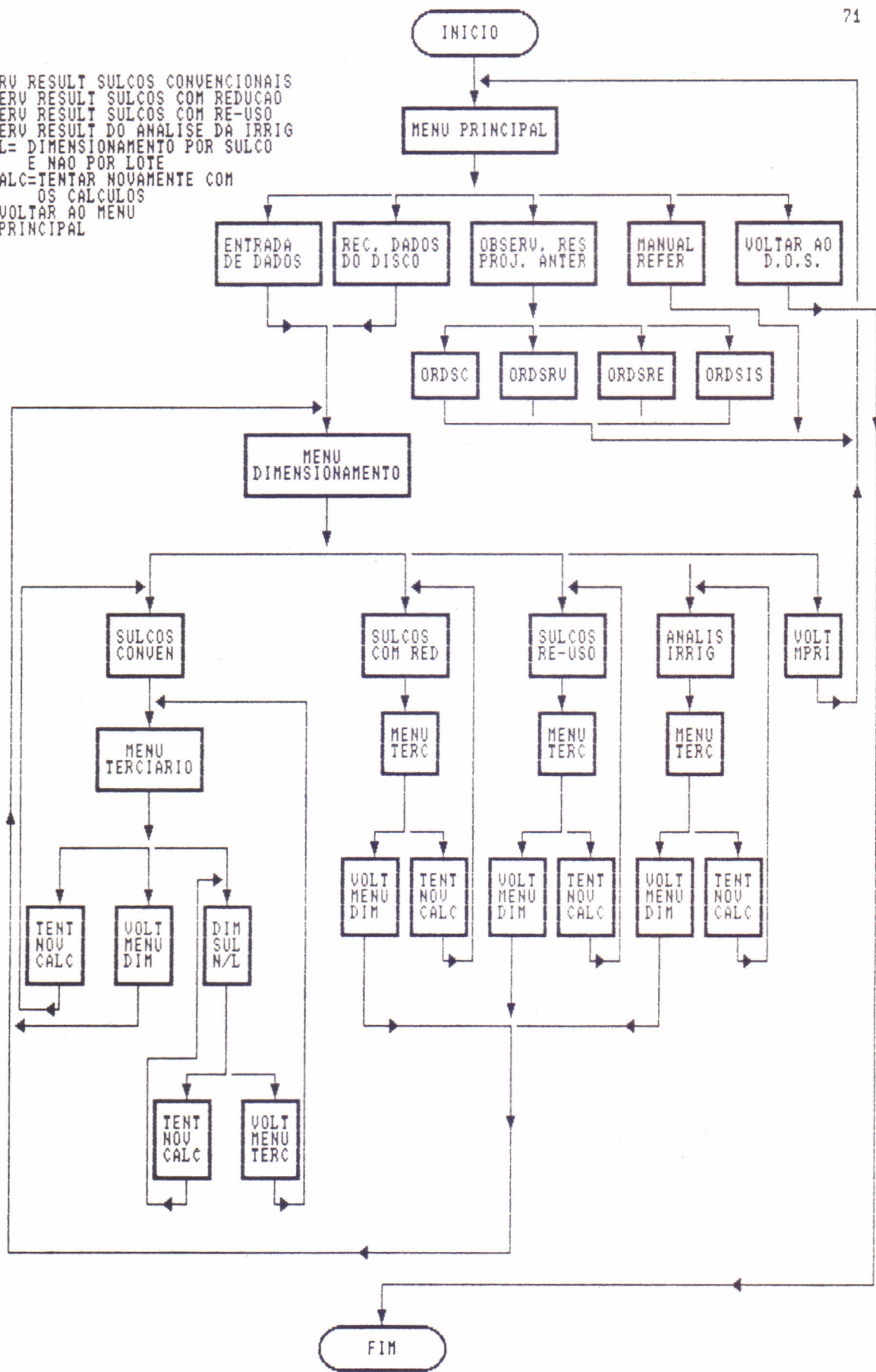


FIGURA 4.1 ESTRUTURA DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE "SIDIS"

Os resultados obtidos através das simulações para as quatro opções de dimensionamento podem ser gravados (caso o usuário deseje), dando o programa, automaticamente, as seguintes extensões aos arquivos gerados:

DIMENSIONAMENTO PARA SULCOS	EXTENSÃO
- convencionais	OUT
- com redução	RED
- com re-uso	TAI
- análise	LIS

Ao executar qualquer dos programas de dimensionamento propriamente dito (SDISC, SDISR, SDIST, SAIS) caso se obtenha resultados ilógicos ou inaceitáveis, como tempos de irrigação muito altos, vazões superiores à vazão máxima não erosiva, baixa eficiência de aplicação (menor que 30%), etc., serão exibidos na tela, mensagens de advertência e algumas sugestões para contornar o problema.



## 5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Para a validação do SIDIS foram feitas simulações para sulcos convencionais, sulcos com redução de vazão e sulcos com re-uso da água de escoamento. Os dados de entrada empregados nas simulações são apresentados na TABELA 5.1.

TABELA 5.1 Dados utilizados nas simulações

PARÂMETRO	FONTE					
	WALKER e SKOGERBOE(1)	WALKER e SKOGERBOE(2)	WALKER e SKOGERBOE(3)	WALKER(4)	SOUZA(5) et al.	MORADA NOVA(6)
Vazão disponível QT (m <sup>3</sup> /min)	6,00	6,00	2,4	1,80	0,06	1,20
Coefde rug de Manning (n)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Declividade So (m/m)	0,008	0,008	0,008	0,001	0,003	0,003
Comprimento (L) (m)	200,00	200,00	200,00	200,00	100,00	110,00
Largura do campo W (m)	720,00	720,00	720,00	100,00		75,00
Espaçamento entre sulcos wf (m)	1,50	0,75	0,75	0,50	1,00	1,00
Velocidade da água V (m/min)	13,00	8,00	8,00	13,00	13,00	12,00
Fatores $\rho^1$	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,60
$\rho^2$	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,360
Parâmetros de infiltração						
			Primeiras irrigações			
a	0,534	0,357	0,357	0,388	0,388	0,2646
k (m <sup>3</sup> /m.min)	0,0028	0,0036	0,0036	0,00346	0,00346	0,00897
fo (m <sup>3</sup> /m.min)	0,00022	0,000046	0,000046	0,000057	0,000057	0,000313
			Irrigações subsequentes			
a	0,331	0,317	0,317	0,327		0,2161
k (m <sup>3</sup> /m.min)	0,0021	0,383	0,00035	0,0038		0,01002
fo (m <sup>3</sup> /m.min)	0,00016	0,000035	0,000035	0,000037		0,000193
Lâmina líquida	0,100	0,100	0,080	0,030		0,035

\*/ vazão para um sulco.

\*/ Para Morada Nova a vazão por sulco foi 0,051384 e 0,060358 m<sup>3</sup>/min para a primeira e terceira irrigação, respectivamente.

Os resultados alcançados com o programa foram comparados com os dados obtidos por WALKER e SKOGERBOE (1987), WALKER (1989), SOUZA et al. (1987). Estes mostraram-se semelhantes: as variações registradas deveram-se ao número de dígitos significativos utilizados. Do mesmo modo, quando confrontados os dados obtidos mediante provas de campo com as simulações feitas com o programa, obtiveram-se diferenças pouco significativas. As maiores diferenças aconteceram na lâmina infiltrada no perfil do solo, devido possivelmente à variação espacial e temporal da infiltração. Em geral, os resultados obtidos corroboram com o afirmado na literatura por autores como BOOHER (1974), BERNARDO (1986), OLITTA (1987), SOUZA (1994), WALKER e SKOGERBOE (1987), WALKER (1989), FRIZZONE (1993), CUENCA (1989), BENAMI e OFEN (1993), entre outros, em relação ao dimensionamento da irrigação por sulcos.

#### 5.1.1. SULCOS CONVENCIONAIS

Na TABELA 5.2 são apresentados os resultados obtidos com o "software", utilizando-se os dados de WALKER e SKOGERBOE (1987) (fonte 1, da TABELA 5.1), tanto para as primeiras irrigações como para as subsequentes. Os resultados são apresentados para diferentes "layouts" do campo, considerando que toda a área é ocupada por um único lote com 480 sulcos irrigados simultaneamente, ou no caso em que a área é dividida, no máximo em, oito lotes com 60 sulcos irrigados simultaneamente. Ou seja, para cada disposição (número de lotes no campo), são apresentados o número de sulcos por lote, a vazão por sulco ( $Q_s$ ), os sulcos que restam a irrigar no final do campo, a seção média transversal ao fluxo ( $A_0$ ), o coeficiente da equação de avanço ( $r$ ), o tempo de avanço ( $T_{av}$ ), o tempo de oportunidade ( $T_{op}$ ), o tempo de irrigação ( $T_{co}$ ) e a eficiência de aplicação ( $E_a$ ). Estes resultados são iguais aos alcançados por WALKER e SKOGERBOE (1987), variando unicamente no número de casas decimais.

Os hifens indicam que as vazões encontradas geram valores do tempo de avanço muito altos, que do ponto de vista operacional não são aplicáveis. Para as condições das primeiras irrigações, valores da vazão inferiores a 0,050 m<sup>3</sup>/min não devem ser considerados. Para as irrigações subsequentes o limite inferior é a 0,0375 m<sup>3</sup>/min.

É bom salientar que o programa gera valores de vazão sempre menores que a vazão máxima não erosiva.

TABELA 5.2 "Layout" e resultados da simulação da irrigação para sulcos convencionais (WALKER e SKOGERBOE, 1987).

Nº lot	Sulc. Lote	Qs (m <sup>3</sup> /min)	Sul Res	Área (m <sup>2</sup> )	r	Tav (min)	Top (min)	Tcor (min)	Ea (%)
PRIMEIRAS IRRIGAÇÕES									
8	60	0,1000	0	0,0078	0,483	81,66	378,73	460,39	65,16
7	68	0,0862	4	0,0071	0,441	115,31	378,73	494,04	68,82
6	80	0,0750	0	0,0063	0,385	198,68	378,73	577,41	69,27
5	96	0,0625	0	0,0055	0,319	442,28	378,73	821,01	58,46
4	120	0,0500	0	0,0047	0,228	2090,92	378,73	2469,65	24,29
3	160	0,0375	0	0,0038	0,196	-	378,73	-	-
2	240	0,0250	0	0,0028	0,500	-	378,73	-	-
1	480	0,0125	0	0,0017	0,500	-	378,73	-	-
IRRIGAÇÕES SUBSEQUENTES									
8	60	0,1000	0	0,0078	0,757	26,16	868,52	894,66	33,53
7	68	0,0862	4	0,0071	0,731	29,80	868,52	896,32	37,65
6	80	0,0750	0	0,0063	0,694	36,05	868,52	904,57	44,22
5	96	0,0625	0	0,0055	0,646	46,35	868,52	914,87	52,47
4	120	0,0500	0	0,0047	0,575	68,23	868,52	936,75	64,05
3	160	0,0375	0	0,0038	0,453	143,65	868,52	1012,17	79,04
2	240	0,0250	0	0,0028	0,176	-	868,52	-	-
1	480	0,0125	0	0,0017	0,500	-	868,52	-	-



Pode-se observar que os valores de eficiência de aplicação para cada configuração variam entre 24,29% para quatro lotes e 69,27% para seis lotes, nas primeiras irrigações, no caso das irrigações subsequentes a Ea alcança um máximo de 79,04% quando a área é dividida em três lotes.

Baseados nos valores anteriores, o programa gera a TABELA 5.3, que apresenta variáveis que outorgam o melhor desempenho do sistema. Para este caso o programa selecionou "layouts" com seis e três lotes, para as primeiras e irrigações subsequentes, respectivamente. Sendo ótimo do ponto de vista prático, pois nas irrigações subsequentes cada lote estará constituído por dois lotes provenientes das primeiras.

TABELA 5.3 "Layout" final com base na melhor performance da simulação

Nº lot	Sulc. Lote	Qs (m <sup>3</sup> /min)	Sul Res	Área (m <sup>2</sup> )	r	Tav (min)	Top (min)	Tcor (min)	Ea (%)
PRIMEIRAS IRRIGAÇÕES									
6	80	0,0750	0	0,0063	0,385	198,68	378,73	577,41	69,27
IRRIGAÇÕES SUBSEQUENTES									
3	160	0,0375	0	0,0038	0,453	143,65	868,52	1012,17	79,04
Vazão tot(m <sup>3</sup> /min)		Tempo Irrig/lote(min)			Tempo de irrig tot(min)				
1ª=irrig	irrig	sub	1ª=irrig	irrig	sub	1ª=irrig	irrig sub		
6	6		577,41	1012,17		2,41	2,11		

Resultados da validação para outras situações apresentadas na TABELA 5.1, podem ser encontradas nas TABELAS A1 a A8 do anexo.

### 5.1.2. SULCOS COM REDUÇÃO DA VAZÃO

Para ilustrar e validar o processo da simulação da irrigação por sulcos com redução da vazão foram tomados dados de entrada de WALKER e SKOGERBOE (1987) (fonte 2, da TABELA 5.1).

Como indicado no item 3.1.2.4., na primeira parte o "software" determina uma vazão ( $Q_{av}$ ) que permita atingir o final do sulco em um tempo ( $T_{av}$ ) igual ao tempo de oportunidade ( $T_{op}$ ). Posteriormente determina a vazão reduzida ( $Q_{red}$ ) para a fase de armazenamento, gerando os dados da TABELA 5.4.

TABELA 5.4 Relação dos tempos de avanço, tempos de oportunidade e vazões para as primeiras e irrigações subsequentes.

Parâmetro	Irrigações	
	Primeiras	Subsequentes
Vazão de avanço ( $m^3/min$ )	0,01496	0,010347
Vazão reduzida ( $m^3/min$ )	0,01012	0,007700
Vazão máxima não erosiva ( $m^3/min$ )	0,01705	0,017050
Tempo de avanço (min)	784,94000	1127,410000
Tempo de oportunidade (min)	785,09000	1127,440000

A partir dos dados anteriores, foram desenvolvidos os possíveis "layouts" do campo (TABELA 5.5), onde para cada disposição são expostos o número de sulcos para cada lote e a vazão total requerida. Deve-se salientar que a determinação do número de sulcos por lote e da vazão total requerida é fortemente influenciada pelas primeiras irrigações, em virtude do solo ter maior capacidade de infiltração.

TABELA 5.5 Configuração do sistema de irrigação por sulcos com redução da vazão.

Nºlot Campo	Número de sulcos por lote para o lote número:														Vazão(m <sup>3</sup> /min) para			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1 <sup>sub</sup> =I	Isub		
2	764	196															11,43	7,91
3	465	119	376														6,96	4,81
4	390	100	316	155													5,83	4,04
5	303	78	245	120	213												4,55	3,14
6	264	67	213	105	186	125											3,95	2,73
7	224	57	181	89	158	107	145										3,35	2,32
8	200	51	162	79	141	95	129	104									2,99	2,07
9	177	45	143	70	125	84	114	92	109								2,65	1,83
10	161	41	130	64	113	77	104	84	99	87							2,41	1,67
11	146	37	116	58	103	70	94	76	90	80	87						2,18	1,51
12	135	35	109	54	95	64	87	70	83	73	80	75					2,02	1,40
13	125	32	101	50	88	59	80	65	76	68	74	69	73				1,87	1,29
14	116	30	94	46	82	55	75	60	71	63	69	65	68	66			1,74	1,20

A TABELA 5.6 apresenta o tempo total de irrigação e a eficiência de aplicação para cada disposição. Nota-se que quanto menor for o número de lotes, menor será o tempo de irrigação. Neste caso a eficiência de aplicação não varia de uma configuração ("layout") para outra, pois, as vazões de avanço e reduzida e os tempos de irrigação envolvidos serão os mesmos. Para o cálculo das eficiências no último lote, assume-se que não haverá redução da vazão.



TABELA 5.6 Tempo de irrigação e desempenho do sistema

Nº lot campo	Tempo de irrigação (dias)		Eficiência de aplicação (%)			
	1ª irrig	irrig sub	1ª irrig		irrig sub	
			lotes últ_lot	lotes últ_lot	lotes últ_lot	lotes últ_lot
2	1,64	2,35	76,20	63,87	73,72	64,29
3	2,18	3,13	76,20	63,87	73,72	64,29
4	2,73	3,91	76,20	63,87	73,72	64,29
5	3,27	4,70	76,20	63,87	73,72	64,29
6	3,82	5,48	76,20	63,87	73,72	64,29
7	4,36	6,26	76,20	63,87	73,72	64,29
8	4,91	7,05	76,20	63,87	73,72	64,29
9	5,45	7,83	76,20	63,87	73,72	64,29
10	6,00	8,61	76,20	63,87	73,72	64,29
11	6,54	9,40	76,20	63,87	73,72	64,29
12	7,09	10,18	76,20	63,87	73,72	64,29
13	7,63	10,96	76,20	63,87	73,72	64,29
14	8,18	11,74	76,20	63,87	73,72	64,29

A seguir o SIDIS escolhe o melhor "layout" (TABELA 5.7) em base a vazão disponível para a irrigação. Para esse "layout" são geradas na TABELA 5.8 os valores das variáveis operacionais como o tempo de irrigação e a vazão por sulco. Pode-se observar também que neste e nos outros sistemas, o tempo de oportunidade é maior para as irrigações subsequentes, em virtude da compactação natural do solo decorrente das irrigações anteriores, diminuindo a capacidade de infiltração do solo.

TABELA 5.7 Configuração final do sistema de acordo com a melhor performance.

Nºlot Campo	Número de sulcos por lote para o lote número:				Vazão(m <sup>3</sup> /min) para	
	1	2	3	4	1 <sup>av</sup> =I	Isub
4	390	100	316	155	5,83	4,04

TABELA 5.8 Vazão por sulco (m<sup>3</sup>/min), tempo de irrigação para todo o campo (dias) e para um lote (min).

Tempo de irrig todo_campo (dias)	Tempo_irrig por lote e vazão_sulco					Ea (%)
	fase_avanço		fase_armazenamento			
	Tav	Qav	Top	Qred	Tco	
	Primeiras irrigações					
2,73	784,94	0,01496	785,08	0,01012	1570,03	76,20
	Irrigações subsequentes					
3,91	1127,41	0,01034	1127,44	0,0077	2254,85	73,72

Estes resultados, assim como outros obtidos (TABELAS A9 a A16 do anexo) são similares aos alcançados pelos autores indicados na TABELA 5.1.

### 5.1.3. SULCOS COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO

Para demonstrar a validade do SIDIS com o sistema de irrigação com re-uso da água de escoamento, foram utilizados dados de entrada extraído de WALKER e SKOGERBOE (1987) (fonte 1, da TABELA 5.1).

Inicialmente, o SIDIS determina uma vazão que possibilite alcançar um tempo de avanço entre 25 a 30% do tempo de oportunidade (regra do 1/4) (TABELA 5.9).

TABELA 5.9 Relação da vazão por sulco, tempo de avanço e tempo de oportunidade para os sistemas de irrigação com re-uso da água de escoamento.

Primeiras irrigações			Irrigações subsequentes		
Qs (m <sup>3</sup> /min)	Top (min)	Tav (min)	Qs (m <sup>3</sup> /min)	Top (min)	Tav (min)
0,09048	378,73	107,11	0,03291	868,52	250,36
0,08143	378,73	148,51	0,02962	868,52	536,06
0,07329	378,73	217,01	0,02666	868,52	-
0,06596	378,73	339,66	0,02399	868,52	-
0,05936	378,73	585,72	0,02159	868,52	-
0,05343	378,73	1177,60	0,01943	868,52	-

Com os dados obtidos anteriormente, o programa desenvolve várias configurações sob diferentes "layouts" (TABELA 5.10), de acordo com a metodologia indicada no item 3.1.2.5., onde para cada disposição são expostos a vazão por sulco, o tempo de avanço, o tempo de oportunidade, os coeficientes da equação de avanço (p, r) as perdas por percolação (DPR), as perdas por escoamento (TWR), o volume escoado por sulco (Vsr) e a eficiência de aplicação.

Pode-se observar que quando diminuiu-se a vazão, o tempo de avanço sofre um incremento incidindo na performance do sistema.



Por exemplo, um decréscimo de 10% da vazão, produz uma diminuição de 5% da Ea.

Os hifens indicam que o tempo de avanço alcançou valores muito altos ou que as perdas por escoamento (TWR) são muito baixas não, valendo a pena fazer re-uso da água escoada.

TABELA 5.10 Configuração do sistema com re-uso da água de escoamento para diferentes valores de vazão por sulco.

Qs (m <sup>3</sup> /min)	Tav (min)	Top (min)	p	r	DPR (%)	TWR (%)	Vsr (m <sup>3</sup> )	Ea (%)
Primeiras irrigações								
0,09048	107,11	378,73	24,47	0,449	10,38	21,38	9,40	89,62
0,08143	148,51	378,73	25,27	0,414	15,02	15,10	6,48	84,98
0,07329	217,01	378,73	26,30	0,377	21,98	9,31	4,08	78,02
0,06596	339,66	378,73	27,67	0,339	32,16	4,51	2,14	67,82
0,05936	585,72	378,73	29,57	0,300	46,36	1,25	0,71	53,64
0,05343	1177,60	376,73	32,38	0,258	64,12	-	-	-
Irrigações subsequentes								
0,03291	250,36	868,52	24,82	0,378	15,45	3,08	1,13	84,55
0,02962	536,06	868,52	31,07	0,296	30,99	-	-	-
0,02666	-	868,52	-	0,133	-	-	-	-
0,02399	-	868,52	-	0,258	-	-	-	-
0,02159	-	868,52	-	0,184	-	-	-	-
0,01943	-	868,52	-	0,500	-	-	-	-

Na TABELA 5.11 é apresentada a relação de número de lotes e vazão total requerida para cada disposição, gerando-se assim uma série de valores permitindo uma maior flexibilidade ao projetista.

Baseado nos resultados anteriores são apresentados os "layouts" que geram o melhor desempenho do sistema (TABELA 5.12).

TABELA 5.11 Relação entre a vazão total e o número de lotes

Primeiras irrigações		Irrigações subsequentes	
Número de lote	Vazão total (m <sup>3</sup> /min)	Número de lote	Vazão total (m <sup>3</sup> /min)
12	3,028	9	1,708
11	3,306	8	1,923
10	3,642	7	2,199
9	4,055	6	2,567
8	4,573	5	3,083
7	5,244	4	3,860
6	6,144	3	5,160
5	7,418	2	7,778
4	9,357	1	15,796
3	12,671		
2	19,618		

TABELA 5.12 Configuração final do sistema segundo a melhor performance.

Nº	Número de sulcos no:	Qs	QBOMB	QReq	Tco	Ea
Lote 1 <sup>o</sup>	Lot_int	Últ_lot	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /min)	(m <sup>3</sup> /min)	(min) (%)
Primeiras irrigações						
7	58	70	72	0,09048	1,121	5,244 485,84 89,62
Irrigações subsequentes						
7	67	69	68	0,03290	0,059	2,199 1118,87 84,55

Estes resultados e os apresentados nas TABELAS A17 a A25 do anexo, são semelhantes aos encontrados por WALKER e SKOGERBOE (1987) e WALKER (1987).

Comparando este sistema com os anteriores, constatou-se que com este último obtiveram-se as maiores eficiências.

#### 5.1.4. DADOS DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO MORADA NOVA

Na validação do "software" foram também empregados dados coletados no distrito irrigado de Morada Nova (fonte 6, da TABELA 5.1). Nas TABELAS 5.13 e 5.14, são apresentados os resultados simulados através do SIDIS e os observados no campo, para as primeiras e irrigações subsequentes, respectivamente.

Para a primeira irrigação (TABELA 5.13 e FIGURA 5.1), pode-se notar que os tempos de avanço observados e simulados foram similares, obtendo-se um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,997. Com relação aos tempos de recessão, os dados observados foram superiores aos simulados. Isto pode ser explicado pelo fato de que a metodologia empregada na elaboração do programa foi desenvolvida baseada fundamentalmente nas curvas de avanço, e considerando o tempo de recessão igual a zero, isto é, a água desaparece do sulco imediatamente após o corte. Na realidade notou-se que isto não acontece, levando um tempo para a água desaparecer do sulco.

O fato anterior influenciou nos tempos de oportunidade, sendo que os tempos observados foram superiores aos simulados, o que fez com que as lâminas de água infiltradas observadas fossem também superiores às simuladas, mas em ambos casos a lâmina requerida foi satisfeita, sendo as eficiências de aplicação observada e simulada iguais a 44,96 e 46,77%, respectivamente.



TABELA 5.13 Confronto entre os dados observados no campo e estimados pelo SIDIS (primeira irrigação).

Estação	Tempo (min)								
	L(m)	Avanço		Recessão		Oportunidade		Zinf(m)	
		Observ	Simul	Observ	Simul	Observ	Simul	Observ	Simul
0	0	0	0,00	160*	160	160	160,0	0,08443	0,08444
1	10	2	2,94	162	160	160	157,1	0,08443	0,08335
2	20	5	7,21	166	160	161	152,8	0,08481	0,08176
3	30	10	12,58	160	160	150	147,4	0,08073	0,07976
4	40	19	19,08	170	160	151	140,9	0,08109	0,07733
5	50	30	26,87	168	160	138	133,1	0,07623	0,07439
6	60	39	36,17	164	160	125	123,8	0,07131	0,07086
7	70	49	47,31	170	160	121	112,7	0,06978	0,06659
8	80	62	60,75	165	160	103	99,3	0,06282	0,06134
9	90	82	77,13	171	160	89	82,8	0,05727	0,05481
10	100	105	97,40	166	160	61	62,6	0,04571	0,04639
11	110	125	123,00	168	160	43	37,0	0,03773	0,03490

\*/ Tempo de irrigação igual a 160 min.

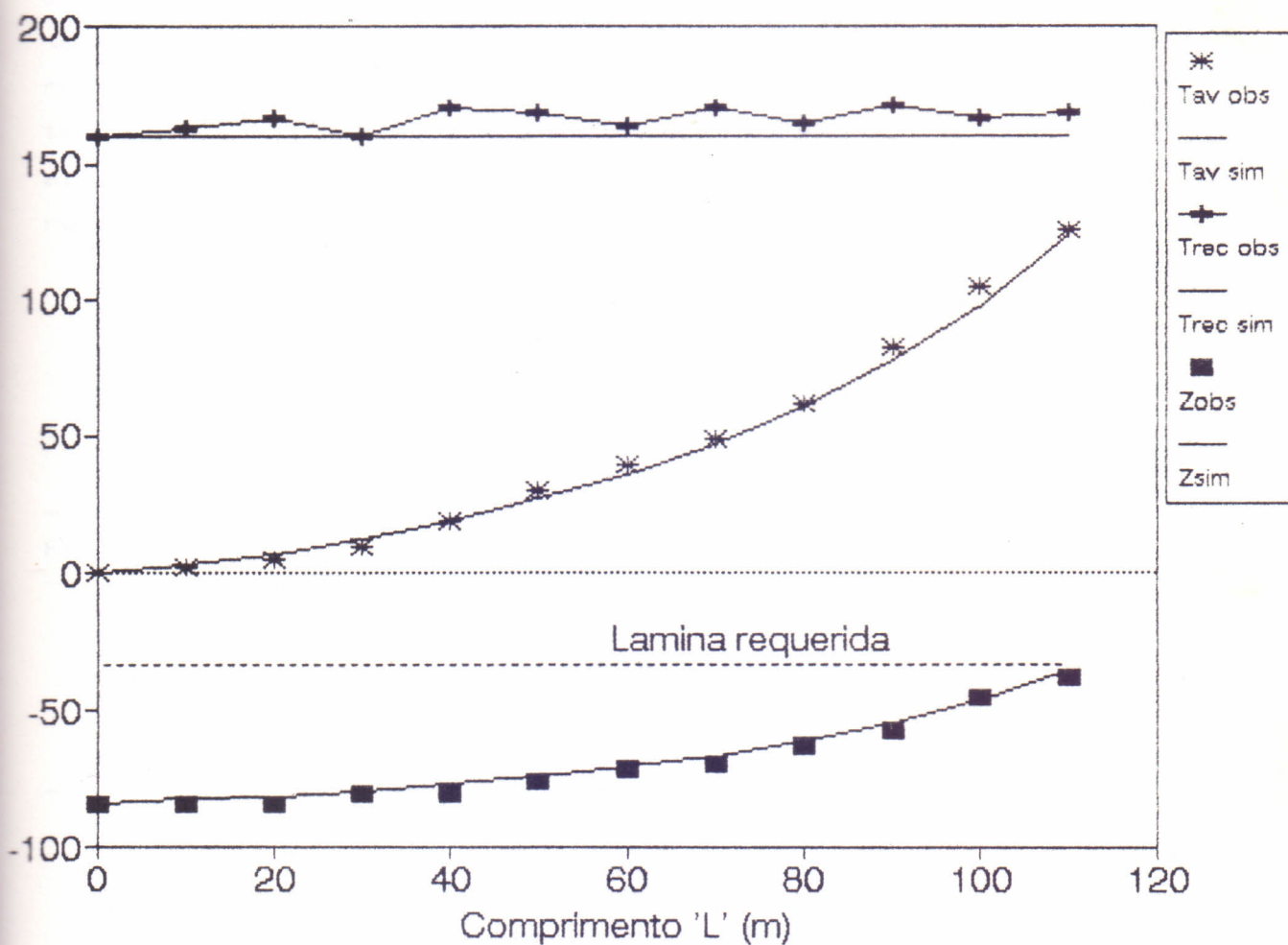


FIGURA 5.1 CURVAS DE AVANÇO E RECESSÃO E LAMINA INFILTRADA (PRIMEIRA IRRIGACÃO)

Para o caso da terceira irrigação (TABELA 5.14 e FIGURA 5.2), a diferença entre os valores dos tempos de avanço observados e estimados foi menor às demais irrigações, produzindo um coeficiente de determinação,  $r$ , igual a 0,9989. Os tempos de recessão observados também diferiram dos simulados, afetando os tempos de oportunidade e lâminas infiltradas. As eficiências de aplicação observada e simulada, foram 53,97 e 54,45%, respectivamente.

TABELA 5.14 Confronto entre os dados observados no campo e estimados pelo SIDIS (terceira irrigação).

Estação	Tempo (min)								
	L(m)		Avanço		Recessão		Oportunidade		Zinf(m)
	Observ	Simul	Observ	Simul	Observ	Simul	Observ	Simul	
0	0	0	0,00	121	120*	121	120,0	0,05159	0,05136
1	10	3	2,68	127	120	124	117,3	0,05233	0,05070
2	20	6	6,17	135	120	129	113,8	0,05354	0,04985
3	30	9	10,19	135	120	126	109,8	0,05261	0,04885
4	40	15	14,69	135	120	120	105,3	0,05136	0,04774
5	50	21	19,65	133	120	112	100,4	0,04939	0,04649
6	60	26	25,07	137	120	111	94,9	0,04915	0,04513
7	70	31	30,99	140	120	109	89,0	0,04865	0,04361
8	80	37	37,41	140	120	103	82,6	0,04716	0,04195
9	90	45	44,39	138	120	93	75,6	0,04463	0,04011
10	100	52	51,96	139	120	87	68,0	0,04309	0,03807
11	110	61	60,18	139	120	78	59,8	0,04074	0,03580

\*/ Tempo de irrigação igual a 120 min.



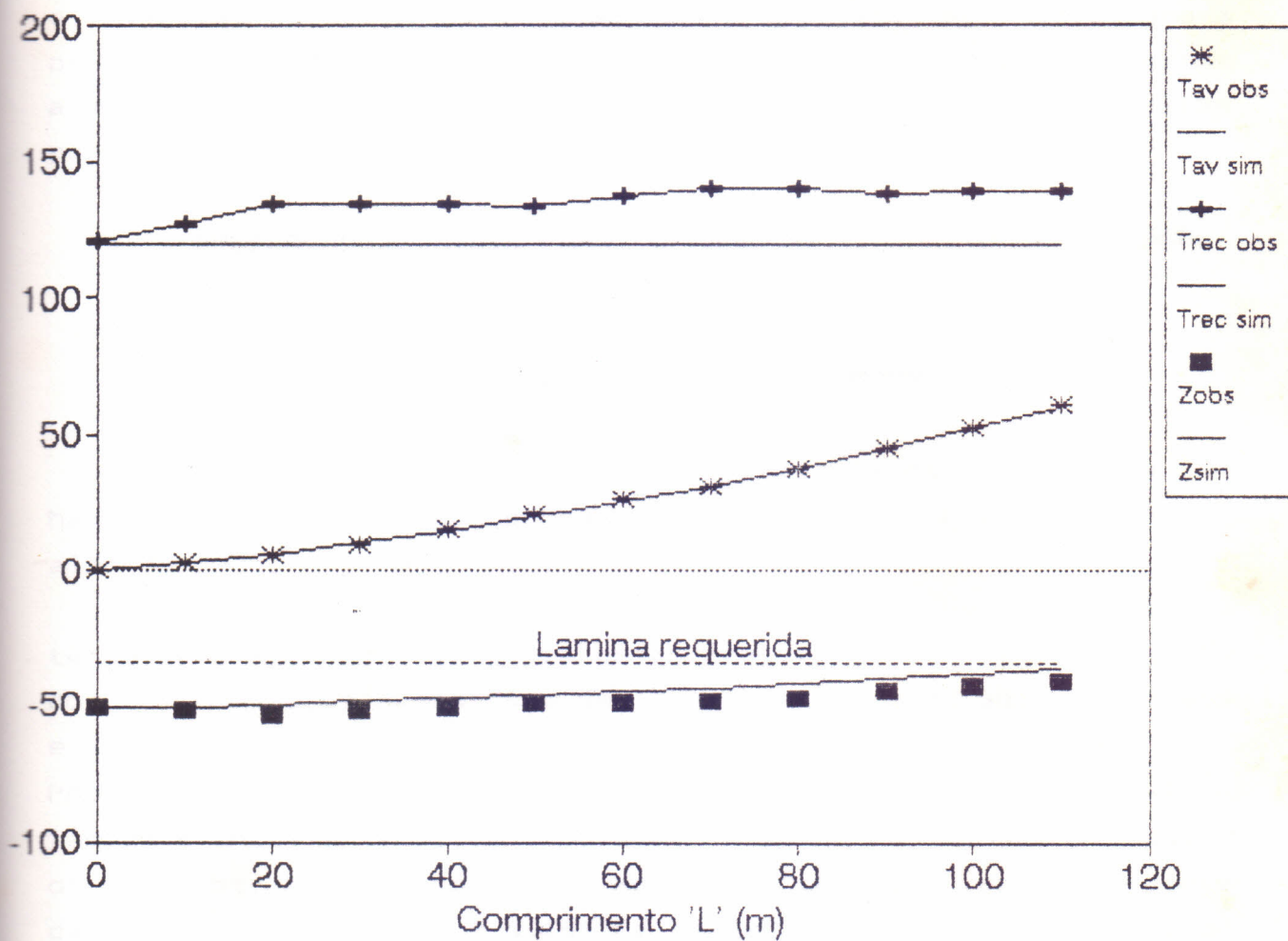


FIGURA 5.2 CURVAS DE AVANÇO E RECESSÃO E LAMINA INFILTRADA (TERCEIRA IRRIGACÃO)

Embora existam diferenças, principalmente nos tempos de recessão observados e simulados, o desempenho do sistema não foi grandemente afetado, tendo sido registrados diferenças entre as eficiências de aplicação (observada e simulada) de 3,87% para a primeira irrigação e 0,88% para a terceira, comprovando-se assim a adequabilidade do programa para o dimensionamento da irrigação por sulcos.

## 5.2. APLICAÇÃO DO SIDIS PARA A ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS DE PROJETO

### 5.2.1. COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (n)

Para estudar os efeitos do coeficiente de rugosidade de Manning (n) utilizaram-se dados de WALKER e SKOGERBOE (1987), além de dados da TABELA 3.2.

Nas TABELAS 5.15 a 5.17 são apresentados os valores de área, tempo de avanço e eficiência de aplicação obtidos pela variação do coeficiente de rugosidade de Manning (n), para solos arenosos e argilosos, respectivamente, tomando valores entre 0,01 e 0,15. Pode-se observar que ao incrementar-se "n", o tempo de avanço também é incrementado, isto porque a maior rugosidade dificulta o movimento da água no sulco. Nos solos arenosos (primeira parte da TABELA 5.15 e TABELA 5.16) a variação dos tempos de avanço ficou entre 6 e 44%, nos solos argilosos (segunda parte da TABELA 5.15 e TABELA 5.17) estas variações estiveram entre 11 e 60%.

Com relação a eficiência de aplicação, este parâmetro não provocou variações tão acentuadas, observando-se para solos arenosos variações entorno de 4 e 8%, e para solos argilosos na faixa de 1 e 5%.

TABELA 5.15 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (dados de WALKER e SKOGERBOE, 1987).

Dados de entrada							
L = 200 m	V = 13 m/min	Zn = 0,10 m	Wf = 1,5m	So = 0,008m/m			
	QSul = 0,0625 m <sup>3</sup> /min		p1 = 0,57		p2 = 1,367		
Resultados para as primeiras irrigações							
a = 0,534	k=0,0028 m <sup>3</sup> /m.min	fo=0,00022 m <sup>3</sup> /m.min				Top = 378,73 min	
n	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.15
Ao (m <sup>2</sup> )	0.0020	0.0033	0.0055	0.0083	0.0045	0.0108	0.0145
r	0.2935	0.3040	0.3257	0.3364	0.3124	0.3494	0.3663
Tav (min)	435.61	437.15	445.32	451.88	439.50	462.27	479.98
Ea (%)	58.94	58.83	58.25	57.79	58.66	57.07	55.90
Resultados para as irrigações subsequentes							
a = 0,331	k=0,0021m <sup>3</sup> /m.min	fo=0,00015 m <sup>3</sup> /m.min				Top = 868,52min	
n	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.15
Ao (m <sup>2</sup> )	0.0020	0.0033	0.0065	0.0083	0.0045	0.0108	0.0145
r	0.5882	0.6157	0.6558	0.6705	0.6333	0.6855	0.7015
Tav (min)	31.73	42.07	50.32	57.57	42.07	67.31	81.71
Ea (%)	53.32	52.99	52.24	51.83	52.71	51.29	50.51



TABELA 5.16 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (solo arenoso).

Dados de entrada							
L=100m	V=13 m/min	Zn = 0,10 m	Wf = 1,5m	So = 0,008m/m			
Q <sub>Sul</sub> = 0,085 m <sup>3</sup> /min		p <sub>1</sub> = 0,57		p <sub>2</sub> = 1,367			
a = 0,598	k=0,00332m <sup>3</sup> /m.min	fo=0,00021m <sup>3</sup> /m.min	Top=266,1min				
n	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.15
Ao (m <sup>2</sup> )	0.0025	0.0042	0.0069	0.0093	0.0115	0.0135	0.0182
r	0.4220	0.4545	0.4942	0.5199	0.5389	0.5538	0.5810
Tav (min)	32.05	34.62	39.10	43.04	46.61	49.92	57.41
Ea (%)	59.20	58.69	57.83	57.09	56.44	55.85	54.56

TABELA 5.17 Efeito do coeficiente de rugosidade de Manning (n) sobre o tempo de avanço e eficiência de aplicação (solo argiloso).

L = 100 m	V = 13 m/min	Zn = 0,10 m	Wf = 1,5m	So = 0,008m/m			
Q <sub>Sul</sub> = 0,010 m <sup>3</sup> /min		p <sub>1</sub> = 0,57		p <sub>2</sub> = 1,367			
a = 0,357	k=0,0036 m <sup>3</sup> /m.min	fo=0,000046 m <sup>3</sup> /m.min	Top= 2066,6min				
n	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.15
Ao (m <sup>2</sup> )	0.0005	0.0009	0.0014	0.0019	0.0024	0.0028	0.0038
r	0.5055	0.5096	0.5161	0.5214	0.5260	0.5301	0.5390
Tav (min)	352.02	356.64	364.34	371.04	377.16	382.89	396.02
Ea (%)	62.02	61.90	61.70	61.53	61.38	61.24	60.91

Por outro lado, observou-se que a medida que o coeficiente de rugosidade de Manning é incrementado, a área de fluxo também aumenta já que, para uma mesma vazão, a área de fluxo varia diretamente com "n". Assim, para valores elevados de "n", a velocidade de escoamento será menor, portanto, a área e o tempo de avanço, serão maiores. Observando-se as equações (20) e (21) verifica-se ainda que "n" influencia no cálculo da vazão, área e, conseqüentemente, no tempo de avanço.

Conclui-se assim que o coeficiente de rugosidade de Manning "n" influencia na performance do sistema, porém em proporções relativamente baixas.

#### 5.2.2 COEFICIENTES DA FORMA DO SULCO ( $\rho_1$ e $\rho_2$ )

No que se refere aos coeficientes empíricos de forma de sulco ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ), foram efetuadas simulações variando-se os valores de  $\rho_1$  e  $\rho_2$  segundo os dados da TABELA (3.1), e mantendo constantes os demais parâmetros. Os resultados estão nas TABELAS 5.18 a 5.20, podendo-se indicar que do ponto de vista do dimensionamento estes parâmetros não têm muita influência na performance do projeto, essencialmente no tocante ao tempo de avanço e a eficiência de aplicação, tendo os coeficientes de variação flutuando entre 0,066 a 4,56% e 0,041 e 0,23%, respectivamente.

A TABELA 5.18 ilustra os resultados obtidos para a simulação com nove diferentes valores de  $\rho_1$  e  $\rho_2$  sugeridos por WALKER (1989). Pode-se notar que praticamente não existem diferenças entre os resultados obtidos de tempo de avanço e eficiência de aplicação, sendo os coeficientes de variação muito pequenos.



TABELA 5.18 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função dos fatores empíricos de forma do sulco 'p1' e 'p2'.

L=200m      V = 13 m/min      Zn = 0,1 m										
f=1,5m      So=0,008m/m      Qsul=0,06m3/min      n= 0,04										
a=053      K=00028m3/mmin      fo = 0,00022 m3/m.min      Top = 378,73 min										
p1	0.464	0.487	0.503	0.498	0.513	0.432	0.582	0.591	0.585	CV (%)
p2	1.333	1.333	1.333	1.325	1.329	1.290	1.352	1.361	1.366	
A0 (m2)	00055	00053	00051	00050	00050	00049	00050	00051	00052	
r	03047	03035	03028	03020	03018	03010	03017	03025	03033	
Tav (min)	551.4	551.0	550.7	550.5	550.4	550.2	550.4	550.6	550.9	0.066
EA (%)	53.57	53.78	53.79	53.81	53.81	53.82	53.81	53.80	53.78	0.041
a=033      K=00021m3/mmin      fo = 0,00015 m3/m.min      Top = 868,52 min										
p1	0.464	0.487	0.503	0.498	0.513	0.432	0.582	0.591	0.585	CV (%)
p2	1.333	1.333	1.333	1.325	1.329	1.290	1.352	1.361	1.366	
A0 (m2)	00055	00053	00051	00050	00050	00049	00050	00051	00052	
r	0.635	0.633	0.631	0.630	0.629	0.628	0.629	0.631	0.632	
Tav (min)	49.87	49.02	48.48	47.94	47.80	47.22	47.73	48.25	48.85	1.663
EA (%)	54.44	54.49	54.53	54.56	54.57	54.60	54.57	54.54	54.50	0.091



Os resultados divergem do apresentado por BOOHER (1974), OLLITA (1987) e BERNARDO (1986) que indicam que a forma do sulco pode exercer uma influência considerável na eficiência da irrigação. A influência dos fatores  $\rho_1$  e  $\rho_2$  seria predominantemente na infiltração, já que sulcos com base mais larga como os trapezoidais teriam maior área de infiltração que sulcos com base estreita como os triangulares.

A fim de determinar qual dos coeficientes  $\rho_1$  ou  $\rho_2$  exerce uma maior influência para fins de dimensionamento, fizeram-se simulações para as nove formas do sulco propostas, mantendo primeiro constante  $\rho_2$  e depois  $\rho_1$ . Os resultados dessas representações estão nas TABELAS 5.19 e 5.20.

TABELA 5.19 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função do fator empírico ' $\rho_1$ ' e mantendo ' $\rho_2$ ' constante ( $\rho_2=1,352$ ).

L=200m      V = 13 m/min      Zn = 0,1 m      wf=1,5m      So=0,008m/m      Qsul=0,06m <sup>3</sup> /min										
n=0,04      a=053      K=00028m <sup>3</sup> /mmin      fo = 0,00022 m <sup>3</sup> /m.min      Top = 378,73 min										
$\rho_1$	0,464	0,487	0,503	0,498	0,513	0,432	0,582	0,591	0,585	CV(%)
A0 (m <sup>2</sup> )	00059	00057	00055	00056	00055	00062	00050	00049	00050	
r	0,307	0,306	0,305	0,305	0,304	0,309	0,301	0,301	0,301	
Tav (min)	552,3	551,8	551,5	551,6	551,4	553,1	550,4	550,3	550,4	0,174
EA (%)	53,70	53,73	53,75	53,74	53,76	53,66	53,81	53,82	53,81	0,100
5.2.3. VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE CARTAS										
a=033      K=00021m <sup>3</sup> /mmin      fo=0,00015 m <sup>3</sup> /m.min      Top = 868,52 min										
$\rho_1$	0,464	0,487	0,503	0,498	0,513	0,432	0,582	0,591	0,585	CV(%)
A0 (m <sup>2</sup> )	00059	00057	00055	00056	00055	00062	00050	00049	00050	
r	0,639	0,637	0,636	0,636	0,635	0,642	0,629	0,629	0,629	
Tav (min)	51,66	50,77	50,19	50,37	49,84	53,03	47,73	47,49	47,65	3,853
EA (%)	54,34	54,39	54,42	54,41	54,44	54,26	54,57	54,58	54,58	0,210

TABELA 5.20 Variação do tempo de avanço e eficiência de aplicação em função do fator empírico 'p2' e mantendo 'p1' constante (p1=0,582).

L = 200 m    V = 13 m/min    Zn = 0,1 m    wf = 1,5 m    So = 0,008m/m    Qsul=0,06 m <sup>3</sup> /min										
n=0,04    a=0,53    k=00028m <sup>3</sup> /min    fo = 0,00022 m <sup>3</sup> /m.min    Top = 378,73 min										
p2	1.333	1.325	1.329	1.290	1.352	1.361	1.366	MEDIA	DESV	CV(%)
A0 (m <sup>2</sup> )	00046	00045	00045	00039	00050	00051	00052			
r	0.299	0.298	0.299	0.294	0.301	0.302	0.303			
Tav (min)	549.8	549.5	549.6	548.7	550.4	550.7	550.9	549.9	0.770	0.140
EA (%)	53.85	53.86	53.86	53.91	53.81	53.79	53.78	53.84	0.046	0.085
a=0,33    K=00021 m/min    fo=000015 m <sup>3</sup> /m.min    Top = 868,52 min										
p2	1.333	1.325	1.329	1.290	1.352	1.361	1.366	MEDIA	DESV	CV(%)
Ao (m <sup>2</sup> )	00046	00045	00045	00039	00050	00051	00052			
r	0.625	0.623	0.624	0.614	0.629	0.631	0.632			
Tav (min)	46.16	45.51	45.83	42.84	47.73	48.50	48.94	46.50	2.098	4.580
EA (%)	54.66	54.70	54.68	54.86	54.57	54.52	54.50	54.64	0.124	0.227

Os resultados indicam que praticamente nenhum dos dois coeficientes exerce grande influência na performance do sistema, não sendo a hidráulica da irrigação por sulcos muito sensível à variação desses fatores.

### 5.2.3. VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE GARTON

Os resultados obtidos no dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos com redução da vazão ("cut back"), aplicando a metodologia proposta por GARTON (1966), variando comprimento, lâmina e parâmetros de infiltração (TABELA 5.21), indicam que em solos arenosos, devido a maior capacidade de infiltração, a vazão para a fase de avanço (Qav) calculada pode ser superior a Qmax, como é o exemplo da família de infiltração 1,5.



TABELA 5.21 Efeito do tipo de solo e comprimento na performance do sistema com redução da vazão para o método de GARTON.

L = 200m      p1 = 0,57      So = 0,008m/m      Zn 0,1 m      n = 0,04 p2 = 1,367 wf = 1,5 m    V = 13 m/min							
FAMÍLIA	Vazão(m <sup>3</sup> /min)			tempo (min)			
	Qav	Qred	Qmax	Tav	Top	Tco	Ea (%)
1,5	0.13947	0.06160	0.1	177.43	177.43	354.86	84.00
1,0	0.09198	0.04664	0.1	266.05	266.05	532.10	81.34
0,8	0.07017	0.03828	0.1	346.33	346.33	692.66	79.87
0,5	0.05189	0.03740	0.1	465.93	465.93	931.86	72.12
0,4	0.03126	0.02156	0.1	764.02	764.02	1528.04	74.33
0,25	0.01896	0.01496	0.1	1250.10	1250.10	2500.20	70.75
0,15	0.01141	0.01012	0.1	2066.63	2066.63	4133.26	67.44
0,10	0.00807	0.00770	0.1	2913.69	2913.69	5827.38	65.29
0,05	0.004640	0.00484	0.1	5068.92	5068.92	10137.8	62.46
2,0 se L=100m	0.09303	0.03729	0.1	132.78	132.78	265.56	86.78
1,0 se L=100m	0.04571	0.02333	0.1	266.05	266.05	532.10	81.67
2,0 se L=50m	0.04634	0.01865	0.1	266.05	266.05	532.10	86.92
1,0 se L=50m	0.02280	0.01166	0.1	266.05	266.05	532.10	81.82
2,0 se L=300m	0.28572	0.11187	0.1	266.05	266.05	532.10	85.24
0,4 se L=100m	0.01558	0.01078	0.1	764.02	764.02	1528.03	74.49
0,25 se L=100m	0.00946	0.00748	0.1	1250.11	1250.11	2500.22	70.85
0,4 se L=50m	0.00777	0.00539	0.1	764.02	764.02	1528.03	74.57

Em sulcos construídos em solos argilosos, observou-se em alguns casos que a vazão reduzida (Qred) difere muito pouco da vazão de avanço (Qav), não valendo a pena, para estas condições, fazer-se redução da vazão. Isto acontece neste tipo de solo, quando a lâmina a ser aplicada assume valores elevados, incrementando os tempos de oportunidade e avanço, o que implica utilizar uma baixa vazão para a fase de avanço, tal como se observa para o caso da família 0,15.



TABELA 5.22 Efeito do comprimento do tubo e lâmina de

Notou-se também que em determinados casos, o método proposto por GARTON (1966) não fornece resultados satisfatórios, como pode-se observar na segunda parte da TABELA 5.22, onde a vazão de avanço é menor que a vazão reduzida, o que é ilógico. Isto aconteceu por serem os parâmetros de infiltração "a" e "k" utilizados, típicos de solos argilosos, muito embora o parâmetro "fo" seja mais característico de solos franco-siltosos.

Comparando-se os valores dos parâmetros de qualidade obtidos pela razão de um quarto (método de CRIDDLE) com os valores obtidos empregando-se o método de GARTON, apresentado na TABELA 5.23, verifica-se que em alguns casos a primeira metodologia gera valores superiores de eficiência de aplicação, porém, existe o risco de  $Q_{av}$  ser maior que  $Q_{max}$ . Nos outros casos, obteve-se uma eficiência de aplicação maior que 100%, significando que a eficiência de armazenamento é menor que 100% e o sistema não está bem projetado para suprir a lâmina líquida.

L (m)	Za (m)	$Q_{Garton}$	$Q_{Criddle}$	$T_{av}$	$T_{max}$
200	0.02	0.010220	0.018400	75.89	75.89
100	0.05	0.020440	0.024200	153.68	153.68
300	0.05	0.010220	0.024200	153.68	153.68
ser: a=0.331      k= 0.0021 m3/m.min      fo=0.001137m/min					
100	0.10	0.014268	0.018500	868.51	868.51
100	0.10	0.028536	0.037000	868.51	868.51
250	0.10	0.035673	0.046250	868.51	868.51
250	0.10	0.042783	0.057812	868.51	868.51
250	0.10	0.049893	0.071750	868.51	868.51
200	0.08	0.028730	0.037000	473.47	473.47
200	0.08	0.029009	0.037000	473.62	473.62
200	0.07	0.039380	0.046250	294.68	294.68
200	0.05	0.030620	0.037000	398.41	398.41
200	0.03	0.038660	0.046250	218.93	218.93
200	0.05	0.015241	0.018500	398.41	398.41
300	0.05	0.018156	0.018500	398.41	398.41

TABELA 5.22 Efeito do comprimento do sulco e lâmina de água na vazão e tempo de avanço sob condições de redução da vazão.

wf=1,5m V=13m/min p1=0,57 p2=1,367 So=0,008 m/m n=0,04					
QMAX=0,1039m <sup>3</sup> /min a=0,534 k=0,0028 fo=0,00022m <sup>3</sup> /mmin					
L (m)	Zn (m)	Qav (m <sup>3</sup> /min)	Qred(m <sup>3</sup> /min)	Tav(min)	Top(min)
100	0.10	0.032128	0.024200	378.73	378.73
200	0.10	0.064470	0.048400	378.73	378.73
250	0.10	0.080743	0.060500	378.73	378.73
300	0.10	0.097085	0.072600	378.73	378.73
350	0.10	0.113490	0.084700	378.73	378.73
200	0.09	0.066318	0.048400	331.4	331.4
200	0.08	0.068590	0.048400	285.04	285.04
200	0.07	0.071469	0.048400	239.81	239.81
200	0.05	0.080610	0.048000	153.68	153.68
200	0.03	0.102920	0.048400	75.99	75.99
100	0.05	0.039620	0.024200	153.68	153.68
300	0.05	0.123014	0.072600	153.68	153.68
se: a=0,331 K = 0,0021 m <sup>3</sup> /m.min fo=0,00015m <sup>3</sup> /mmin					
L (m)	Zn (m)	QSul(m <sup>3</sup> /min)	Qred(m <sup>3</sup> /min)	Tav(min)	Top(min)
100	0.10	0.014269	0.016500	868.51	868.51
200	0.10	0.028511	0.033000	868.51	868.51
250	0.10	0.035634	0.041250	868.51	868.51
300	0.10	0.042763	0.049500	868.51	868.51
350	0.10	0.049893	0.057750	868.51	868.51
200	0.09	0.028730	0.033000	773.47	773.47
200	0.08	0.029009	0.033000	678.82	678.82
200	0.07	0.029380	0.033000	584.66	584.66
200	0.05	0.030620	0.033000	398.41	398.41
200	0.03	0.033860	0.033000	216.93	216.93
100	0.05	0.015241	0.016500	398.41	398.41
300	0.05	0.046156	0.049500	398.41	398.41



TABELA 5.23 Efeito do tipo de solo, na performance do sistema com redução da vazão para o método de GARTON (G) e o método do CRIDDLE (1/4).

L = 200m      So = 0,008 m/m      Zn = 0,1 m      n = 0,04						
p1 = 0,57      P2 = 1,367						
wf = 1,5 m      V = 13 m/min						
	vazão (m <sup>3</sup> /min)			tempo (min)		
Flia	Qav	Qred	Qmax	Tav	Top	Ea (%)
2,0 (G)	0.18809	0.07460	0.1039	132.78	132.78	86.00
(1/4)	0.30500	0.15250	0.1039	33.00	132.78	98.96
1,5 (G)	0.13947	0.06160	0.1039	177.43	177.43	84.00
*(1/4)	0.22200	0.11100	0.1039	44.20	177.43	100.00
0,5 (G)	0.04022	0.02156	0.1039	596.66	596.66	76.23
*(1/4)	0.06350	0.03175	0.1039	149.43	596.66	100.00
0,4 (G)	0.03126	0.02156	0.1039	764.02	764.02	74.33
*(1/4)	0.04930	0.02465	0.1039	191.13	764.02	100.00
0,15(G)	0.01141	0.010120	0.1039	2066.63	2066.63	67.44
*(1/4)	0.01750	0.00875	0.1039	516.07	2066.63	100.00

\*/ Sistemas com valores obtidos de Ea maiores a 100%.

O método de CRIDDLE (1/4) um quarto, geralmente produz vazões de armazenamento baixas reduzindo a lâmina infiltrada. Isto é mais notório em solos argilosos, e foi constatado por BENAMI e OFEN (1993), os quais afirmam que a infiltração aumenta segundo a vazão. Assim na aplicação desta metodologia deverá ter-se o cuidado de obter-se uma vazão inferior a Qmax e fazer-se a eficiência de armazenamento igual a 100%. BENAMI e OFEN (1993), sugerem que para atingir tal condição, a vazão deve ser reduzida de 1/3 a 1/2 da vazão inicial e por tentativas deve-se obter a maior eficiência. Vale ressaltar que a operação de sistemas com tais características requer muita mão de obra ou um nível elevado de automação.



### 5.3. COMPARAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS COM O SIDIS COM OUTROS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SULCOS CONVENCIONAIS

Os resultados obtidos com o SIDIS em relação ao máximo comprimento do sulco foram comparados com os dados propostos por BOOHER (1974) e com os recomendados pelo U.S. Soil Conservation Service.

Na TABELA 5.24 estão expostos os resultados dos comprimentos máximos para três tipos de solos segundo as três metodologias. Estes foram obtidos com base na textura do solo, vazão máxima não erosiva, lâmina e declividade.

TABELA 5.24 Comprimento máximo recomendável do sulco obtido através de três métodos.

Valor do parâmetro			Comprimento máximo do sulco (m)		
Qs(m <sup>3</sup> /m)	So(m/m)	Zn(mm)	BOOHER (1974)	SCS U.S.	SIDIS
textura grossa					
0,075	0,005	50	120	105	108
0,075	0,005	100	250	145	147
0,075	0,005	150	300	180	185
0,037	0,010	100	220	100	100
textura média					
0,075	0,005	100	370	245	310
0,075	0,005	150	470	300	350
0,037	0,010	100	300	165	166
textura fina					
0,075	0,005	150	500	380	900
0,037	0,010	150	400	260	470
0,150	0,002	150	470	535	1200

Pode-se observar que para solos de textura grossa os comprimentos recomendados pelo método do SCS-USDA são semelhantes aos obtidos com o SIDIS, porém diferem da recomendação de BOOHER (1974), chegando a existir diferenças de até 120%.

Para o caso de solos de textura média encontraram-se situações em que o SIDIS e o SCS-USDA produziram resultados aproximados, porém observou-se que com a diminuição da declividade as diferenças entre os resultados foram mais pronunciadas. Na comparação com os resultados de BOOHER (1974) verificaram-se grandes diferenças em relação ao SIDIS.

Nos solos de textura fina os comprimentos sugeridos pelo SCS-USDA foram totalmente diferentes dos encontrados com o SIDIS, existindo uma subestimação por parte do método do SCS-USDA. Contrariando a tendência anterior, os resultados obtidos por BOOHER (1974) se aproximaram mais dos obtidos pelo SIDIS.

A variabilidade entre os dados alcançados pelos três métodos deveu-se à metodologia empregada para representar o fluxo de água nos sulcos, pois, como se verificou anteriormente, os dados obtidos por BOOHER (1974), apresentaram maiores diferenças em relação ao SIDIS, sendo que ele empregou relações empíricas. Os dados alcançados pelo SCS-USDA, empregando o método semi-racional se assemelharam mais aos obtidos pelo SIDIS, principalmente no que se refere a solos de textura grossa.

Conclui-se que, devido à variabilidade espacial e temporal das propriedades físicas dos solos, as recomendações feitas por SCS-USDA e BOOHER (1974) principalmente em relação ao comprimento máximo do sulco, devem ser tomadas com cautela e como uma primeira aproximação.

mostraram que a maioria dos casos, a eficiência do método. Porém, em algumas situações não se verificou o sucesso deste método, existindo casos onde a metodologia proposta por SCS-USDA (1966) é inaplicável.



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme os resultados alcançados no presente trabalho pode-se apresentar as seguintes conclusões:

1- A utilização do programa de computador SIDIS para a solução da equação do balanço de volume facilita sobremaneira o dimensionamento da irrigação por sulcos, devido à rapidez e precisão nos cálculos, sendo os resultados alcançados mediante as simulações similares aos obtidos por outros autores e aos observados no campo. As diferenças deveram-se principalmente à complexidade em representar a infiltração do solo em função do tempo e espaço, e pelo fato de que o modelo de balanço de volume faz algumas hipóteses como considerar que a área média da seção transversal ao fluxo permanece constante.

2- O coeficiente de rugosidade de Manning "n" exerce certa influência no desempenho do sistema, e o fato de considerá-lo constante ao longo das irrigações pode não representar a realidade.

3- Do ponto de vista do dimensionamento, pode-se assumir como constantes os parâmetros empíricos  $p_1$  e  $p_2$  que expressam a forma do sulco. Os resultados indicam que praticamente nenhum dos dois coeficientes exerce grande influência na performance do sistema, não sendo a hidráulica da irrigação por sulcos muito sensível à variação desses fatores.

4- Para o caso de sulcos com redução da vazão os resultados mostraram que na maioria dos casos houve ganho em eficiência. Porém, em algumas situações não se justifica o emprego deste método, existindo casos onde a metodologia proposta por GARTON (1966) é inaplicável.



6- O sistema com re-uso da água apresenta maiores índices de eficiência de aplicação, porém, para certas condições, como sulcos muito compridos ou solos de textura arenosa, a performance do sistema tende a reduzir.

7- As tabelas de dimensionamento existentes na literatura para a escolha do comprimento máximo, apresentam resultados diferentes dos obtidos pelo SIDIS, porém os dados resultantes da aplicação do método do SCS-USDA mostram uma certa semelhança com os dados obtidos pelo SIDIS, principalmente para solos de textura média e grossa.

Para contornar e solucionar alguns problemas encontrados são feitas a seguir algumas recomendações:

1- Criar um banco de dados referente principalmente aos parâmetros de infiltração, que representem os solos predominantes da região.

2- Comparar o presente "software" com outros programas de computador baseados em modelos mais complexos, considerando a variação dos parâmetros de infiltração, a área média da seção transversal do sulco e a rugosidade ao longo das irrigações.

3- Ampliar o alcance do "software" para outros sistemas de irrigação por superfície, incluindo rotinas de avaliação de sistemas utilizando o recurso de programação orientada a objetos.

BENAMI, A. and UFFIN, A. Irrigation Engineering: AGRIPRO, Israel, 1993, 257p.

BERNARDO, S. Manual de Irrigação, 4. ed., Vicosa-MG, UFV, 1988, Univ., 1986, 400 p.

BODLA, M. A., MONAGHE, E. H. e BARNER, T. H. A Knowledge-Based Expert System for Border Irrigation Management. In Computers in Agriculture, Proceedings of the 5th International Conference, American Society of Agricultural Engineers, 1994, Orlando, Florida, USA, 1994, p. 87-91, 133.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. V. Modelo Matemático para Simulação da Fase de Avanço na Irrigação por Sulcos. São Paulo, 1994. 135p. Tese (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- AGUIAR, R. R. Simulação e Análise da Irrigação por Sulcos Através do Modelo SRFER. Fortaleza, 1994. 131p. Dissertação (Mestrado - Universidade Federal do Ceará).
- ARRUDA, A. F. R. Elaboração do "Software" Sistema de Cálculo para Projetos de Irrigação (SCPI) no Dimensionamento de Sistemas de Irrigação por Pressão-Aspersão Convencional e Localizada. Fortaleza 1993. 393 p. Dissertação (Mestrado - Universidade Federal do Ceará).
- BAUTISTA , E. e WALLANDER, W. W. Hydrodynamic Furrow Irrigation Model whit Specified Space Steps. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 118, n.3,p. 450-465. 1992.
- BENAMI, A. and OFEN, A. Irrigation Engineering: AGRIPIRO, Israel, 1993. 257p.
- BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 4 ed. Viçosa-MG. UFV, Impr. Univ., 1986. 488 p.
- BODLA, M. A., FONATANE, D. G. e PODMORE, T. H. A Knowledge - Based Expert System for Border Irrigation Management. In: Computers in Agriculture. Proceedings of the 5th International Conference. American Society of Agricultural Engineers. 1994. Orlando, Florida, USA, 1994. p. 653-656. USA.



- BOOHER, L.J. Surface Irrigation. Roma, FAO Agricultural Development Paper nº 95, 1974. 160p.
- CUENCA, H. R. Irrigation System Design: an engineering approach. Prentice Hall, New Jersey. USA, 1989. 552p.
- CRIDDLE, W. D., DAVIS, S., PAIR, C. H., SCHOKLEY, D. G. Method for Evaluating Irrigation Systems. Agricultural Handbook n.82, USDA, Soil Conservation Service (SCS), 1956.
- EGERBERG, R. D. Adopting Object - Oriented Software Development Methods. In: Computers in Agriculture. Proceedings of the 5th International Conference. American Society of Agricultural Engineers. 1994. Orlando, Florida, USA, 1994. p. 815-819.
- ELDIN, A. A., AL-AMOUD, A. Micro - Computer Control of Automatic Scheduling Based on Soil Water. In: Computers in Agriculture. Proceedings of the 5th International Conference. American Society of Agricultural Engineers. Orlando, Florida, USA, 1994. p. 663-669.
- ELLIOT, R., WALKER, W. R. Field Evaluation of Furrow Infiltration and Advance Functions. Trans ASAE, 25(2), p.396-400. 1982.
- ELLIOTT, R., WALKER, W. R. e SKOGERBOE, G. V. Zero-Inertia Modeling of Furrow Irrigation Advance. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, 188 (IR3) 179-195 pp. 1982.
- FRIZZONE, J. A. Irrigação por Superfície. Serie didática no 005 ESALQ USP são paulo 1993. 183p.
- GARTON, J. E. Designing an Automatic Cut-back Furrow Irrigation System. Bull B-651, Oklahoma Agricultural Experiment Station. Oklahoma. State University, Still Water, Okla, 1966.



- GATES, T. K. e CLYMA, W. Designing Furrow Irrigation Systems for Improved Seasonal Performance. American Society of Agricultural Engineers 001 - 2351/ 84/2706 1817-1824 pp 1984. 109p.
- GUIMARAES, J. A. Manejo do Algodão Irrigado no Projeto Jaguaribe-Apodi, Utilizando um Modelo Computacional. Fortaleza, 1993. 182p. Dissertação (Mestrado - Universidade Federal do Ceará). Drainage in the 21st Century. ASCE, Lincoln, Nebraska, 1988.
- GOLDBERG, D. S. Techniques and Methods for Efficient Use of Water in Agriculture. In: Pressure Irrigation Principles and Practices. Mimeo. Departamnet of Irrigation, The Hebrew University of Jerusalem, Israel, 1974. 25p.
- HOLLY JR, F. M. e PARRISH III, J. B. Description and Evaluation of Program: CARIMA. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York,, v. 119, n. 4, p. 703-710. 1993.
- PASANOW, E. J. Turbo Pascal para Eletrônica Versão 6.01 tradução
- KATAPODES, N. D. e STRELKOFF, T. Hydrodynamics of Borders Irrigation - Complete Model. Journal Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York: 103 (IR3): 309-324. 1977. Sustainability Water Resources Utilization in Agriculture
- KHAMBATA, A.J. Software e Sistemas - Microprocessadores e Microcomputadoras. Vol2, Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1984.
- LEVIEN, L. A. e SOUZA, F. Algebraic Computation of Flow in Furrow Irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE New York, v.113, n.3, p. 367-377. 1987. ASI series, Flow (em publicação), 1985.
- MAIA, L. A. Desenvolvimento de um Software para Auxiliar no Dimensionamento e Manejo da Irrigação Localizada. São Paulo, 1994. 158p. Dissertação (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- MARR, J. C. Furrow Irrigation. University of California, Agricultural extension, Service Manual n. 37. 1967.

- MERKLEY, G.P. Users Manual for the Pascal Version of the USU Main System Hydraulic Model. Utah State University, Agricultural and Irrigation Engineering Department, Logan Utah, 1987. 109p.
- MERRIAM, J. L. Simple Furrow Advance Ratio Evaluation Technique For Upgrading Management. In Planning Now For Irrigation and Drainage in the 21st Century. ASCE, Lincoln, Nebraska, 1988. p.106-115.
- O'BRIEN, S. Turbo Pascal 6: Completo e total; trad. ARX Publicações Ltda. São Paulo: Makron, McGraw-hill, 1992. 716p.
- OLITTA, A. S. F. L. Os métodos de Irrigação. 1ª edição, 9a. reimpressão, Nobel, São Paulo, 1987. 267p.
- PASAHOW, E. J. Turbo Pascal para Eletrônica Versão 5.0; tradução dos Santos J. p. São paulo: McGraww-Hill, 1989. 252p.
- PEREIRA, L. S., GILLEY, J. E. e JENSEN, M. E. Research Agenda on Sustainability Water Resources Utilization in Agriculture. Departamento de Engenharia Rural Instituto Superior de Agronomia Lisboa 1994. 42p.
- PEREIRA, L. S. Surface Irrigation System. In L. s. Pereira, Ra, Feddes, Jr Gilley and Lesaffre (ids) Sustainability of Water Resources Utilization in Agriculture. NATO. ASI series, Kluwer (em publicação), 1995.
- REDDY, J. M. e CLYMA, W. Optimal Design Furrow-Irrigation System for Improvement Seasonal Performance. Trans.ASAE, 0001-2351/84/2706,p1817-1824. 1987.



- RODRIGUES, J. A. e SOUZA, F. Dimensionamento de Sistemas de Irrigação por Sulcos Abertos e em Declive para o Vale do Jaguaribe Aplicando o Método do SCS. Rev ciência Agronomica, Fortaleza 22(1/2), p.169-178 pp. 1991.
- ROGERS, D. C. e MERKLEY, G. P. Description and Evaluation of Program USM. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 119, n. 4, p. 693-702. 1993.
- SAKKAS, J. G. e STRELKOFF, T. Hydrodynamics of Surface Irrigation Advance Phase. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 100, n. 1, p.31-48. 1974.
- SCALOPPI, E. J. Projetos de Irrigação Superficial. Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Programa Nacional de Irrigação, Brasilia, Brasil T 9.1-t9.55, 1986.
- SCHMITZ, G. H. e SEUS, G. J. Mathematical Zero-Inertia Modeling of Surface Irrigation: Advance in Furrows. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ACE, New York, v.118, n.1. p.1-18. 1992.
- SCS-USDA. Furrow Irrigation. Chapter 5, Section 15. National Engineering Handbook, Unedited Draft, 1979, 110p.
- SKOGERBOE, G.V. A Global View of the Future Development of Irrigated Agricultural. In: Visions of the Future. Proceedings of the Third National Irrigation Symposium held in Conjunction with the 11th Annual International Irrigation Exposition. ASAE, Michigan USA 1990. p.187-192.
- SOUZA, F. Nonlinear Hydrodynamic Model of Furrow Irrigation. PHD Disertação. Davis, 1981. 172p. (PhD - University of California).



SOUZA, F. Modelos Matemáticos da Irrigação por Sulcos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasil. 19 (9): p.1135-1143. 1984.

*Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York.*

SOUZA, F. Manejo Computadorizado da Irrigação Utilizando o Programa "CROPWAT" da FAO. Estudo de Caso de Híbridos de Milho (Zea Mays L.) no Vale do Curu-Ceará. Rev Ciências Agrárias, Fortaleza, 22 (1/2): p.127-140. 1991.

*Irrigation Engineering. ASCE, New York, v. 117, n.6, p.1006-1013. 1993.*

SOUZA, F. Notas de Aula da Disciplina Irrigação Superficial Avançada. 1994. 50p.

*Two-Dimensional Analysis of Furrow Infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.*

STRELKOFF, T. e KATAPODES, N. D. Border Irrigation Hydraulics whit Zero-Inertia. Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE: 103 (IR3): 325-342. 1977.

*Irrigation - Theory and Practice. Prentice Hall, New Jersey, 1987. 388p.*

STRELKOFF, T. BRDRFLW: A Mathematical Model of Border Irrigation. Phoenix, Arizona: United States Department of agriculture, 1985. 100p.

*Systems. FAO, Rome, 1999. 137p.*

STRELKOFF, T. SRFR A Computer Program for Simulating Flow in Surface Irrigation (Furrows - Basins - Borders). Version 20. WCL. Report n. 17. Phoenix, Arizona: United States Department of agriculture, 1990. 69p.

*Israel, 1993. p.137-153.*

THOMAS, D. L. e McCLEADON. What is an Expert System?. In: Planning Now For Irrigation and Drainage in the 21 ST Century. Proceedings of a Conference Sponsored by the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers ASCE New York, 1988. p.528-535.

TURBAK, A. S. e MOREL-SEYTOUX, H.J. Analitical Solutions for Surface Irrigation. II: Variable Infiltration Rate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 114, n.1, p. 48-59. 1988.

- TURBAK, A. S. e MOREL-SEYTOUX, H.J. Analytical Solutions for Surface Irrigation. I: Constant Infiltration Rate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 114, n.1, p. 31-47. 1988.
- VALIANTZAS, J.D. Border Advance Using Improved Volume-Balance Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 119, n.6, p.1006-41013. 1993.
- VOGEL, T. e HOPMANS, J. W. Two-Dimensional Analysis of Furrow Infiltration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, v. 118, n.5, p.791-807. 1992.
- WALKER, W. R. e SKOGERBOE, G. V. Surface Irrigation - Theory and Practice. Prentice Hall. New Jersey, 1987. 386p.
- WALKER, W. R. Guidlines for Designing an Evaluating Surface Irrigation Systems. FAO. Roma, 1989. 137p.
- WALKER, W. R. Two Decades of Surface Irrigation Research: Four Significant Results and Their Practical Cosequences. In: 6Th International Conference on Irrigation Proceedings. Tel-Aviv, Israel may 3-4. Agritech 93 Israel, 1993. p.137-158.
- WEISKAMP, K. Turbo Pascal 6.0; trad. Pagani, A.L. Rio de Janeiro:LTC-Livros Técnicos e Científicos Ed., 1992. 364p.
- WITHERS, B. e VIPOND, S. Irrigation Design and Practice. BT Batsford Limited. 1974. 306p.

8. ANEXO

RESULTADOS OBTIDOS, ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES EMPREGANDO  
O PROGRAMA "SIDIS"



LA 1

OS 1

LMC 1

ACAP 1

ETC 1

LA 4

OS 2

LMC 2

ACAP 2

ETC 2

Des 2

2

1

RESULTADOS PARA SULCOS  
CONVENCIONAIS

LA AC

OT

Des 3

3

Des 3

4

TOT

3

3

ULACAO DA IRRIGACAO EMPREGANDO DADOS DE WALKER e SKOGERBOE (1987)

DOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 8m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING(n) 0,04  
 CLVIDADE(S<sub>o</sub>) 0,008m/m COMPRIMENTO(L) 200m LARGURA(W) 720m Z<sub>n</sub> = 0,10m  
 FACAMENTO(w<sub>f</sub>) 0,75m VELOCIDADE DA AGUA(V) 8m/min P1 = 0,57 P2 = 1,387  
 UETO: WALKRED1 Q<sub>max</sub>=0,017 m<sup>3</sup>/min

ELA A1 "LAYOUT" E RESULTADOS DA SIMULACAO DA IRRIGACAO

airas Irrigacoes a=0,357 k=0,0036m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000046m<sup>3</sup>/m.min

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
2	480	0,0125	0	0,0017	0,4028	1415,5	785,1	2200,55	54,53
1	960	0,0063	0	0,0010	0,5000	0,0	785,1	-	-

acoes Subsequentes a=0,317 k=0,00393m<sup>3</sup>/m.min fo=0,00035m<sup>3</sup>/m.min

2	480	0,0125	0	0,0017	0,5118	676,1	1127,4	1803,54	66,54
1	960	0,00625	0	0,001	0,2261	0,0	1127,4	-	-

ELA A2 "LAYOUT" FINAL EM BASE A MAIOR PERFORMANCE DA SIMULACAO

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
-----	---------------	-------------------------------	-----------	---------------------------	---	--------------	--------------	---------------	-----------

airas Irrigacoes

2	480	0,0125	0	0,0017	0,4827	1415,46	785,09	2200,55	54,53
---	-----	--------	---	--------	--------	---------	--------	---------	-------

acoes Subsequentes

2	480	0,0125	0	0,0017	0,5118	676,1	1127,44	1803,54	66,54
---	-----	--------	---	--------	--------	-------	---------	---------	-------

AO TOT(m<sup>3</sup>/min) TEMPO DE IRRIG/LOT(min) TEMPO DE IRRIG TOT(DIAS)

IRRIG	IRRIG SUBS	1as IRRIG	IR	1as IRRIG	IRRIG SUBSEQ
6	6	220,55	1803,54	3,06	2,5

SIMULACAO DA IRRIGACAO EMPREGANDO DADOS DE WALKER e SKOGERBOE (1987).

DADOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 2,4m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING(n) 0,04

ECLIVIDADE(S<sub>0</sub>) 0,008m/m COMPRIMENTO(L) 200m LARGURA(W) 720m Z<sub>n</sub> = 0,10m

ESPACAMENTO(wf) 0,75m VELOCIDADE DA AGUA(V) 8m/min P1 = 0,57 P2 = 1,387

OBJETO: WALKTAIL Q<sub>max</sub> = 0,017 m<sup>3</sup>/min

TABELA A3 "LAYOUT" E RESULTADOS DA SIMULACAO DA IRRIGACAO

Primeiras Irrigacoes a=0,357 k=0,0036m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000046m<sup>3</sup>/m.min

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
6	160	0,0150	0	0,0019	0,4587	778,9	785,09	1563,94	63,94
5	192	0,0125	0	0,0017	0,4028	1415,5	785,09	2200,55	54,53
4	240	0,0100	0	0,0014	0,3060	4312,7	785,09	5097,76	29,42
3	320	0,0075	0	0,0012	0,2407	0,0	785,09	-	-
2	480	0,0050	0	0,0009	0,5000	0,0	785,09	-	-
1	960	0,0025	0	0,0005	0,5000	0,0	785,09	-	-

Irrigacoes Subsequentes a=0,317 k=0,00383m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000035m<sup>3</sup>/m.min

6	160	0,0150	0	0,0019	0,5523	447,4	1127,44	1574,82	63,50
5	192	0,0125	0	0,0017	0,5118	676,1	1127,44	1803,54	66,54
4	240	0,0100	0	0,0014	0,4486	1253,3	1127,44	2380,72	63,01
3	320	0,0075	0	0,0012	0,3239	4466,4	1127,44	5593,83	35,75
2	480	0,0050	0	0,0009	0,5000	0,0	1127,44	-	-
1	960	0,0025	0	0,0005	0,5000	0,0	1127,44	-	-

TABELA A4 "LAYOUT" FINAL EM BASE A MAIOR PERFORMANCE

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
-----	---------------	-------------------------------	-----------	---------------------------	---	--------------	--------------	---------------	-----------

Primeiras irrigacoes

6	160	0,0150	0	0,0019	0,4587	778,85	785,09	1563,94	63,94
---	-----	--------	---	--------	--------	--------	--------	---------	-------

Irrigacoes subsequentes

5	192	0,0125	0	0,0017	0,5118	676,1	1127,44	1803,54	66,54
---	-----	--------	---	--------	--------	-------	---------	---------	-------

VAZAO TOT(m<sup>3</sup>/min) TEMPO DE IRRIG/LOT(min) TEMPO DE IRRIG TOT(DIAS)

IRRIG	IRRIG SUBS	1as IRRIG	IR	1as IRRIG	IRRIG
2,4	2,4	1563,95	1803,54	6,52	6,26



PLANEJAMENTO DA IRRIGACAO EMPREGANDO DADOS DE WALKER (1989).

DADOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 1,8m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING(n) 0,04

VELOCIDADE(So) 0,001m/m COMPRIMENTO(L) 200m LARGURA(W) 100m Zn = 0,080m

ACABAMENTO(wf) 0,5m VELOCIDADE DA AGUA(V) 13m/min P1 = 0,57 P2 = 1,367

METODO: FAOWALK Qmax=1,7677 m<sup>3</sup>/min

PLANO A5 "LAYOUT" E RESULTADOS DA SIMULACAO DA IRRIGACAO.

Curvas Irrigacoes a=0,383 k=0,00346m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000057m<sup>3</sup>/m.min

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
100	2	0,9000	0	0,0830	0,9601	15,94	214,48	230,42	3,86
66	3	0,6000	2	0,0617	0,9446	18,63	214,48	233,11	5,72
50	4	0,4500	0	0,0500	0,9303	21,04	214,48	235,52	7,55
40	5	0,3600	0	0,0425	0,9170	23,32	214,48	237,8	9,34
33	6	0,3000	2	0,0372	0,9044	25,54	214,48	240,02	11,11
28	7	0,2571	4	0,0332	0,8924	27,72	214,48	242,2	12,95
25	8	0,2250	0	0,0301	0,8811	29,89	214,48	244,37	14,55
22	9	0,2000	2	0,0276	0,8702	32,07	214,48	246,55	16,22
20	10	0,1800	0	0,0258	0,8598	34,28	214,48	248,76	17,87
18	11	0,1636	2	0,0238	0,8498	36,51	214,48	250,99	19,48
16	12	0,1500	8	0,0224	0,8402	38,78	214,48	253,26	21,06
15	13	0,1385	5	0,0211	0,8309	41,09	214,48	255,57	22,61
14	14	0,1286	4	0,0200	0,8220	43,44	214,48	257,92	24,12
13	15	0,1200	5	0,0190	0,8133	45,85	214,48	260,33	25,61
12	16	0,1125	8	0,0181	0,8049	48,32	214,48	262,8	27,06
11	18	0,1000	2	0,0166	0,7890	53,42	214,48	267,9	29,86
10	20	0,0900	0	0,0154	0,7740	58,79	214,48	273,27	32,53
9	22	0,0818	2	0,0144	0,7598	64,43	214,48	278,91	35,06
8	25	0,0720	0	0,0131	0,7398	73,47	214,48	287,95	38,59
7	28	0,0643	4	0,0120	0,7213	83,25	214,48	297,73	41,79
6	33	0,0546	2	0,0107	0,6931	101,37	214,48	315,85	46,43
5	40	0,0450	0	0,0093	0,6579	131,14	214,48	345,62	51,44
4	50	0,0360	0	0,0079	0,6142	184,46	214,48	398,94	55,70
3	66	0,0273	2	0,0064	0,5543	305,56	214,48	520,04	56,41
2	100	0,0180	0	0,0047	0,4445	847,85	214,48	1062,33	41,84
1	200	0,0090	0	0,0029	0,2160	0	214,48	-	-

ABELA A5 CONTINUACAO...

irrigacoes Subsequentes  $a = 0,327$   $k = 0,0038$  m<sup>3</sup>/m.min  $t_0 = 0,000037$  m<sup>3</sup>/m.min

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
100	2	0,9000	0	0,0630	0,9676	15,65	370,54	366,39	2,30
66	3	0,6000	2	0,0617	0,9554	18,44	370,54	366,96	3,43
50	4	0,4500	0	0,0500	0,9444	20,74	370,54	391,28	4,54
40	5	0,3600	0	0,0425	0,9341	22,88	370,54	393,42	5,65
33	6	0,3000	2	0,0372	0,9245	24,92	370,54	395,46	6,74
28	7	0,2571	4	0,0332	0,9154	26,91	370,54	397,45	7,83
25	8	0,2250	0	0,0301	0,9069	28,87	370,54	399,41	8,90
22	9	0,2000	2	0,0276	0,8987	30,8	370,54	401,34	9,97
20	10	0,1800	0	0,0256	0,8909	32,73	370,54	403,27	11,02
18	11	0,1636	2	0,0238	0,8835	34,66	370,54	405,2	12,07
18	12	0,1500	8	0,0224	0,8783	36,59	370,54	407,13	13,10
15	13	0,1385	5	0,0211	0,8694	38,54	370,54	409,08	14,12
14	14	0,1288	4	0,0200	0,8628	40,5	370,54	411,04	15,14
13	15	0,1200	5	0,0190	0,8564	42,47	370,54	413,01	16,14
12	16	0,1125	8	0,0181	0,8502	44,47	370,54	415,01	17,13
11	18	0,1000	2	0,0166	0,8385	48,54	370,54	419,08	19,09
10	20	0,0900	0	0,0154	0,8275	52,71	370,54	423,25	21,00
9	22	0,0818	2	0,0144	0,8171	56,99	370,54	427,53	22,87
8	25	0,0720	0	0,0131	0,8025	63,65	370,54	434,19	25,59
7	28	0,0643	4	0,0120	0,7859	70,61	370,54	441,15	28,21
6	33	0,0548	2	0,0107	0,7683	82,94	370,54	453,48	32,34
5	40	0,0450	0	0,0093	0,7427	101,88	370,54	472,4	37,83
4	50	0,0360	0	0,0079	0,7108	132,64	370,54	503,16	44,16
3	66	0,0273	2	0,0064	0,6676	182,58	370,54	563,12	52,10
2	100	0,0180	0	0,0047	0,5917	378,7	370,54	749,24	59,32
1	200	0,0090	0	0,0029	0,3888	2391,18	370,54	2781,72	32,19

ABELA A6 "LAYOUT" FINAL EM BASE A MAIOR PERFORMANCE DA SIMULACAO.

LOT	SULC POR LOTE	(Qs) (m <sup>3</sup> /min)	SUL RESID	AREA (m <sup>2</sup> )	r	TAV (min)	TOP (min)	TCOR (min)	Ea (%)
irrigacoes									
3	66	0,0273	2	0,0064	0,5543	305,58	214,48	520,03	58,41
irrigacoes subsequentes									
2	100	0,0180	0	0,0047	0,5917	378,7	370,54	749,24	59,32

Q TOT(m<sup>3</sup>/min)      TEMPO DE IRRIG/LOT(min)      TEMPO DE IRRIG TOT(DIAS)

IRRIG SUBSE	1a5 IRRIG	IRRIG	1a5 IRRIG	IRRIG SU
3      1,8	520,03	749,24	1,06	1,04









RESULTADOS PARA SULCOS  
COM REDUÇÃO DA VAZÃO

Dimensionamento do sistema com reducao da vazao

apregando dados de Walker e Skogerboe (1987).

Dados de entrada: vazao total (QT) 2,4m<sup>3</sup>/min, coef rug de Manning (n) 0,04

Declividade (So) 0,008m/m Comprimento (L) 200m largura (W) 720m Zn = 0,10m

Pacamento (wf) 0,75m Velocidade da agua (V) 8m/min P1 = 0,57 P2 = 1,367

Primeiras irrigacoes a=0,357 k=0,0036m<sup>3</sup>/min fo=0,000046m<sup>3</sup>/m.min

Irrigacoes subsequentes a=0,317 k=0,00383m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000035m<sup>3</sup>/m.min

Projeto: WALKTAIL

Calculo do tempo de avanço e vazao para as primeiras irrigacoes

vazao por sulco	0,01496 m <sup>3</sup> /min
vazao reduzido	0,01012 m <sup>3</sup> /min
vazao max nao erosivel	0,01705 m <sup>3</sup> /min
tempo de avanço	784,94 min
tempo oportunidade	785,09 min

Calculo do tempo de avanço e vazao para as irrigacoes subseq

vazao por sulco	0,010347 m <sup>3</sup> /min
vazao reduzido	0,0077 m <sup>3</sup> /min
vazao max nao erosivel	0,01705 m <sup>3</sup> /min
tempo de avanço	1127,41 min
tempo oportunidade	1127,44 min

LA A9 CONFIGURACAO DO SISTEMA DE IRRIGACAO POR SULCOS

COM REDUACAO DA VAZAO PROJETO: WALKTAIL

NUMERO DE SULCOS POR LOTE PARA														VAZAO (m <sup>3</sup> /min)	
O LOTE NUMERO:														PARA	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1as irng	irr sub
764	196													11,43	7,91
465	119	376												6,96	4,81
390	100	316	155											5,83	4,04
303	78	245	120	213										4,53	3,14
264	67	213	105	186	125									3,95	2,73
224	57	181	89	158	107	145								3,35	2,32
200	51	162	79	141	95	129	104							2,99	2,07
177	45	143	70	125	84	114	92	109						2,65	1,83
161	41	130	64	113	77	104	84	99	87					2,41	1,67
146	37	118	58	103	70	94	76	90	80	87				2,18	1,51
135	35	109	54	95	64	87	70	83	73	80	75			2,02	1,40
125	32	101	50	88	59	80	65	76	68	74	69	73		1,87	1,29
116	30	94	46	82	55	75	60	71	63	69	65	68	66	1,74	1,20



TABELA A10 DURACAO DA IRRIGACAO E EFICIENCIA DE APLICACAO

PROJETO: WALKTAIL

No LOT CAMPO	TEMPO DE IRRIG (dias)			EFICIENCIA DE APLICACAO (%)			
	1as irrig	irr subseq		1as irrigacoes		Irrig subsequentes	
				LOTES	Ult lote	LOTES	Ult lote
2	1,64	2,35		76,2	63,87	73,72	64,29
3	2,18	3,13		76,2	63,87	73,72	64,29
4	2,73	3,91		76,2	63,87	73,72	64,29
5	3,27	4,70		76,2	63,87	73,72	64,29
6	3,82	5,48		76,2	63,87	73,72	64,29
7	4,36	6,26		76,2	63,87	73,72	64,29
8	4,91	7,05		76,2	63,87	73,72	64,29
9	5,45	7,83		76,2	63,87	73,72	64,29
10	6,00	8,61		76,2	63,87	73,72	64,29
11	6,54	9,40		76,2	63,87	73,72	64,29
12	7,09	10,18		76,2	63,87	73,72	64,29
13	7,63	10,96		76,2	63,87	73,72	64,29
14	8,18	11,74		76,2	63,87	73,72	64,29

TABELA A11 CONFIGURACAO FINAL DO SISTEMA DE ACORDO COM A MELHOR PERFORMANCE

PROJETO: WALKTAIL

Lot No	NUMERO DE SULCOS POR LOTE PARA											VAZAO (m3/min)	
	O LOTE NUMERO:											PARA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1as irrig	irr sub
1	146	37	118	58	103	70	94	76	90	80	97	2,18	1,51

TABELA A12 VAZAO POR SULCO (m3/min) E TEMPO DE IRRIGACAO DO CAMPO (min)

PROJETO: WALKTAIL

Tempo de irrig campo todo (s)	Tempo de irrig e vazao por sulco-lote						Ea (%)
	fase avanco		fase umedecimento				
	TAV	Vazao	TOP	Vazao-red	Tempo Tot		
1as irrigacoes	6,54	784,94	0,01496	785,09	0,01012	1570,03	76,2
irrigacoes subsequentes	9,4	1127,41	0,01034	1127,44	0,0077	2254,85	73,72

Dimensionamento do sistema com reducao da vazao

apregando dados de Walker (1989).

Dados de entrada: vazao total (QT) 1,8m<sup>3</sup>/min, coef rug de Manning(n) 0,04

Declividade(So) 0,001m/m Comprimento(L) 200m largura(W) 100m Zn = 0,08m

Empacamento(wf) 0,50m Velocidade da agua(V) 13m/min P1 = 0,57 P2 = 1,367

Primeiras irrigacoes a=0,388 k=0,00346m/min fo=0,000057m<sup>3</sup>/m.min

Irrigacoes subsequentes a=0,327 k=0,0038m/min fo=0,000037m<sup>3</sup>/m.min

Projeto: FAOWALK

Calculo do tempo de avanco e vazao para as primeiras irrigacoes

vazao por sulco	0,032946 m <sup>3</sup> /min
vazao reduzido	0,012540 m <sup>3</sup> /min
vazao max nao erosivel	1,767650 m <sup>3</sup> /min
tempo de avanco	214,38 min
tempo oportunidade	214,48 min

Calculo do tempo de avanco e vazao para as irrigacoes subseq

vazao por sulco	0,018215 m <sup>3</sup> /min
vazao reduzido	0,008140 m <sup>3</sup> /min
vazao max nao erosivel	1,767650 m <sup>3</sup> /min
tempo de avanco	370,51 min
tempo oportunidade	370,54 min

A A13 CONFIGURACAO DO SISTEMA DE IRRIGACAO POR SULCOS  
COM REDUCAO DA VAZAO PROJETO: FAOWALK

NUMERO DE SULCOS POR LOTE PARA														VAZAO (m <sup>3</sup> /min)	
O LOTE NUMERO:														PARA	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1as irng	irr sub
129	71													4,25	2,35
87	48	65												2,97	1,58
67	37	51	45											2,21	1,22
54	30	41	36	38										1,78	0,98
46	25	35	30	32	31									1,52	0,84
40	22	30	26	28	27	27								1,32	0,73
35	19	26	23	25	24	24	24							1,15	0,64
31	17	23	21	22	21	22	21	21						1,02	0,56
28	16	21	19	20	19	19	19	19	19					0,92	0,51
26	14	19	17	18	18	18	18	18	18	18				0,86	0,47
24	13	18	16	17	16	16	16	16	16	16	16			0,79	0,44
22	12	16	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15		0,72	0,40
20	11	15	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0,66	0,36

BELA A14 DURACAO DA IRRIGACAO E EFICIENCIA DE APLICACAO

PROJETO: FAOWALK

LOT MPO	TEMPO DE IRRIG (dias)		EFICIENCIA DE APLICACAO (%)			
	1as irrig	irr subseq	1as irrigacoes		irrig subsequentes	
			LOTES	Ult lote	LOTES	Ult lote
2	0,45	0,77	82,04	56,63	81,93	59,27
3	0,60	1,03	82,04	56,63	81,93	59,27
4	0,74	1,29	82,04	56,63	81,93	59,27
5	0,89	1,54	82,04	56,63	81,93	59,27
6	1,04	1,80	82,04	56,63	81,93	59,27
7	1,19	2,06	82,04	56,63	81,93	59,27
8	1,34	2,32	82,04	56,63	81,93	59,27
9	1,49	2,57	82,04	56,63	81,93	59,27
10	1,64	2,83	82,04	56,63	81,93	59,27
11	1,79	3,09	82,04	56,63	81,93	59,27
12	1,94	3,35	82,04	56,63	81,93	59,27
13	2,09	3,60	82,04	56,63	81,93	59,27
14	2,23	3,86	82,04	56,63	81,93	59,27

A A15 CONFIGURACAO FINAL DO SISTEMA DE ACORDO COM A MELHOR PERFORMANCE

PROJETO: FAOWALK

NUMERO DE SULCOS POR LOTE PARA:					VAZAO (m3/min)	
O LOTE NUMERO:					PARA	
1	2	3	4	5	1as irrig	irr sub
54	30	41	36	38	1,78	0,98

BELA A16 VAZAO POR SULCO (m3/min) E TEMPO DE IRRIGACAO DO CAMPO (min)

PROJETO: FAOWALK

Tempo de irrig	Tempo de irrig e vazao por sulco-lote					
	tempo todo	fase avanco		fase umedecimento		Ea (%)
		TAV	Vazao	TOP	Vazao-red	
1as irrigacoes						
0,89	214,38	0,03294	214,48	0,01254	428,85	82,04
irrigacoes subsequentes						
1,54	370,51	0,01821	370,54	0,00814	741,05	81,93



PROJETO DE SISTEMA DE REGAÇÃO POR ASPIRADOR

PROJETO DE REGAÇÃO DE WALKER - SKOTCHDOPE (1977)

PROJETO WALKER

PROJETO DE ENTRADA: VAZÃO TOTAL (QT) em gpm, COEF. RUG. DE MANNING (M) 0,04

VELOCIDADE (Se) em m/min, COMPRIMENTO (L) 200m, LARGURA (M) 7,32m,  $Z_1 = 0,10m$

RECOMENDADO (M) 0,75m, VELOCIDADE DA ÁGUA (V) em m/min,  $P_1 = 0,57$ ,  $P_2 = 1,367$

Perda por fricção:  $k_f = 0,357$ ,  $k_v = 0,0000000000000000$ ,  $k_o = 0,0000000000000000$

Perda subsequentes:  $k_f = 0,357$ ,  $k_v = 0,0000000000000000$ ,  $k_o = 0,0000000000000000$

VAZÃO MÁX. NÃO EROSIVEL (Qmax) = 0,01705 m<sup>3</sup>/min

PRIMEIRAS FRIGACÕES

FRIGACÕES SUBSEQUENTES

Q (m <sup>3</sup> /min)	TOP (m)	TAV (m)	Q (m <sup>3</sup> /min)	TOP (m)	TAV (m)
0,01700	785,09	588,930	0,01700	1127,4	947,940
0,01500	785,09	736,970	0,01500	1127,4	947,940
0,01370	785,09	1011,120	0,01370	1127,4	947,940
0,012390	785,09	1482,360	0,012390	1127,4	947,940
0,011154	785,09	2295,600	0,011154	1127,4	947,940
0,010038	785,09	4198,960	0,010038	1127,4	1228,180

**RESULTADOS PARA SULCOS  
COM RE-USO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO**

EX. 17 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA COM RECIRCULAÇÃO DA ÁGUA DE ESCOAMENTO

PARA DIFERENTES VALORES DE VAZÃO POR SULCO: PROJETO WALKER

Q (m <sup>3</sup> /min)	Tensão de Vácuo (m)	Tensão Op. (m)	p	r	Perda por fricção (m)	Perda por escape (m)	Vel. escorv. (m/s)	Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /min)
Primeiras irrigações								
0,01700	588,930	785,09	9,019	0,480	19,26	14,20	1,20	99,30
0,01500	736,970	785,09	9,347	0,464	26,11	9,47	2,13	99,30
0,01370	1011,120	785,09	9,918	0,434	34,06	6,36	1,30	99,30
0,012390	1482,360	785,09	10,86	0,400	43,94	4,21	0,80	99,30
0,011154	2295,600	785,09	12,443	0,359	56,15	2,30	0,40	99,30
0,010038	4198,960	785,09	16,295	0,307	70,59	0,00	0,00	99,30
Irrigações subsequentes								
0,01700	947,940	1127,4	9,075	0,478	19,70	32,40	0,40	99,30
0,01500	1228,180	1127,4	9,385	0,456	26,52	26,52	0,30	99,30
0,01370	1628,420	1127,4	9,945	0,434	34,46	21,21	1,67	99,30
0,012390	2295,600	1127,4	10,86	0,400	43,94	15,70	1,54	99,30
0,011154	3295,800	1127,4	12,443	0,359	56,15	10,58	1,40	99,30
0,010038	4198,960	1127,4	16,295	0,307	70,59	6,04	1,40	99,30

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA COM REUSO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
EMPREGANDO DADOS DE WALKER e SKOGERBOE (1967).

PROJETO: WALKRED1

DADOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 8m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING(n) 0,04

DECLIVIDADE(S<sub>0</sub>) 0,008m/m COMPRIMENTO(L) 200m LARGURA(W) 720m Z<sub>n</sub> = 0,10m

ESPACAMENTO(w<sub>f</sub>) 0,75m VELOCIDADE DA AGUA(V) 8m/min P<sub>1</sub> = 0,57 P<sub>2</sub> = 1,367

Primeiras irrigacoes a=0,357 k=0,0036m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000046m<sup>3</sup>/m.min

Irrigacoes subsequentes a=0,317 k=0,00383m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000035m<sup>3</sup>/m.min

VAZAO MAX. NAO EROSIVEL (Q<sub>max</sub>) = 0,01705 m<sup>3</sup>/min

PRIMEIRAS IRRIGACOES			IRRIGACOES SUBSEQUENTES		
Vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	TOP (min)	TAV (min)	Vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	TOP (min)	TAV (min)
0,017000	785,09	555,020	0,017000	1127,4	347,110
0,015300	785,09	735,970	0,015300	1127,4	429,160
0,013770	785,09	1011,120	0,013770	1127,4	539,020
0,012393	785,09	1462,390	0,012393	1127,4	690,500
0,011154	785,09	2295,660	0,011154	1127,4	907,960
0,010038	785,09	4198,990	0,010038	1127,4	1238,160

TABELA A17 CONFIGURACAO DO SISTEMA COM REUTILIZACAO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
PARA DIFERENTES VALORES DE VAZAO POR SULCO PROJETO: WALKRED1

Vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	Tempo Av (min)	Tempo Op (min)	p	r	Perd por percol DPR(%)	Perd por escoam TWR(%)	Vol esc/sul (m <sup>3</sup> )	Ea (%)
Primeiras irrigacoes								
0,017000	555,020	785,09	9,019	0,490	19,96	14,20	3,23	60,04
0,015300	735,970	785,09	9,347	0,464	26,11	9,43	2,19	73,69
0,013770	1011,120	785,09	9,916	0,434	34,00	5,35	1,32	66,00
0,012393	1462,390	785,09	10,86	0,400	43,94	2,21	0,61	56,06
0,011154	2295,660	785,09	12,443	0,359	56,15	0,20	0,07	43,65
0,010038	4198,990	785,09	15,295	0,308	70,60	0,00	0,00	0,00
Irrigacoes subsequentes								
0,017000	347,110	1127,44	6,875	0,576	7,76	32,40	6,12	62,24
0,015300	429,160	1127,44	6,865	0,556	10,2	26,62	6,39	69,60
0,013770	539,020	1127,44	6,945	0,534	13,42	21,21	4,87	66,56
0,012393	690,500	1127,44	7,144	0,510	17,69	15,73	3,54	62,31
0,011154	907,960	1127,44	7,510	0,482	23,35	10,56	2,40	76,65
0,010038	1238,160	1127,44	8,122	0,450	30,60	6,04	1,43	69,20

TABELA A18 RELACAO ENTRE A VAZAO TOTAL E O NUMERO DE LOTES PROJETO: WALKRED1

PRIMEIRAS IRRIGACOES		IRRIG SUBSEQUENTES	
NUMERO	VAZAO TOT (m3/min)	NUMERO DE LOTES	VAZAO TOT (m3/min)
9	1,610	8	1,589
8	1,815	7	1,825
7	2,079	6	2,142
6	2,432	5	2,592
5	2,931	4	3,282
4	3,687	3	4,474
3	4,970	2	7,022
2	7,619	1	16,320
1	16,320		

TABELA A19 CONFIGURACAO FINAL DO SISTEMA SEGUNDO A MELHOR PERFORMANCE PROJETO: WALKRED1

	No SUL 1ro lote	No SUL Lot int	No SUL Ult lot	Q/SUL (m3/min)	QBOMB (m3/min)	Q Req (m3/min)	T CORTE (min)	Ea (%)
PRIMEIRAS IRRIGACOES								
3	292	334	334	0,017	0,706	4,97	1340,11	80,04
IRRIGACOES SUBSEQUENTES								
3	263	348	349	0,017	1,610	4,47	1474,54	92,24



DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA COM REUSO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
EMPREGANDO DADOS DE WALKER e SKOGERBOE (1967).

PROJETO: WALKTAIL

DADOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 2,4m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING (n) 0,04

DECLIVIDADE (So) 0,008m/m COMPRIMENTO (L) 200m LARGURA (W) 720m Zn = 0,10m

ESPACAMENTO (wf) 0,75m VELOCIDADE DA AGUA (V) 8m/min P1 = 0,57 P2 = 1,367

Primeiras irrigacoes a=0,357 k=0,0036m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000046m<sup>3</sup>/m.min

irrigacoes subsequentes a=0,317 k=0,00383m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000035m<sup>3</sup>/min.m

VAZAO MAX. NAO EROSIVEL (Qmax) = 0,01705 m<sup>3</sup>/min

PRIMEIRAS IRRIGACOES			IRRIGACOES SUBSEQUENTES		
Vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	TOP (min)	TAV (min)	Vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	TOP (min)	TAV (min)
0,017000	785,09	555,020	0,017000	1127,4	347,110
0,015300	785,09	735,970	0,015300	1127,4	429,180
0,013770	785,09	1011,120	0,013770	1127,4	539,020
0,012393	785,09	1462,390	0,012393	1127,4	690,500
0,011154	785,09	2295,660	0,011154	1127,4	907,960
0,010036	785,09	4198,990	0,010036	1127,4	1238,160

TABELA A20 CONFIGURACAO DO SISTEMA COM REUTILIZACAO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
PARA DIFERENTES VALORES DE VAZAO POR SULCO PROJETO: WALKTAIL

vazao/sul (m <sup>3</sup> /min)	Tempo Av (min)	Tempo Op (min)	p	r	Perd por percol DPR(%)	Perd por escoam TWR(%)	Vol esc/sul (m <sup>3</sup> )	Ea (%)
Primeiras irrigacoes								
0,017000	555,020	785,09	9,019	0,490	19,96	14,20	3,23	60,04
0,015300	735,970	785,09	9,347	0,464	26,11	9,43	2,19	73,69
0,013770	1011,120	785,09	9,918	0,434	34,00	5,35	1,32	66,00
0,012393	1462,390	785,09	10,66	0,400	43,94	2,21	0,61	56,06
0,011154	2295,660	785,09	12,443	0,359	56,15	0,20	0,07	43,65
0,010036	4198,990	785,09	15,295	0,308	70,60	0,00	0,00	0,00
Irrigacoes subsequentes								
0,017000	347,110	1127,44	6,875	0,576	7,76	32,40	8,12	92,24
0,015300	429,180	1127,44	6,665	0,556	10,20	26,62	6,39	89,60
0,013770	539,020	1127,44	6,945	0,534	13,42	21,21	4,67	86,58
0,012393	690,500	1127,44	7,144	0,510	17,69	15,73	3,54	82,31
0,011154	907,960	1127,44	7,510	0,482	23,35	10,56	2,40	76,65
0,010036	1238,160	1127,44	8,122	0,450	30,80	6,04	1,43	69,20

TABELA A21 RELACAO ENTRE A VAZAO TOTAL E O NUMERO DE LOTES PROJETO WALKTAIL

PRIMEIRAS IRRIGACOES		IRRIG SUBSEQUENTES	
NUMERO	VAZAO TOT (m3/min)	NUMERO DE LOTES	VAZAO TOT (m3/min)
12	1,203	11	1,146
11	1,314	10	1,264
10	1,447	9	1,408
9	1,610	8	1,589
8	1,815	7	1,825
7	2,079	6	2,142
6	2,432	5	2,592
5	2,931	4	3,282
4	3,687	3	4,474
3	4,970	2	7,022
2	7,619	1	16,320

TABELA A22 CONFIGURACAO FINAL DO SISTEMA SEGUNDO A MELHOR PERFORMANCE PROJETO: WALKTAIL

TE	No SUL 1ro lote	No SUL Lot int	No SUL Ult lot	Q/SUL (m3/min)	QBOMB (m3/min)	Q Req (m3/min)	T CORTE (min)	Ea (%)
PRIMEIRAS IRRIGACOES								
7	122	140	138	0,017	0,295	2,079	1340,11	80,04
IRRIGACOES SUBSEQUENTES								
7	107	142	143	0,017	0,673	1,825	1474,54	92,24

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA COM REUSO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
EMPREGANDO DADOS DE WALKER (1989).

PROJETO: FAOWALK

DADOS DE ENTRADA: VAZAO TOTAL (QT) 1,8m<sup>3</sup>/min, COEF RUG DE MANNING(n) 0,04

DECLIVIDADE(S<sub>0</sub>) 0,001m/m COMPRIMENTO(L) 200m LARGURA(W) 100m Z<sub>0</sub> = 0,02m

ESPACAMENTO(wf) 0,50m VELOCIDADE DA AGUA(V) 13m/min P<sub>1</sub> = 0,57 P<sub>2</sub> = 1,367

Primeiras irrigacoes a=0,383 k=0,00346m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000057m<sup>3</sup>/m.min

Irrigacoes subsequentes a=0,327 k=0,0036m<sup>3</sup>/m.min fo=0,000037m<sup>3</sup>/m.min

VAZAO MAX. NAO EROSIVEL (Q<sub>max</sub>) = 0,01705 m<sup>3</sup>/min

PRIMEIRAS IRRIGACOES			IRRIGACOES SUBSEQUENTES		
Vazao/sul	TOP	TAV	Vazao/sul	TOP	TAV
(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(min)	(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(min)
0,094910	214,48	55,961	0,047310	370,54	96,385
0,085419	214,48	61,781	0,042579	370,54	108,468
0,076877	214,48	68,605	0,038321	370,54	122,837
0,069189	214,48	76,693	0,034489	370,54	140,045
0,062270	214,48	86,357	0,031040	370,54	160,812
0,056043	214,48	97,998	0,027936	370,54	186,067

TABELA A23 CONFIGURACAO DO SISTEMA COM REUTILIZACAO DA AGUA DE ESCOAMENTO  
PARA DIFERENTES VALORES DE VAZAO POR SULCO PROJETO: FAOWALK

Vazao/sul	Tempo AV	Tempo Op	p	r	Perd por percol	Perd por escoam	Vol esc/sul	Ea
(m <sup>3</sup> /min)	(min)	(min)			DPR(%)	TWR(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)
Primeiras irrigacoes								
0,094910	55,961	214,48	8,604	0,782	2,56	68,28	17,01	97,44
0,085419	61,781	214,48	8,488	0,766	3,09	63,01	14,87	96,91
0,076877	68,605	214,48	8,384	0,750	3,74	59,50	12,95	96,28
0,069189	76,693	214,48	8,294	0,733	4,55	55,74	11,23	95,45
0,062270	86,357	214,48	8,218	0,716	5,54	51,75	9,89	94,46
0,056043	97,998	214,48	8,157	0,698	6,77	47,55	8,33	93,23
Irrigacoes subsequentes								
0,047310	96,385	370,54	6,517	0,749	2,93	60,85	13,44	97,07
0,042579	108,468	370,54	6,384	0,735	3,59	57,18	11,66	96,41
0,038321	122,837	370,54	6,263	0,720	4,41	53,27	10,07	95,59
0,034489	140,045	370,54	6,154	0,704	5,43	49,13	8,65	94,57
0,031040	160,812	370,54	6,059	0,688	6,70	44,79	7,39	93,30
0,027936	186,067	370,54	5,983	0,672	8,28	40,29	6,26	91,74



TABELA A24 RELACAO ENTRE A VAZAO TOTAL E O NUMERO DE LOTES PROJETO: FAOWALK

PRIMEIRAS IRRIGACOES		IRRIG SUBSEQUENTES	
NUMERO DE LOTES	VAZAO TOT (m3/min)	NUMERO DE LOTES	VAZAO TOT (m3/min)
13	0,906	10	0,611
12	0,984	9	0,682
11	1,077	8	0,772
10	1,189	7	0,888
9	1,327	6	1,046
8	1,502	5	1,273
7	1,729	4	1,624
6	2,038	3	2,244
5	2,481	2	3,627
4	3,170	1	9,481
3	4,388		

TABELA A25 CONFIGURACAO FINAL DO SISTEMA SEGUNDO A MELHOR PERFORMANCE PROJETO: FAOWALK

TE	No SUL 1ro lote	No SUL Lot int	No SUL Ult lot	Q/SUL (m3/min)	QBOMB (m3/min)	Q Req (m3/min)	T CORTE (min)	Ea (%)
PRIMEIRAS IRRIGACOES								
	18	30	32	0,0949	1,146	1,729	270,46	97,44
IRRIGACOES SUBSEQUENTES								
	19	30	31	0,0473	0,524	0,888	466,92	97,07