

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MONITORAMENTO SAZONAL DO DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS NO PERÍMETRO
IRRIGADO DE SÃO GONÇALO-PB**

**Ed-Naldo Fernandes de Santana
Engenheiro Agrícola**

**Campina Grande, Paraíba
fevereiro de 1996**



S232m Santana, Ed-Naldo Fernandes de
Monitoramento sazonal do desempenho de um sistema de irrigação por sulcos no perímetro irrigado de São Gonçalo - PB / Ed-Naldo Fernandes de Santana. - Campina Grande, 1996. 96 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Irrigação por Sulcos 2. Monitoramento Sazonal 3. Perímetro de São Gonçalo 4. Dissertação I. Azevedo, Carlos Alberto Vieira de, Dr. II. Barreto, Aurelir Nobre, M.Sc. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB)

CDU 626.842(043)

ED-NALDO FERNANDES DE SANTANA

**MONITORAMENTO SAZONAL DO DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS NO PERÍMETRO
IRRIGADO DE SÃO GONÇALO-PB**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal da
Paraíba, como parte das
exigências do curso de
Mestrado em Engenharia
Agrícola, para obtenção do
grau de Mestre em Ciências
(Msc)**

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Carlos Alberto Vieira de Azevedo (UFPb)

Co-orientador: Aurelir Nobre Barreto (EMBRAPA-CNPA)

Campina Grande, Paraíba

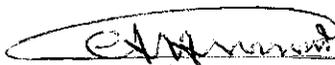
fevereiro de 1996

**MONITORAMENTO SAZONAL DO DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS NO PERÍMETRO
IRRIGADO DE SÃO GONÇALO-PB**

ED-NALDO FERNANDES DE SANTANA

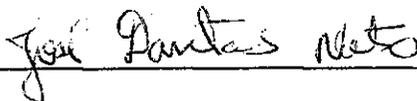
Engenheiro Agrícola

Dissertação aprovada em 29/02/1996



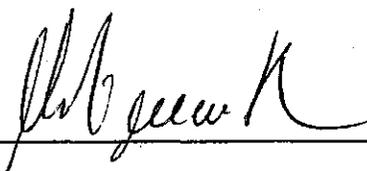
CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO (PhD/UFPB)

Presidente



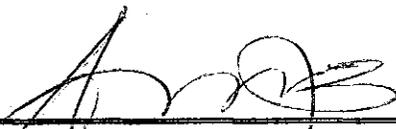
JOSÉ DANTAS NETO (PhD/UFPB)

Examinador



HEBER PIMENTEL GOMES (PhD/UFPB)

Examinador



AURELIR NOBRE BARRETO (M.Sc/EMBRAPA-CNPA)

**Campina Grande, Paraíba
fevereiro de 1996**

Agradecimento Especial

Para meus pais, Francisco Soares de Santana e Maria das Graças Fernandes de Santana, aos meus irmãos, Ed-Wilson, Luciana e Ed-Weine Fernandes de Santana e aos demais familiares, pelo incentivo.

Agradecimentos

A Deus, fonte inesgotável de sabedoria, minha fortaleza nas horas difíceis e minha luz nos momentos sombrios.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA-CNPA, pela oportunidade oferecida para a conclusão do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola; ao Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, da Universidade Federal da Paraíba-UFPb, por sua importante orientação, sugestões prestadas, correção da tese e pela tradução do resumo à língua inglesa.

Aos pesquisadores técnicos e operários rurais da EMBRAPA, do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca-DNOCS, e aos técnicos dos laboratórios de Engenharia de Irrigação, de Recursos Hídricos e Engenharia de Irrigação e Salinidade, pelo apoio durante o curso, na coleta e análise por ocasião da realização desta pesquisa; ao Sr. José de Araujo Campos pela digitação e diagramação deste trabalho; e enfim, a todos os professores, colegas do curso de Pós-graduação e Graduação, à minha noiva Joyce Costa Gomes, à amigos e pessoas que, de uma ou de outra maneira, colaboraram para a efetivação deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	
REVISÃO DE LITERATURA	04
AVALIAÇÃO DO SISTEMA	04
VAZÃO MÁXIMA NÃO EROSIVA	05
AVANÇO DA ÁGUA NO SULCO	06
INFILTRAÇÃO	06
PERDAS D'ÁGUA NO SULCO	10
PERFORMANCE DOS SISTEMAS	15
CAPÍTULO III	
MATERIAIS E MÉTODOS	20
LOCAL DA PESQUISA	20
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO	20

CARACTERÍSTICAS DOS SULCOS	21
DIMENSIONAMENTO E MANEJO DO SISTEMA	21
VAZÃO DE ENTRADA E SAÍDA	23
VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO BÁSICA	24
CARACTERÍSTICAS DE INFILTRAÇÃO	28
FASE DE AVANÇO	28
PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	28
EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO	28
TAXA DE PERCOLAÇÃO	29
TAXA DE ESCOAMENTO	29
UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO	30
EFICIÊNCIA DE ARMAZENAMENTO	30
PARÂMETROS OPERACIONAIS	31
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
DADOS DO PROJETO	32
HIDROGRÁFICO DE FLUXO	34
PERFILÔMETRIA DOS SULCOS	42
CARACTERÍSTICAS DE INFILTRAÇÃO	58
FASE DE AVANÇO	63

AVALIAÇÃO DO SISTEMA	68
EFICIÊNCIA DE ARMAZENAMENTO E	
UNIFORMIDADE E DISTRIBUIÇÃO	69
EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO	77
PERDAS POR PERCOLAÇÃO	78
PERDAS POR ESCOAMENTO	79
CAPÍTULO V	
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
CONCLUSÕES	80
RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS	81
RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO A	90

LISTA DE FIGURA

FIGURAS		PÁGINAS
1	Ilustração da Calha Parshall H26-1 utilizada nas medições de vazão	25
2	Vertedor para manutenção da carga hidráulica constante	26
3	Ilustração do perfilômetro	27
4 a 15	Hidrográfico de fluxo do primeiro ao décimo segundo evento de irrigação	35 a 41
16 a 25	Variação espacial da seção de fluxo, do primeiro ao décimo evento de irrigação	44 a 53
26	Variação temporal dos parâmetros da equação de Kostiakov-Lewis	60
27 a 29	Variação temporal das características de infiltração do solo	62 a 63
30 a 32	Variação temporal da fase de avanço	64 a 65
33 a 44	Perfil de infiltração e fases de avanço e armazenamento do primeiro ao décimo segundo evento de irrigação	69 a 74
45	Variação temporal da eficiência de aplicação, perdas por percolação e perdas por escoamento	77

LISTA DAS TABELAS

TABELAS		PÁGINA
1	Calendário das irrigações, lâmina bruta e infiltração desejada	22
2	Distribuição dos tamanhos das partículas e classificação textural	32
3	Características físico-hídricas do solo	33
4	Dados básicos da área do projeto	33
5	Vazão de entrada e de saída para cada evento de irrigação	42
6	Área (cm ²) da seção de fluxos ao longo do sulco e ao longo da estação de cultivo	54
7	Média espacial da seção de fluxo dos sulcos para cada evento de irrigação	55
8	Média temporal da seção de fluxo dos sulcos para diferentes seções ao longo do sulco	57
9	Coeficientes da equação de Kostiakov-Lewis para cada evento de irrigação	60
10	Variação dos tempos de avanço, oportunidade e aplicação ao longo da estação de cultivo	75

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo realizar um monitoramento sazonal da performance de um sistema de irrigação por sulcos no perímetro irrigado de São Gonçalo - PB, tendo em vistas execer-se um controle sistemático das condições hidráulicas de cada evento de irrigação que favoreça uma melhoria de desempenho do sistema. Para executar esse monitoramento, realizou-se: uma quantificação das variações espacial e temporal nos parâmetros de campo; um monitoramento da fase de avanço; avaliações da performance do sistema; e um monitoramento de seus parâmetros operacionais. Os resultados identificaram variações tanto espaciais com temporais na seção de fluxo dos sulcos. A base do sulco foi a dimensão que mostrou-se mais vulnerável a alterações ao longo da estação da cultivo, com uma percentual de variação de 63%. As fases de avanço refletiram variações apenas temporais nas características de infiltração do solo. Nos últimos quatro eventos essas variações foram insignificantes. O monitoramento da fase de avanço contribuiu substancialmente para balancear as perdas d'água por percolação e escoamento superficial. O monitoramento dos parâmetros operacionais favoreceu uma melhoria significativa na performance do sistema ao longo da estação de cultivo. A eficiência de aplicação aumentou de 41% para 71%, tendo sido seu valor médio sazonal de 62%. A eficiência de aplicação foi melhorada sem, no entanto, sacrificar-se a condição de irrigação adequada que era uma meta desta pesquisa. Sem um manejo sistemático e adequado dos parâmetros operacionais, as variações espacial e temporal nos parâmetros de campo, podem comprometer sensivelmente a performance dos sistemas de irrigação por sulcos.

ABSTRACT

The purpose of this research was to perform a seasonal monitoring of the furrow irrigation system performance in the São Gonçalo-Pb irrigation district, looking forward to a systematic control of the hydraulic conditions of each irrigation event that would favour a better system performance. To perform this monitoring, it was done: a quantification of the spatial and temporal variations in field parameters; an advance phase monitoring; system performance evaluations; and a monitoring of its operational parameters. The results identified spatial and temporal variations in the furrow cross section. The furrow base was the dimension that showed to be most vulnerable to variations over the season, with a percentage of variation equal to 63%. The advance phases exhibited only temporal variations in the soil infiltration characteristics. In the last four events these variations were insignificant. The advance phase monitoring contributed substantially to balance the deep percolation and runoff water losses. The monitoring of the operational parameters resulted in a significant improvement in the system performance over the season. The application efficiency increased from 41% to 71%, where its seasonal average value was 62%. This application efficiency improvement did not sacrificed the condition of complete irrigation, which was the goal of this research. Without a systematic and adequate management on the operational parameters, the spatial and temporal variations in field parameters might compromise sensitively the furrow irrigation system performance.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A irrigação no Nordeste brasileiro compreende os perímetros irrigados distribuídos na região semi-árida, sob administração do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), da Companhia de Desenvolvimento do Vale de São Francisco (CODEVASF), e propriedades públicas e privadas.

Como na maioria dos países, a irrigação por sulcos é o método que predomina nos perímetros irrigados sob administração pública tanto do DNOCS quanto da CODEVASF. A irrigação é feita em sulcos curtos e/ou em pequenos tabuleiros ou bacias inundadas. Porém, a maioria dos usuários do método de irrigação por sulcos interrompe o fornecimento d'água ao sulco, quando a frente de avanço atinge o final da área, por ter em mente que o escoamento superficial (Runoff) representa uma perda desnecessária d'água. Outros usuários aplicam água em excesso, proporcionando grandes perdas por percolação e por escoamento superficial no final do sulco, o encharcamento prolongado nas bacias inundadas. A interrupção da irrigação, quando a frente de avanço atinge a extremidade final dos sulcos ou após um período de tempo insuficiente para aplicar a lâmina de irrigação desejada, resulta na infiltração de pequenas lâminas de água no final do sulco, reduzindo, assim, a disponibilidade de água para as plantas, o que pode concorrer para um desenvolvimento inadequado destas, especialmente no trecho final dos sulcos.

A eficiência de aplicação no sistema de irrigação por sulcos é afetada pelas perdas de água por percolação profunda e por escoamento superficial no final do sulco. Essas perdas podem acarretar sérios problemas de drenagem e salinização, dependendo entre outros fatores da textura do solo, declividade do sulco, lâmina de irrigação, comprimento do sulco, vazão de entrada, e principalmente da habilidade do irrigante no manejo de água.

As baixas eficiências de armazenamento e de distribuição de água no sistema radicular, normalmente alcançadas nos perímetros irrigados do Nordeste brasileiro, constituem um dos fatores que concorrem para a obtenção de baixas produtividades das culturas. Por outro lado, as perdas de água por percolação e por escoamento superficial, no final dos sulcos, tende a ser um problema grave em virtude da limitada disponibilidade de recursos hídricos da região semi-árida do Nordeste, a falta de um gerenciamento dos recursos hídricos.

As perdas de água por percolação podem causar também a elevação do lençol freático e do nível de salinidade, assim como a lixiviação de nutrientes hidrossolúveis para as camadas abaixo da zona radicular. O transporte de agroquímicos, pela água de percolação e/ou de escoamento superficial, apresenta-se como uma fonte em potencial de poluição dos recursos hídricos.

Um dos fatores responsáveis pelo baixo nível de performance dos sistemas de irrigação por sulcos verificados nos perímetros no Nordeste, é a deficiência de mão-de-obra qualificada para o manejo adequado do sistema. Além do uso de vazões constantes e inadequadas às características físicas do solo e da interrupção do fornecimento d'água, quando a frente de avanço atinge a extremidade final dos sulcos, o irrigante impõe uma grande variabilidade na carga hidráulica entre sifões não padronizados, o que ocasiona uma grande variação na lâmina de água aplicada ao longo do sulco entre as irrigações e entre sulcos de uma mesma sub-área.

Vale salientar alguns obstáculos que os irrigantes encontram para fazer um controle adequado d'água na exploração das culturas, tais como: dificuldade de uniformizar a carga hidráulica durante as irrigações, variação na declividade dos sulcos entre sub-áreas ou

mesmo durante as rotações de culturas, padronização dos sifões, controle da umidade do solo para irrigação, e o manejo da dotação de água, por colono, dentro dos perímetros irrigados.

O presente trabalho tem como objetivo principal fazer um monitoramento Sazonal da performance do sistema de irrigação por sulcos no Perímetro Irrigado de São Gonçalo.

Os objetivos específicos foram:

- a) Monitoramento da fase de avanço;
- b) Determinação das variações temporal e espacial em parâmetros de campo;
- c) Avaliação da performance do sistema;
- d) Monitoramento dos parâmetros operacionais do sistema.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

A irrigação por superfície é o método de irrigação mais antigo e mais usado em todo o mundo, inclusive no Brasil. Presta-se para a irrigação de quase todas as culturas, adaptando-se aos diversos tipos de solos de baixa erodibilidade (NIELSEN et al., 1973).

LAWRENCE (1953) e PHELAN (1960), citado por MARR (1967), mencionam que a severidade da erosão que ocorre nos sulcos, durante uma irrigação, depende da declividade do sulco, da vazão e do grau de agregação do solo. As perdas de água e solo são inevitáveis, especialmente quando o manejo desses elementos é inadequado (CRIDDLE, 1969).

AVALIAÇÃO DO SISTEMA

A análise pormenorizada dos elementos básicos de um sistema de irrigação proporciona a obtenção de informações que permitem a avaliação de seu desempenho, assim como possíveis modificações que possam corrigi-lo.

Conforme MERRIAM et al (1973), a avaliação do sistema de irrigação por sulcos é feita em condições de campo, mediante as seguintes observações: vazão máxima não erosiva de entrada; avanço da água na superfície do solo; infiltração; perdas de água por percolação; perdas de água por escoamento superficial no final do sulco; eficiência de aplicação e de distribuição e perfilometria.

Vazão máxima não erosiva

A vazão aplicada por sulcos é um dos fatores mais importantes para obtenção de uma irrigação eficiente. De acordo com HAMAD e STRINGHAM (1978), a vazão máxima não erosiva que um sulco pode conduzir depende de muitos fatores, destacando-se entre eles a declividade e a erodibilidade do solo.

GARNER et al (1946), citado por BERNARDO (1980), estudando o efeito da vazão e da declividade na erosão do solo, ao longo do sulco, propuseram a seguinte equação empírica para a determinação da vazão máxima não erosiva;

$$q_{\max} = \alpha s^{\beta} \quad (01)$$

onde q_{\max} é a vazão máxima não erosiva, em l/s; α é a constante que depende do tipo de solo, em l/s; s é a declividade do sulco, em %; β é a constante que depende do tipo de solo, adimensional.

WALKER e SKOGERBOE (1987), propuseram a seguinte equação para o cálculo da vazão máxima não erosiva, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco:

$$q_{\max} = [v_{\max}^{\rho_2} * (n^2 / 3600 * \rho_1 * S_0)]^{1/\rho_2} \quad (02)$$

onde q_{\max} é a Vazão máxima não erosiva, em m³/min; v_{\max} é a Velocidade máxima não erosiva, em m/min; n é o Coeficiente de Manning; ρ_1 e ρ_2 são os Coeficientes que expressam a geometria do sulco; S_0 é a Declividade do sulco, em m/m

Avanço da água no sulco

No sistema de irrigação por sulcos, a fase de avanço d'água é de extrema importância, porque seu comportamento é o que estabelece variações no tempo de oportunidade de infiltração ao longo do sulco. Além do mais, pode-se determinar através da curva de avanço o comprimento dos sulcos e a vazão máxima não erosiva adequados, que são parâmetros que exercem marcante influência na performance do sistema de irrigação.

Existem vários tipos de equações usadas para descrever a velocidade de avanço d'água no sulco:

Equação potencial citada por GRASSI (1972)

$$L = a T_{av}^m \quad (03)$$

onde L é o comprimento do sulco, em m; a é a constante empírica que depende da declividade, vazão, características da geometria do fluxo e rugosidade da superfície, em m/min; m é a constante empírica que está relacionada com as características físicas do solo, expressas em função da infiltração, adimensional; T_{av} é o tempo de avanço no final do sulco, em min.

Infiltração

Segundo BERNARDO (1982), infiltração é o processo pelo qual a água penetra no solo através de sua superfície. A velocidade de infiltração d'água em um solo é um fator

importante na irrigação, visto que ela em parte determina o tempo em que se deve manter a água na superfície do solo de modo que se aplique a quantidade requerida.

Segundo GUROVICH (1979), em geral, a velocidade de infiltração da água no solo é alta nos estágios iniciais, especialmente quando o solo está seco, e tende a decrescer e, eventualmente, a alcançar assintoticamente uma velocidade constante, que se chama geralmente de infiltração básica ou permanente, ou seja, o processo alcança uma velocidade constante que aparentemente não diminui com o tempo.

De acordo com WALKER e SKOGERBOE (1987) e ISRAELSEN e HANSEN (1965), a de infiltração d'água no solo depende de muitos fatores, entre os principais, as propriedades físicas do solo (textura, estrutura, permeabilidade), o conteúdo inicial de umidade do solo, o tempo de oportunidade de infiltração, o perímetro molhado.

Cristiansen e Borrier (s.d.), citado por POIREE e OLLIER (1970), mencionam que a variação da velocidade de infiltração, em função do tempo, é uma ação sucessiva de vários fenômenos que modificam as características do solo obedecendo o seguinte processo:

1. A diminuição rápida inicial da velocidade de infiltração é devida à expansão dos colóides do solo, o que também explica a diferença de comportamento dos solos arenosos (pobres em colóides) e dos solos argilosos (ricos em colides); 2. Aumentos eventuais da velocidade de infiltração podem ser causados pelo desaparecimento de bolhas de ar nos interstícios, devido a dissolução e arraste das mesmas na água, bolhas que por sua presença retornam a circulação da água no solo.

Existem vários métodos e maneiras para se determinar a velocidade de infiltração de um solo, e inúmeras fórmulas foram desenvolvidas para expressar este fenômeno físico.

Dentre as equações que quantificam a infiltração da água no solo, têm-se três categorias (WALKER e SKOGERBOE, 1987): 1. Equações analíticas baseadas nos princípios matemáticos do fluxo em meios porosos. Entre estas equações, destaca-se a equação de RICHARDS (1931), conhecida como a equação do fluxo d'água no solo; 2. Equações físicas baseadas em parâmetros físicos, tais como: condutividade, difusividade, transmissividade. Destacando-se entre as equações a equação de GREEN-AMPT (1911), citado por WALKER e SKOGERBOE (1987), dada por:

$$I = K [1 + (\theta_s - \theta_i) h/z] \quad (04)$$

onde I é a taxa de infiltração; K é a condutividade hidráulica; h é a pressão efetiva; θ_s é o conteúdo de umidade em condições de saturação; θ_i é o conteúdo de umidade inicial; Z é a infiltração acumulada; 3. Equações empíricas baseadas em medições de campo, incorporando em seus parâmetros todos os fatores que afetam o processo de infiltração. Destaca-se a equação de KOSTIAKOV (1932), citada por WALKER e SKOGERBOE (1987), dada por:

$$Z = K \Gamma^a \quad (05)$$

onde Z é a infiltração acumulada, em m^3/m ; Γ é o tempo de oportunidade, em min; K e a são coeficientes que dependem das características físicas do solo. Existe também a equação de Kostiakov-Lewis (s.d.), citada por WALKER e SKOGERBOE (1987), dada por:

$$Z = K\Gamma^a + f_0 \Gamma \quad (06)$$

onde Z é a infiltração acumulada, em m^3/m ; Γ é o tempo de oportunidade de infiltração, em min; K e a são constantes; torna-se longo;

$$f_0 = (Q_e - Q_s)/L \quad (07)$$

onde Q_e é a vazão de entrada, em m^3/min ; Q_s é a vazão de saída, em m^3/min ; L é o comprimento do sulco, em m.

Segundo GAVANDE (1979), o parâmetro k está associado com a infiltração durante o intervalo de tempo inicial, portanto, depende da estrutura e da condição física do solo no momento em que se aplica a água. Se o solo possui fendas e poros grandes, o valor de k é relativamente maior que se o solo têm somente poros pequenos. O parâmetro a indica a forma como a velocidade de infiltração varia com o tempo, portanto, depende das variações da estrutura do solo resultante do umedecimento.

AZEVEDO (1975), demonstrou que o coeficiente k da equação de infiltração acumulada diminui à medida que aumentou o conteúdo inicial d'água no solo. Enquanto que o expoente a não foi afetado com o conteúdo inicial de água do solo.

GRASSI (1972), conduzindo experimentos em solos de textura argilosa, constatou um aumento linear da infiltração acumulada com a vazão durante o tempo de avanço e um aumento curvilíneo durante o tempo de armazenamento.

BERNARDO (1977), recomenda que, no sistema de irrigação por sulcos, a velocidade de infiltração deve ser determinada pelo método de entrada-saída de água no

sulco, o medidor mais adequado é o WSC flume tipo A, ou pelo método do infiltrômetro para medição de vazão em sulcos de irrigação. Conforme BERNARDO (1977), este medidor foi desenvolvido pela Washington State College, Washington-USA, adaptando o princípio de venturi para medição de vazões em canais.

Perdas d'água nos sistemas de irrigação por sulco

Os grandes investimentos aplicados nos projetos de irrigação exigem um critério eficiente na utilização de água. JENSEN et al (1974) citado por CHOUDHURY et al (1967), afirmam que a eficiência de uso de água nos projetos de irrigação em que a água é abundante ou de baixo custo, torna-se um fator secundário. Porém, quando este recurso é escasso seu uso eficiente passa a apresentar maior interesse. Da água aplicada nas parcelas somente parte é utilizada pelas culturas sendo o restante perdido por evaporação, percolação e escoamento superficial (Runoff) (ISRAELSEN et al., 1965). Segundo GRASSI (1968), as perdas de água por evaporação são predominantes nos sistemas de irrigação por aspersão, enquanto por percolação profunda e por escoamento superficial são predominantes nos sistemas de irrigação por superfície. As perdas de água por percolação e por Runoff, causam problemas de drenagem e de salinização. Segundo Richards, Zylstra e Salinas, citados por CORDEIRO (1977), a acumulação de sais nos solos salinos é originada a princípio pela intemperalização dos minerais, causando a contaminação das águas subterrânea e das águas de irrigação.

CRIDDLE et al., (1969), apresentam uma análise matemática da perda de água por percolação onde recomendam que a frente de avanço d'água deve atingir a extremidade final do sulco em $\frac{1}{4}$ do tempo necessário para aplicação da lâmina de irrigação desejada,

mantendo-se a vazão inicial ou reduzida no sulco até que seja infiltrada, na sua extremidade final. Baseados no princípio de que a velocidade de infiltração é inversamente proporcional à raiz quadrada do intervalo de tempo percorrido e utilizando a equação que descreve a infiltração acumulação de água no solo, eles verificaram que a perda média por percolação profunda era de 5%.

Segundo LOPES (1973), a perda por percolação seria eliminada se a irrigação fosse insuficiente para preencher completamente a zona radicular no final do sulco. Isto traria o inconveniente de não satisfazer a condição básica de repor ao solo toda a água utilizada na zona radicular. WITHERS e VIPOND (1967), citam que as perdas por percolação (que são função do índice de avanço da água no sulco, da declividade do terreno e da profundidade de aplicação), influem no comprimento do sulco a ser utilizado em um determinado tipo de solo. WALKER e SKOGERBOE (1987), utilizando as características de infiltração da água no solo, propôs a seguinte equação para determinar as perdas por percolação:

$$TP = (V_p/V_a) \times 100 \quad (08)$$

onde TP é a taxa de percolação, em %; V_p é o volume d'água percolado, em m^3 ; V_a é o volume total aplicado, em m^3 .

BERNARDO et al., (1977), considera a percolação o excesso de água infiltrada no solo abaixo da zona radicular. Deste modo, as perdas por percolação podem ser estimadas pelas equações seguintes:

$$D_p = [(D_i + D_t)/2] - D_t \quad (09)$$

$$P_p = D_p/D_m \times 100 \quad (10)$$

onde D_p é a lâmina de água perdida por percolação, em mm; D_i é a lâmina infiltrada no início do sulco, em mm; D_f é a lâmina infiltrada no final do sulco, em mm; P_p é a percentagem de água perdida por percolação, em %; D_m é a lâmina média aplicada no sulco, em mm.

Para condição de vazão constante, a lâmina média será o produto da vazão pelo tempo de aplicação de água no início do sulco, dividido pela área molhada ao longo do sulco:

$$D_m = [(T_i \times q)/(L \times C)] \times 3.600 \quad (11)$$

onde D_m é a lâmina média aplicada em cada sulco, em mm; T_i é o tempo de aplicação de água no início do sulco, em min; q é a vazão aplicada, em l/s; C é a largura da faixa de umedecimento do sulco, em m; e L é o comprimento do sulco, em m.

Segundo HART (1975), a velocidade de infiltração básica, varia de 2 a 20 mm/h de um solo de textura argilosa para um solo de textura siltosa, a duração de Runoff não excederia $\frac{1}{2}$ do tempo de irrigação. De acordo com esse autor, a vazão de Runoff normalmente não excederá a $\frac{2}{3}$ da vazão inicial. Ela aumenta com o tempo e tende a estabilizar-se ao longo da fase de armazenamento. O tempo de Runoff igual à metade do tempo de aplicação, com uma vazão máxima de Runoff igual a $\frac{2}{3}$ da vazão inicial, resulta num volume de Runoff de aproximadamente 25% do volume de água aplicado. Uma vez que muitas variáveis podem influenciar na velocidade de infiltração e além do mais a

vazão de entrada não sendo bem controlada, o volume de Runoff poderá variar consideravelmente durante a fase de armazenamento. O autor afirma ainda que, um volume de Runoff projetado, que seja o dobro do volume previsto, terá normalmente uma probabilidade de ser excedido de apenas 10% dos casos. Portanto, o volume de água, aplicado em solos de permeabilidade baixa a moderada sendo esse limite de 60%. Para solos mais permeáveis, onde se utiliza maiores vazões para diminuir o tempo de avanço e reduzir a percolação profunda.

A determinação das perdas por Runoff é um problema complexo e seus dados não favorecem uma solução analítica prática. Assim, sendo procedimentos empíricos são necessários e qualquer um deles deveria levar em consideração as variáveis independentes que regem o fluxo d'água no sistema de irrigação por superfície, tais como: infiltração, geometria, rugosidade e declividade da superfície, vazão de entrada e tempo de irrigação, comprimento do sulco e lâmina de irrigação (HART, 1975).

HART (1975), relata sobre a medição direta de Runoff em sulcos de irrigação e em drenos parcelares, através de vertedores parshalls e WSC flumes. Se registradores não são usados, o tempo de início de ocorrência de Runoff deve ser anotado e a vazão de Runoff deve ser medida de 3 a 4 vezes, para se estimar a curva de distribuição de Runoff. A vazão máxima de Runoff ocorre logo após o término da aplicação de água, tempo em que a última medição deveria ser feita. Daí em diante, poucas medições são necessárias em virtude do Runoff ser constituído de uma pequena parte em relação ao volume total.

WILLARDSON e BISHOP (1967), desenvolveram uma equação para estimar as perdas de água por escoamento superficial no final do sulco, assumindo que a vazão de

Runoff é uma percentagem da vazão aplicada durante o tempo de oportunidade de infiltração dada por:

$$Pc = (To/Ta + To) \times (Qr/q) \times 100 \quad (12)$$

onde Pc é a percentagem de água perdida por Runoff em relação ao volume de água aplicado; To é o tempo de oportunidade, em min; Ta é o tempo de avanço, em min; Qr é a vazão de Runoff, em l/s; q é a vazão aplicada por sulco, em l/s.

Segundo FISCHBACH e SOMERHALDER (1971), as perdas de água por escoamento superficial, percolação profunda e por evaporação podem variar de 27 a 43%, num sistema convencional de irrigação.

SOARES et al., (1983), determinaram que a reutilização da água escoada resultou numa eficiência de aplicação de 65% para R (relação entre o tempo necessário para aplicar uma determinada lâmina de irrigação no final do sulco e o tempo de avanço d'água no final do sulco). R = 0,5 e cresceu com o aumento do valor de R; concluíram ainda que a reutilização da água escoada ocasionou sensível redução no custo total de bombeamento da água de irrigação. SOARES (1980), concluiu que para um mesmo comprimento de sulco e sob condições de vazão constante as perdas por percolação tenderam a decrescer e as perdas por escoamento a crescer quando o valor de R aumentou.

WALKER e SKOGERBOE (1987), propuseram uma equação para determinar a perda por escoamento superficial no final do sulco, dada por:

$$TE = (Ves/Va) \times 100 \quad (13)$$

onde TE é a taxa de escoamento superficial; Ves é o volume d'água escoado; Va é o volume total aplicado.

Uma estimativa da percentagem d'água perdida por escoamento superficial no final do sulco pode ser obtida, segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), da seguinte maneira:

$$TE = 100 - Ea - TP \quad (14)$$

onde TE é a taxa de escoamento superficial, em %; Ea é a eficiência de aplicação, em %; TP é a taxa de percolação, em %.

Performance dos sistemas

A performance dos sistemas de irrigação tem que ser avaliados quanto as perdas (escoamento, percolação e eficiência de aplicação), quanto ao deficit (eficiência de armazenamento) e quanto a uniformidade de distribuição.

KELLER e Mc CULLOCH (1962), levando em consideração os parâmetros textura do solo e topografia, encontraram valores extremos de eficiência de aplicação, para métodos de irrigação superficiais, que oscilaram entre 20 a 75%. Eles consideram uma eficiência média de 65% como adequada. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos admite que em geral os agricultores obtêm nos projetos em operação nos Estados Unidos eficiências de aplicação de 70 a 75% (JENSEN et al 1967).

NOGUEIRA (1976) encontrou eficiência médias da água de irrigação de 40, 51 e 55%, respectivamente nos perímetros irrigados de Arcoverde-PB, São Gonçalo-PB e Sumé-PB. A eficiência média dos três perímetros foi de 48,7%.

Em Petrolina, Pernambuco, no projeto de irrigação bebedouro, LEAL (1979) encontrou uma eficiência média de aplicação de 33%, para as condições de irrigação ali praticadas.

De modo geral, a baixa eficiência de aplicação não significa apenas uma perda excessiva de água, mas também uma lixiviação de nutrientes hidrossolúveis, deficiência de umidade, encharcamento e/ou salinização do solo devido à elevação do lençol freático, que contribuem para baixas produtividades. Sempre que se utiliza um método de irrigação, espera-se obter o máximo de rendimento, com aumentos sensíveis na produção das culturas.

DAKER (1970), afirma que a eficiência de aplicação depende, principalmente, dos seguintes fatores: a) natureza do solo: a eficiência é menor nos solos muito permeáveis, onde há predomínio das perdas por percolação; b) espécie vegetal: devem-se considerar, principalmente, a profundidade e a distribuição do sistema radicular das culturas. Maiores eficiências são alcançadas com culturas menos espaçadas e de sistema radicular mais profundo; c) sistema de irrigação e preparo do solo: dentre os sistemas superficiais, o método de irrigação por sulcos, que geralmente exigem um bom preparo do terreno, permitem a obtenção de eficiências relativamente altas, podendo ir até 80%, mas este valor poderá baixar para 40% ou menos em condições de solo muito permeáveis, terrenos mal preparados e manejo de água inadequado; d) habilidade do agricultor: uma grande parte das perdas pode ser evitada se o irrigante souber manejar a água e aplicá-la de

conformidade com as exigências das plantas, tipo de solo, preparo do terreno, sistema de irrigação, vazão, lâmina e tempo de aplicação.

LEAL (1974), estudando o manejo de água a nível de parcela no projeto piloto de irrigação de bebedouro, Petrolina-PE, constatou que a eficiência de aplicação variou de 26 a 39%, enquanto a eficiência de distribuição oscilou de 45 a 53%. SOARES (1980), através de estudos realizados no campo experimental de bebedouro, Petrolina-PE, constatou que a eficiência de distribuição variou entre 57 a 88,5% e a eficiência de aplicação ficou entre 43 e 60%.

Conforme MARRIAM e KELLER (1978), citados por AZEVEDO (1993), os sistemas de irrigação superficial têm o potencial de aplicar a água aos cultivos com eficiências de 70 a 80%. Segundo FISCHBACK e SOMERHALDER (1971), citados por AZEVEDO (1993), alguns sistemas automatizados têm favorecido eficiências em torno de 90%. De acordo com EIRE e DEDRICK (1979), citados por AZEVEDO (1993) nos sistemas por bacias em nível em solos de textura fina, pode-se atingir eficiências de aplicação acima de 90%. BARRETO e FORMIGA (1986), citados por AZEVEDO (1993), conseguiram eficiências de aplicação entre 75 a 95%, trabalhando com bacias em nível e sulcos de base larga.

Segundo ISRAELSEN (1944), os fatores abaixo relacionados contribuem para baixas eficiência de irrigação: a) Superfícies irregulares: o mal preparo de terreno provoca o estancamento de água nas depressões, o que dificulta o avanço e compromete a uniformidade de distribuição de água; b) Métodos inadequados para distribuição e aplicação de água; c) Vazão e tempo de aplicação inadequados; d) aplicação de volume

excessivo de água em cada irrigação; e) reinício das irrigações quando o teor de umidade no solo se encontra acima do nível preestabelecido.

O regime hidráulico da irrigação por superfície é de difícil compreensão devido sua complexidade. Não obstante, para um projeto de irrigação obter êxito, depende fundamentalmente do conhecimento dos princípios que o regem (ISRAELSEN e HANSEN, 1965).

Segundo AZEVEDO (1993), a baixa eficiência de aplicação dos projetos de irrigação superficial se deve a um inadequado dimensionamento e um manejo inapropriado. Conforme esse autor, o processo de dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação superficiais, torna-se complicado devido às dificuldades que existem em medir (ou estimar) as variações espacial e temporal nos parâmetros de campo, especialmente as variações nas características de infiltração do solo. O dimensionamento e manejo dos referidos sistemas podem ser melhorados através da simulação do comportamento hidráulico de cada evento de irrigação sem, no entanto, requerer-se experimentações de campo extensivas, que são dispendiosas e consomem tempo (ELLIOTT et al., 1983), citados por AZEVEDO (1992).

Os modelos hidráulicos da irrigação superficial foram originalmente desenvolvidos para simular as fases da irrigação e predizer os resultados qualitativos e quantitativos de um evento de irrigação para um conjunto de parâmetros de campo conhecidos (AZEVEDO, 1993). Esse requerimento tornou a solução direta (simulação a partir de parâmetros de campo medidos) dos problemas da irrigação superficial muito dependente da qualidade desses parâmetros de campo fornecidos aos modelos. Existem grandes

dificuldades em se quantificar tais parâmetros. A característica de infiltração do solo, em particular, apresenta-se como a informação que mais compromete a simulação.

Para superar essas dificuldades, AZEVEDO (1992) propôs uma solução inversa para o problema, ou seja, em vez de medir a infiltração e simular o avanço (solução direta), medir o avanço e a partir dele simular a infiltração. Para tal desenvolveu o modelo SIRTOM que é um sistema de checagem e controle (FCCD-BACKCONTROL SYSTEMS) capazes de prever as características de infiltração num tempo real e promover ajustes, em tempo hábil, na operação do evento de irrigação, atingindo-se, assim, um alto nível de desempenho do sistema.

De acordo com BERNARDO (1977), a ocorrência de baixas eficiência de distribuição, no sistema de irrigação por sulcos, deve-se ao uso de pequenas vazões que contribuem para uma infiltração excessiva no trecho inicial do sulco e uma infiltração deficiente no trecho final.

Segundo LAL e PANDYA (1970), em muitos sistemas de irrigação por sulcos, onde a irrigação se processa com pequeno ou nenhum Runoff, resultarão em grandes perdas por percolação profunda. Os sistemas de irrigação por sulcos são, portanto, frequentemente projetados com Runoff. Os autores afirmam ainda que o critério apresentado por Criddle em 1959, assumindo que a frente de avanço de água deve alcançar o final do sulco em um quarto do tempo requerido para aplicar a lâmina de irrigação desejada, não considera nenhuma perda por Runoff. Provavelmente Runoff é reusado por um sistema de recirculação de irrigação, ou seja, aproveitamento da água de jusante. Portanto, levantam-se dúvidas a respeito do critério adotado, ou seja, de que o tempo de avanço igual a $\frac{1}{4}$ do tempo de irrigação seja a prática mais eficiente.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

Local da pesquisa

As atividades de campo do presente trabalho foram realizadas no perímetro irrigado de São Gonçalo, no município de Souza-PB, no Instituto Agrônomo José Augusto Trindade (IAJAT), no Campo Experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA/CNPA, num solo aluvião de textura média.

O perímetro geograficamente está localizado a 6°50' de latitude sul, 38°19' de longitude oeste de GREENWICH, e a 235m de altitude. Segundo W. KOEPPEN a classificação climática é do tipo BSw'h', quente com chuvas de verão-outono, período seco com duração de 4 a 5 meses. A temperatura média é 27°C, sendo os meses mais frios junho e julho e os mais quentes novembro e dezembro.

A precipitação média anual, de acordo com uma série histórica de dados de 80 anos, é de 865,4mm e a umidade relativa média é de 64%, segundo dados do laboratório de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal da Paraíba, (campus II).

Características físico-hídricas do solo

A análise granulométrica do perfil do solo, até a profundidade de 60cm, foi feita através do método do hidrômetro de Boy Youcos, sugerido por EMBRAPA (1979). A capacidade de campo, tomada a uma tensão de 0,33 atm, foi determinada em laboratório para amostras de solo coletadas a cada 30cm, até uma profundidade de 60cm, segundo Richards (1954), citado por EMBRAPA (1979). Obteve-se a média da capacidade de campo de três amostras. O ponto de murcha foi obtido pelo método de RICHARDS (1954), após submeter o solo a uma pressão positiva de 15 atm. A densidade global do solo

foi determinada pelo método do anel volumétrico de Uhland (1949), citado por EMBRAPA (1979). A velocidade de infiltração básica ou permanente da água no solo foi obtida através do método de entrada e saída, segundo a metodologia descrita por WALKER e SKOGERBOE (1987).

Características dos sulcos

A escolha dos sulcos na área irrigada foi ao acaso. O espaçamento entre os sulcos foi de 1,15m. O comprimento do sulco foi de 80,65m. A declividade do sulco foi determinada através de um nível de engenheiro. Fazendo-se leituras ao longo destes, com intervalos de 20m, obteve-se uma declividade de 0,002m/m. Conforme recomendação de WALKER e SKOGERBOE (1987), considerou-se um valor para a rugosidade da superfície do solo igual a 0,04. A geometria da seção transversal de fluxo dos sulcos foi medida em diferentes seções, utilizando-se perfilômetros desenvolvidos pelo CNPA-EMBRAPA (Figura 3). A área de fluxo foi matematicamente relacionada com a altura de fluxo de acordo com a seguinte metodologia proposta por WALKER e SKOGERBOE (1987):

DIMENSIONAMENTO E MANEJO DO SISTEMA

A vazão máxima disponível ao projeto foi de $2,7\text{m}^3/\text{min}$, com uma duração de 3 dias intercalados. Para todos os eventos de irrigação, o sistema funcionou com uma vazão constante durante toda a sua aplicação (fluxo contínuo), onde tentou-se satisfazer a condição de irrigação adequada, isto é, aplicar a lâmina desejada no final do sulco. A Tabela 1 apresenta o calendário das irrigações e as lâminas d'água desejadas ao longo da

estação de cultivo. Adotou-se o turno de rega em função da necessidade de reposição da lâmina necessária para a evapotranspiração potencial da cultura do algodoeiro 7H. O dimensionamento do sistema foi feito através do Software SURFACE, que determinou vazão de 1,02 l/s, um tempo de aplicação de 240 min.

Em cada evento de irrigação foram feitas as seguintes determinações: vazão de entrada e de saída; velocidade de infiltração básica; características de infiltração; fase de avanço; geometria da seção transversal dos sulcos; e os parâmetros de avaliação e operacionalização do sistema.

TABELA 1 - Calendário das irrigações, lâmina bruta e infiltração desejada

Eventos de irrigação	Datas	Lâmina bruta (mm)	Infiltração desejada (m ³ /m)
1	28/09/95	89	0.102
2	06/10/95	15.6	0.018
3	11/10/95	15.6	0.018
4	18/10/95	15.6	0.018
5	01/11/95	57	0.067
6	08/11/95	69	0.08
7	14/11/95	79	0.09
8	22/11/95	75	0.086
9	05/12/95	78.5	0.09
10	14/12/95	77	0.089
11	21/12/95	73	0.084
12	28/12/95	68	0.078

Vazão de entrada e saída

A derivação para o experimento foi feita de um canal secundário para um canal parcelar através de uma comporta tubular de 150mm, desenvolvida por BARRETO e NOGUEIRA (1989), e do canal parcelar para o sulcos através de sifões de plástico da marca spiraflex com 2,25m e 1 1/4" de diâmetro. À jusante do canal parcelar foi instalado um vertedor (Figura 2) para manter a carga hidráulica contante nesse canal. Os sifões foram calibrados para diferentes cargas hidráulicas, no laboratório de hidráulicas do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. Utilizando o software CURVEFIT, obteve-se a seguinte equação, com r^2 igual a 0,9985:

$$Q = 0,1805 + 0,045h - 0,0004h^2 \quad (15)$$

onde Q é a vazão, em l/s e h é a carga hidráulica, em cm.

A vazão aplicada nos sulcos foi selecionada partindo-se do conceito de vazão máxima não erosiva, proposto por WALKER e SKOGERBOE (1987), onde a velocidade máxima não erosiva para solos argilosos e arenosos estáveis é de 13 m/min. Tem-se:

$$Q_{max} = [(V_{max}^{\rho_2} \cdot n^2 / 3600 \cdot S_o \cdot \rho_1)]^{1/(\rho_i - 2)} \quad (16)$$

onde Q_{max} é a vazão máxima não erosiva, em m^3/min ; V_{max} é a velocidade máxima não erosiva, m/min; n é o coeficiente de manning; ρ_1 , ρ_2 são coeficientes da geometria do sulco e S_o é a declividade do sulco, em m/m.

As vazões de entrada e saída nos sulcos foram medidas através de calhas parshall H26-1 (Figura 1). A partir da curva de calibração dessas calhas obteve-se a seguinte equação, com r^2 igual a 0,9996:

$$Q = 0,0174 + 0,0063h + 0,0001h^2 \quad (17)$$

onde Q é a vazão, em l/s e h é a altura da leitura na calha, em mm.

As leituras nas calhas foram feitas em intervalos de 1 minuto, até completar o tempo de aplicação d'água. Com esses valores construiu-se o hidrográfico de fluxo.

Velocidade de infiltração básica

A velocidade de infiltração básica foi determinada conforme WALKER e SKOGERBOE (1987):

$$f_0 = (Q_e - Q_s)/L \quad (18)$$

onde f_0 é a velocidade de infiltração básica, em $m^3/\text{min}/m$; Q_e é a vazão de entrada, em m^3/min ; Q_s é a vazão de saída, em m^3/min , e L é o comprimento do sulco em m.

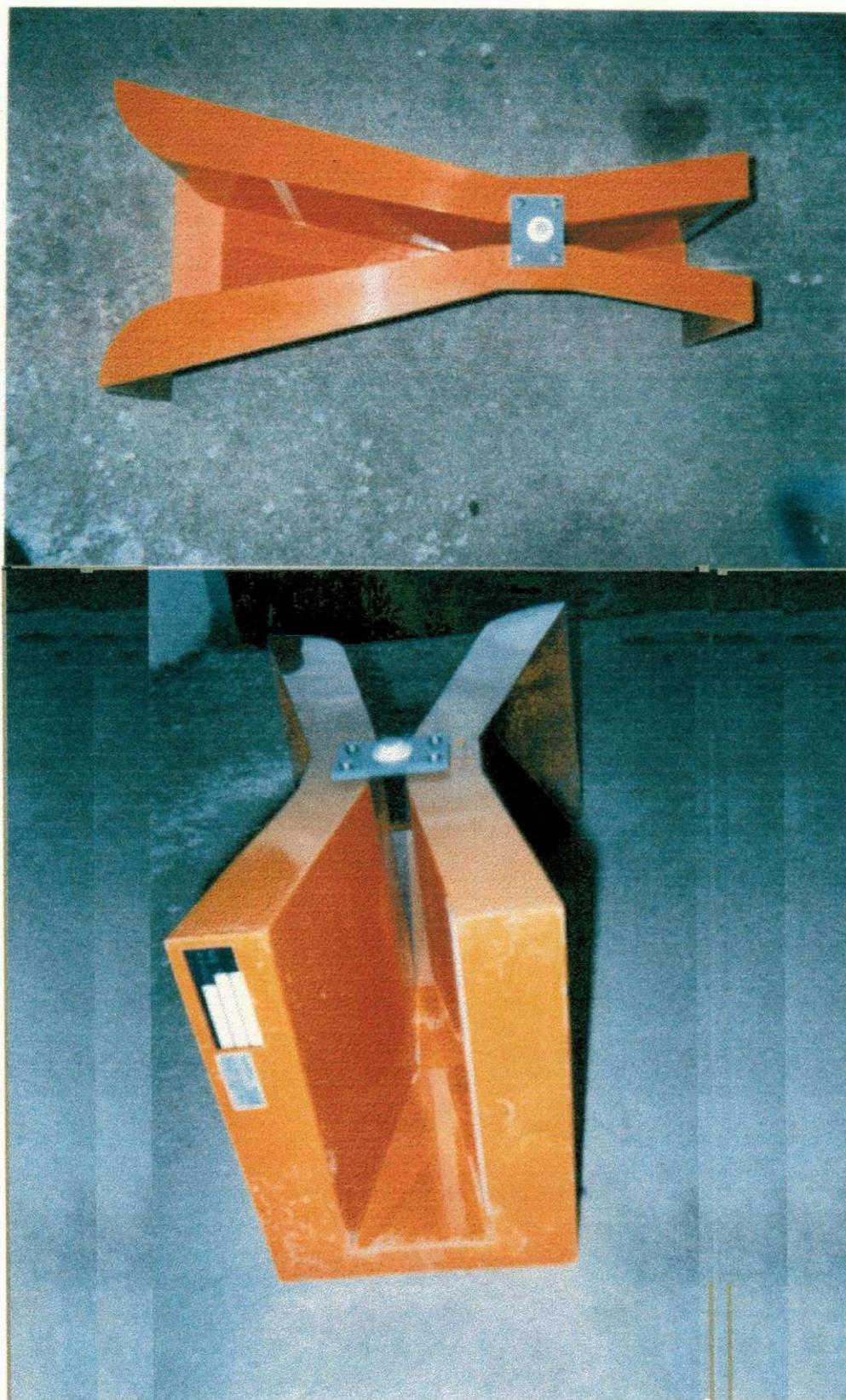


FIGURA 1 - Ilustração da Calha Parshall H-26-1 utilizada nas medições de vazão

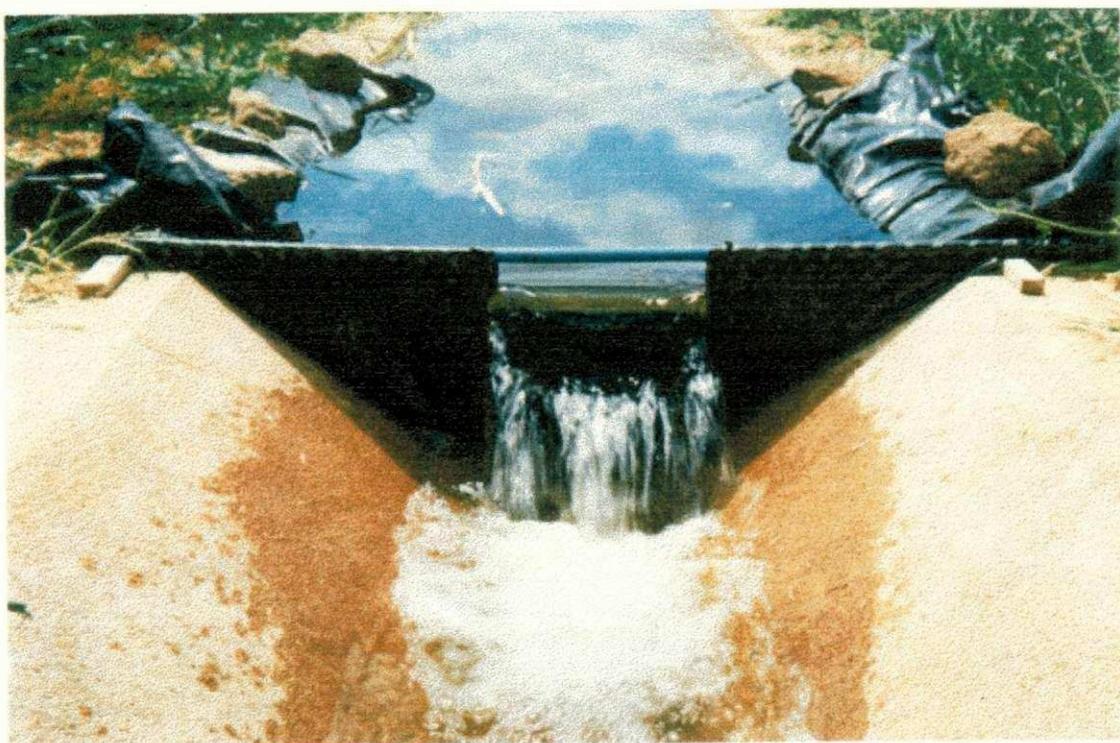


FIGURA 2 - Vertedor para manutenção da carga hidráulica constante

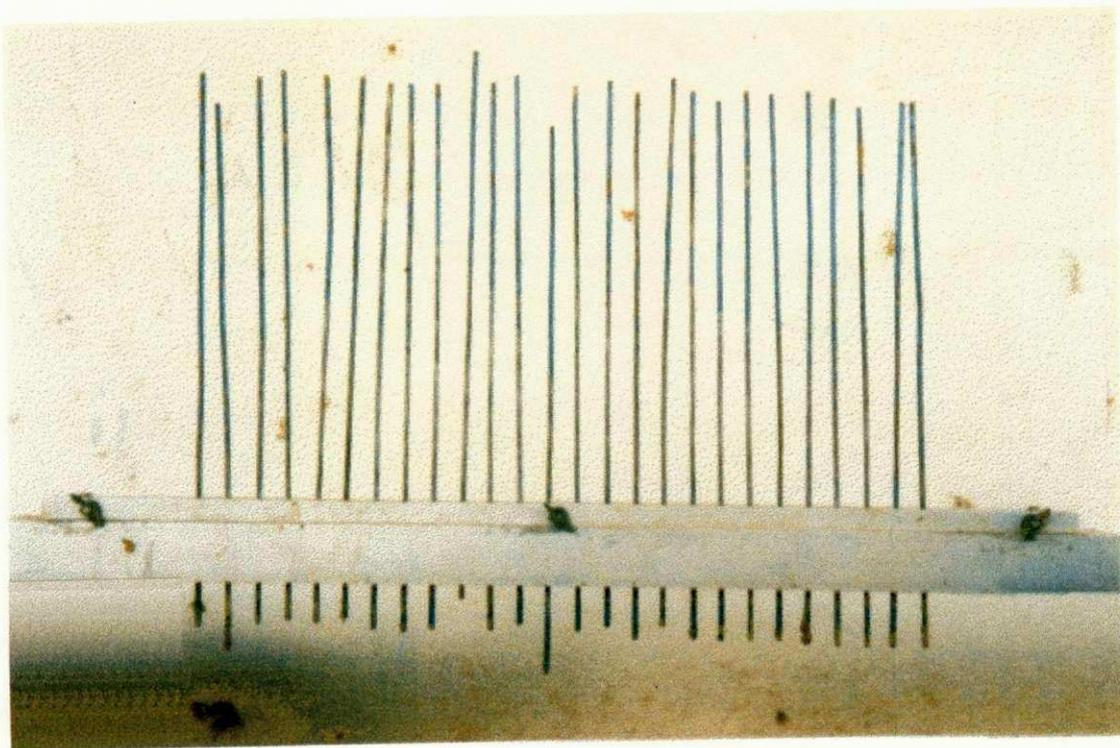


FIGURA 3 - Ilustração do Perfilômetro

Características de infiltração

As características de infiltração d'água no solo foram determinadas a partir de dados do avanço medido, utilizando-se o modelo matemático computacional SIRTOM desenvolvido por AZEVEDO (1992). O SIRTOM descreve as características de infiltração conforme KOSTIAKOV-LEWIS (Equação 06). Os parâmetros de infiltração foram, então, determinados através de sucessivas tentativas de ajuste do avanço simulado ao avanço medido.

Fase de avanço

Para medição da fase de avanço, foram colocadas estacas ao longo do sulco, em intervalos de 10 metros, e cronometrado o tempo gasto pela água para atingir cada estaca.

Parâmetros de avaliação

A avaliação do sistema obedeceu o procedimento apresentado por WALKER e SKOGERBOE (1987), tendo como base a eficiência de aplicação, as taxas de percolação e escoamento, a uniformidade de distribuição, e a eficiência de armazenamento. O procedimento é descrito a seguir:

Eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação é a relação entre o volume de água armazenado na zona radicular e o volume de água total aplicado na parcela:

$$Ea = (Var/Va) \times 100 \quad (19)$$

onde E_a é a eficiência de aplicação, em %; V_{ar} é o volume de água armazenado na zona radicular, em m^3 ; e V_a é o volume de água total aplicado na parcela em m^3 .

Taxa de percolação

As perdas por percolação foram obtidas a partir do perfil de infiltração, pela relação entre volume de água percolado e volume total de água aplicado:

$$TP = (V_p/V_a) \times 100 \quad (20)$$

onde TP é a taxa de percolação, em %; V_p é o volume de água percolado, em m^3 ; e V_a é o volume total de água aplicado, em m^3 .

O volume total de água aplicado foi calculado a partir do hidrográfico de fluxo

Taxa de escoamento

A perdas por escoamento no final do sulco foram obtidas a partir da seguinte relação:

$$TE = 100 - E_a - TP \quad (21)$$

onde TE é a taxa de escoamento superficial, em %; E_a é a eficiência de aplicação, em %; e TP é a taxa de percolação, em %.

Uniformidade de distribuição

A uniformidade de distribuição de água, ao longo do sulco, é definida pela relação entre a lâmina média infiltrada nos 25% da área menos favorecida e a lâmina média em toda a área:

$$UD = (Z_{25\%} / Z_{100\%}) \times 100 \quad (22)$$

onde UD é a uniformidade de distribuição, em %; $Z_{25\%}$ é a lâmina média infiltrada nos 25% da área menos favorecida, em mm; $Z_{100\%}$ é a lâmina média em toda a área, em mm. Estes valores foram obtidos a partir do perfil de infiltração.

Eficiência de armazenamento

A eficiência de armazenamento é a relação entre o volume de água armazenado na zona radicular e o volume de água máximo armazenável na zona radicular:

$$Ear = (Var/Vmar) \times 100 \quad (23)$$

onde Ear é a eficiência de armazenamento, em %; Var é o Volume de água armazenado na zona radicular, em m³; Vmar é o Volume de água máximo armazenável na zona radicular, em m³. Esses volumes foram determinado a partir do perfil de infiltração. Eles foram multiplicados pelo espaçamento entre sulcos devido estarem representando um volume por unidade de largura.

Parâmetros operacionais

A vazão de entrada e o tempo de aplicação foram ajustados em cada evento de irrigação, para compensar as variações temporal e espacial nos parâmetros de campo, principalmente nas características de infiltração. Isto resultou num monitoramento da fase de avanço e, conseqüentemente, da performance do sistema ao longo da estação de cultivo. As características de infiltração do próximo evento de irrigação foram considerados idênticas às do evento anterior, para efeito de cálculo do tempo de oportunidade de infiltração requerido. O tempo de aplicação d'água foi definido durante cada evento de irrigação por ocasião do término da fase de avanço. A vazão de entrada foi alterada em cada evento de irrigação, tendo como base as perdas por percolação e escoamento ocorridas no evento anterior.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados do projeto

A análise granulométrica e a classificação textural do solo apresenta-se na TABELA 2.

TABELA 2 - Distribuição do tamanho das partículas e classificação textural

Profundidade (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
0-30	42,08	36,04	21,08	franco
30-60	43,10	32,77	24,13	franco

Observa-se que o solo apresenta, nas profundidades estudadas, a mesma classificação textural, que foi franco. As percentagens de areia e argila aumentaram com a profundidade, enquanto que a de silte diminuiu. Os valores da capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade real, densidade aparente e porosidade são mostrados na Tabela 3.

Observa-se na Tabela 3 que os valores da densidade aparente e real aumentaram com a profundidade, indicando a presença de horizonte coeso. Os valores da capacidade de campo praticamente não cresceram com a profundidade e os valores do ponto de murcha permanente praticamente não variaram significativamente. Os valores da porosidade diminuíram com a profundidade.

TABELA 3 - Características físico-hídricas do solo

Profundidade (cm)	Capacidade de campo (%)	Ponto de murcha (%)	Densidade		Porosidade	
			Real (g/cm ³)	Aparente (g/cm ³)	Total (%)	Drenável (%)
0-30	20,62	10,86	2,49	1,30	47,79	27,17
30-60	20,65	10,44	2,56	1,41	44,92	24,27

A Tabela 4 apresenta os dados do projeto de irrigação por sulcos.

TABELA 4 - Dados do projeto de irrigação por sulcos

Classificação textural	Franco
Declividade da superfície	0.2%
Rugosidade da superfície	0.04
Largura da área	215m
Comprimento dos sulcos	80.65m
Espaçamento dos sulcos	1.15m
¹ NS ²	62
Vazão disponível ao projeto	2.7 m ³ /min
Duração da vazão disponível ao projeto	3 dias a cada semana
Vazão máxima não erosiva	1.22 l/s
Frequência de irrigação	7 dias
Vazão de entrada ¹	1.02 l/s
Regime de fluxo	Contínuo
Tempo de aplicação de água nos sulcos ¹	240 min.
Tempo total de irrigação	720 min.

1 - Valores obtidos no dimensionamento do sistema

2 - Número de sulcos funcionando simultaneamente

Hidrográfico de fluxo

As Figuras 4 a 15 apresentam os hidrográficos de fluxo para cada evento de irrigação. Observa-se que a vazão de entrada demorou pouco tempo para estabilizar-se. As variações na aplicação d'água no início do evento de irrigação são devidas às variações da carga hidráulica no canal, que, geralmente, ocorrem logo quando os sifões são introduzidos no canal. Na maioria dos eventos (Figs. 6 a 15), a vazão de entrada estabilizou-se antes dos 10 minutos de aplicação d'água, o que é um tempo bastante razoável. No quarto evento ocorreu uma pequena variação da vazão mesmo após sua estabilização. Isto ocorreu devido a presença momentânea de folhas no canal que obstruiu a seção de escoamento do sifão. Isto mostra a importância da medição contínua, através de calhas, da aplicação d'água no sulco. No primeiro e no segundo eventos o tempo de estabilidade foi, respectivamente, 39 e 14 minutos.

A vazão de saída, no primeiro e do sexto ao décimo segundo eventos de irrigação (Fig 4 e Figs. 9 a 15), tornou-se constante basicamente aos 100 minutos após o início da irrigação, tempo no qual, evidentemente, o solo atingiu sua infiltração básica. Nesses eventos de irrigação o tempo de aplicação foi de 161 a 240 minutos. Do segundo ao quarto evento (Figs. 5 a 7), como o tempo de aplicação foi bem menor (foi no máximo 67 minutos) que no primeiro e do sexto ao décimo segundo eventos, deu apenas para verificar-se uma tendência de estabilização da vazão de saída, que foi confirmada no quinto evento (Fig. 8) onde o tempo de aplicação foi bem superior (130 minutos). Assim sendo, do segundo ao quinto evento o solo atingiu sua velocidade de infiltração básica em média aos 57 minutos após o início da aplicação d'água, correspondendo

aproximadamente à metade do tempo necessário no primeiro e do sexto ao décimo segundo eventos. Acredita-se que essa variação no tempo necessário para atingir a velocidade de infiltração básica seja devido a alterações em sua estrutura. No primeiro evento devido ao preparo do solo sua estrutura era favorável à infiltração d'água. Do segundo ao quinto eventos suapõe-se que houve uma degeneração da estrutura do solo devido a acomodação de suas partículas. Do sexto ao décimo segundo eventos houve uma melhoria na estrutura devido ao desenvolvimento pleno do sistema radicular. Conclui-se, então, que o tempo de aplicação em todos os eventos de irrigação foi suficiente para o solo atingir sua velocidade de infiltração básica. HART (1975), no entanto deparou-se com situações onde o tempo de aplicação foi insuficiente para o solo atingir sua velocidade de infiltração básica.

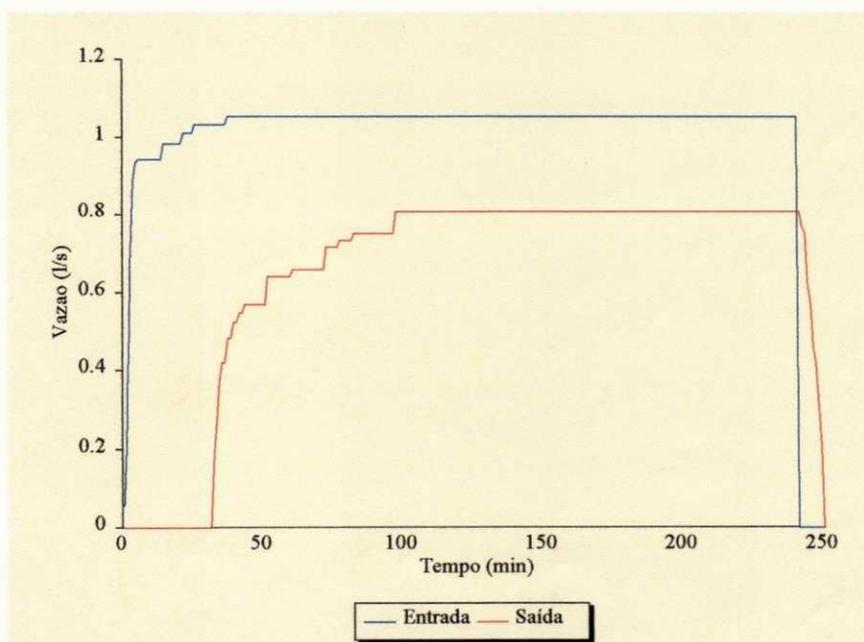


FIGURA 4 - Hidrográfico de fluxo para o primeiro evento de irrigação

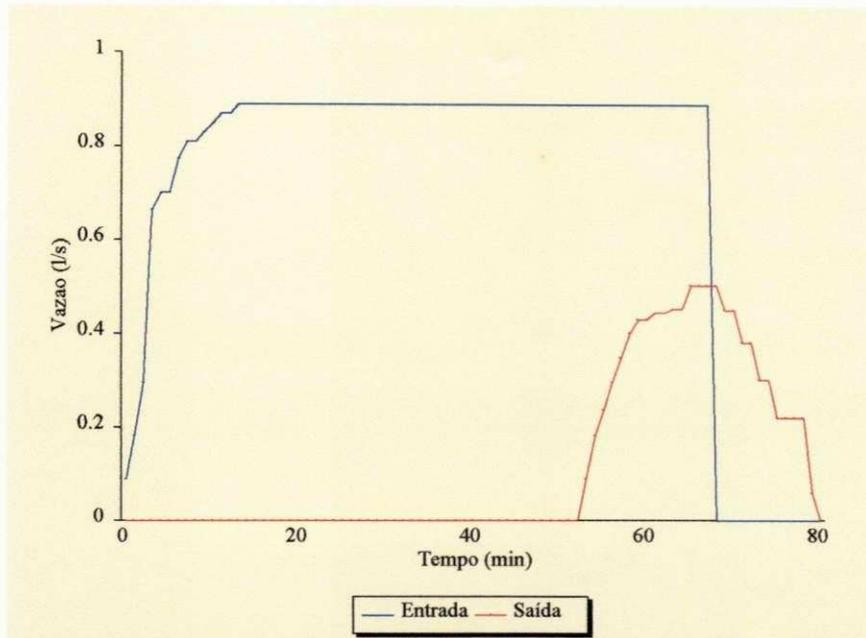


FIGURA 5 - Hidrográfico de fluxo para o segundo evento de irrigação

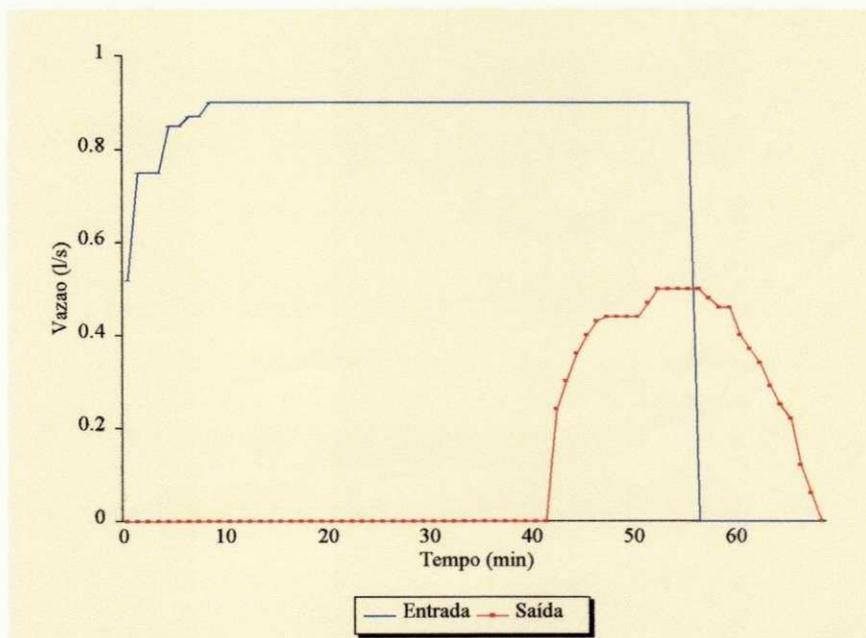


FIGURA 6 - Hidrográfico de fluxo para o terceiro evento de irrigação

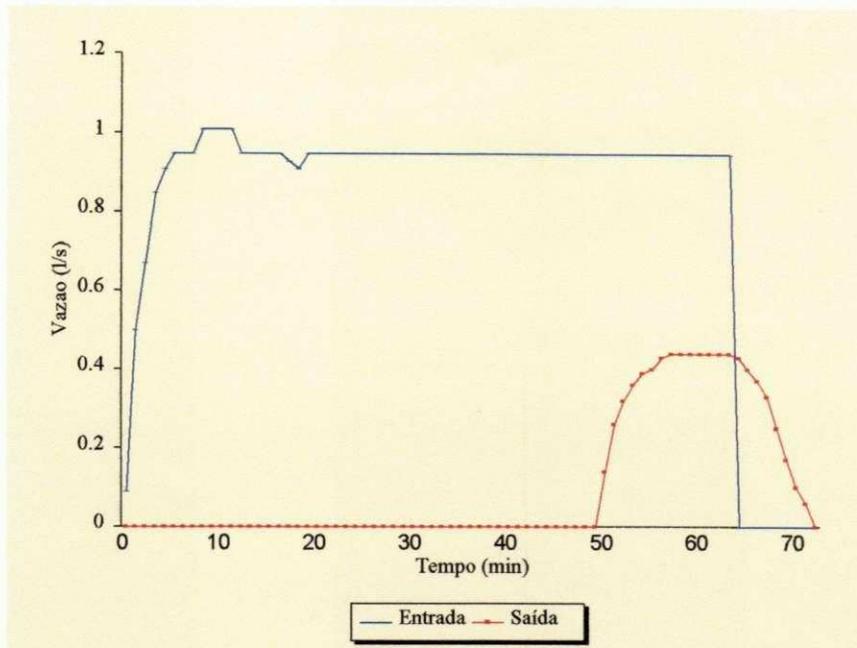


FIGURA 7 - Hidrográfico de fluxo para o quarto evento de irrigação

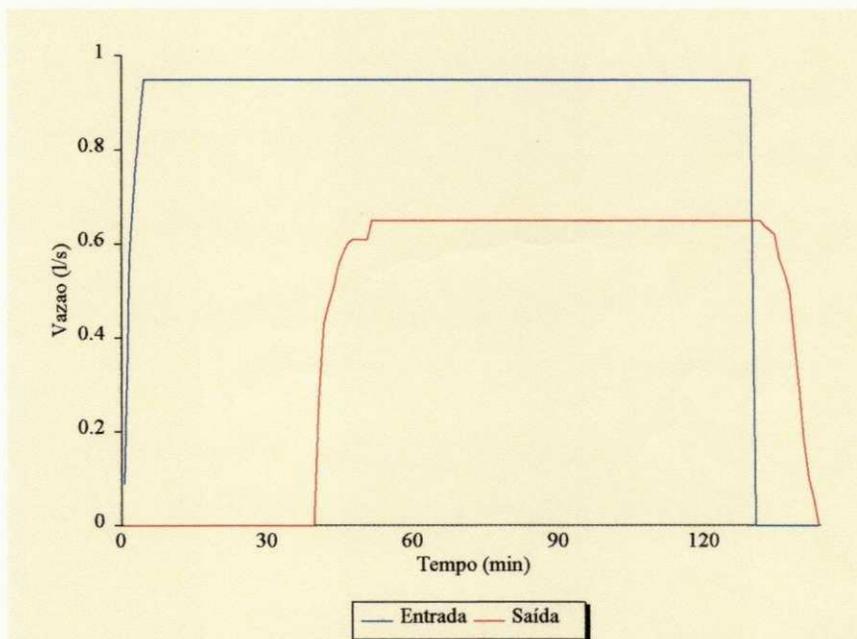


FIGURA 8 - Hidrográfico de fluxo para o quinto evento de irrigação

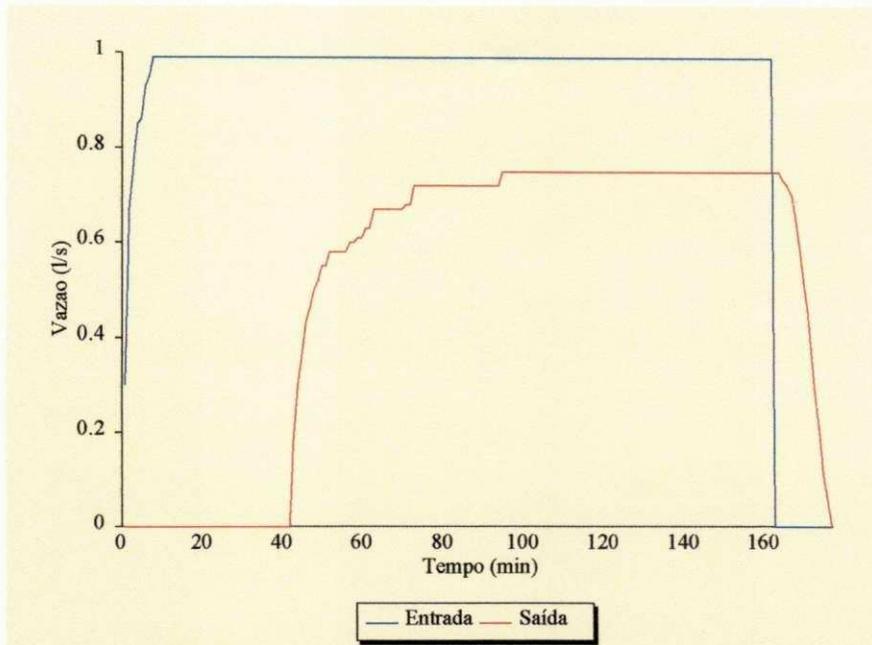


FIGURA 9 - Hidrográfico de fluxo para o sexto evento de irrigação

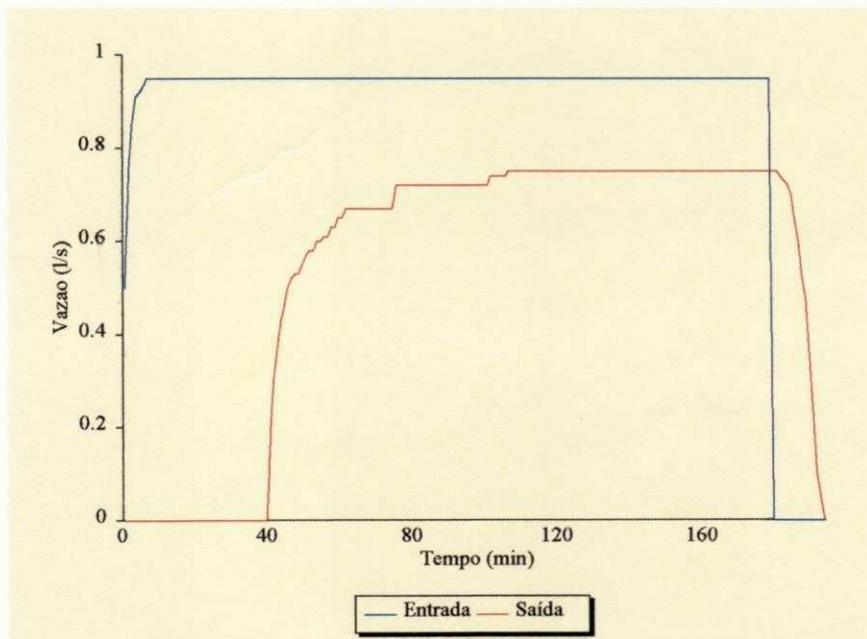


FIGURA 10 - Hidrográfico de fluxo para o sétimo evento de irrigação

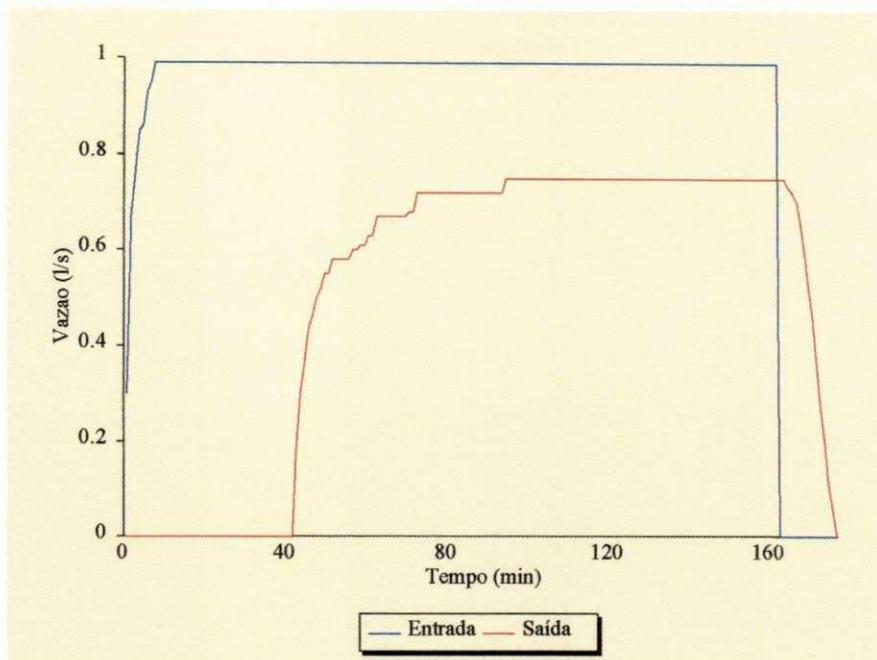


FIGURA 11 - Hidrográfico de fluxo para o oitavo evento de irrigação

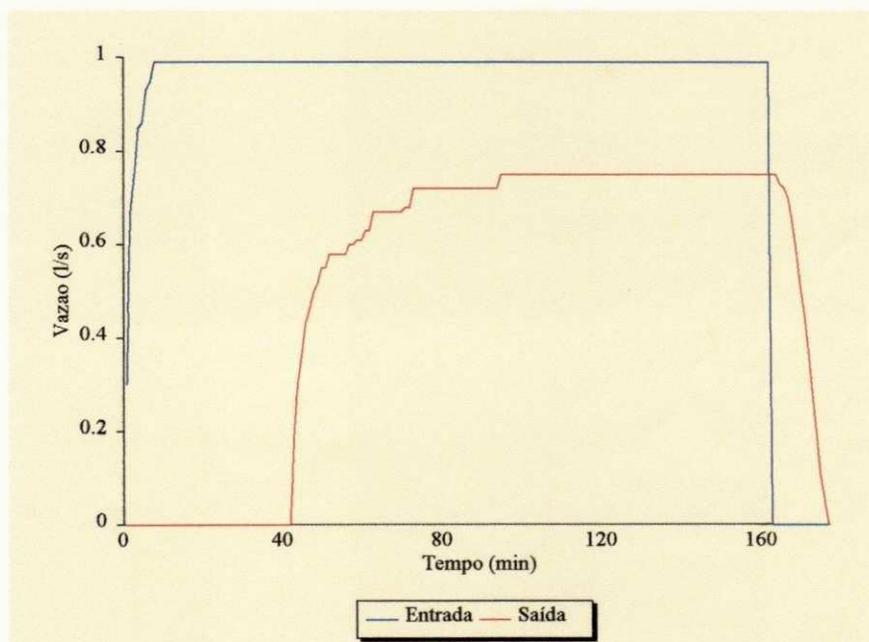


FIGURA 12 - Hidrográfico de fluxo para o nono evento de irrigação

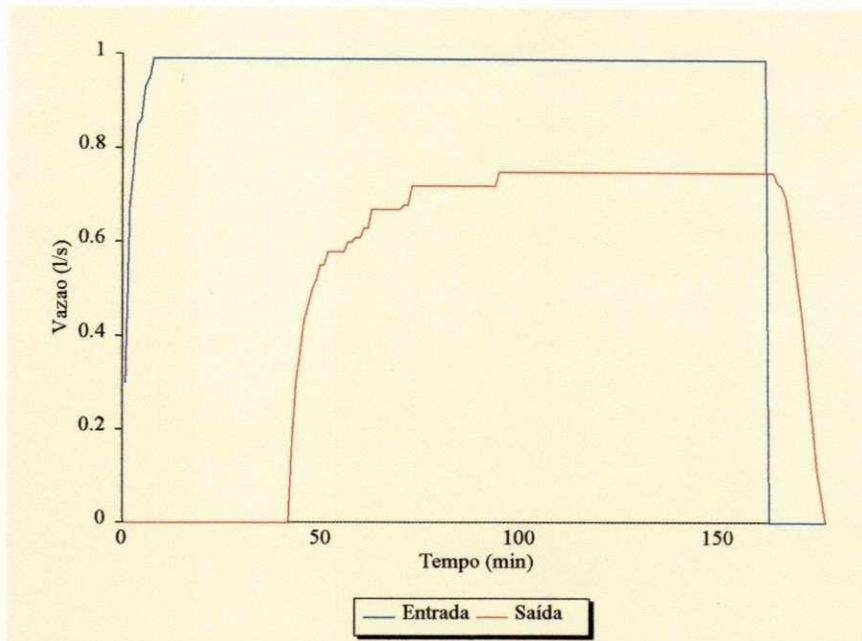


FIGURA 13 - Hidrográfico de fluxo para o décimo evento de irrigação

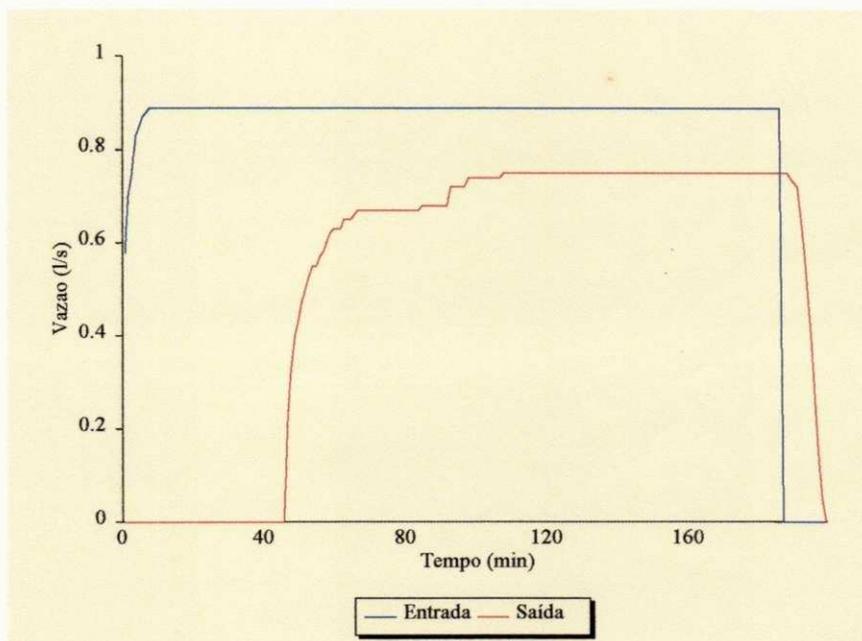


FIGURA 14 - Hidrográfico de fluxo para o décimo primeiro evento de irrigação

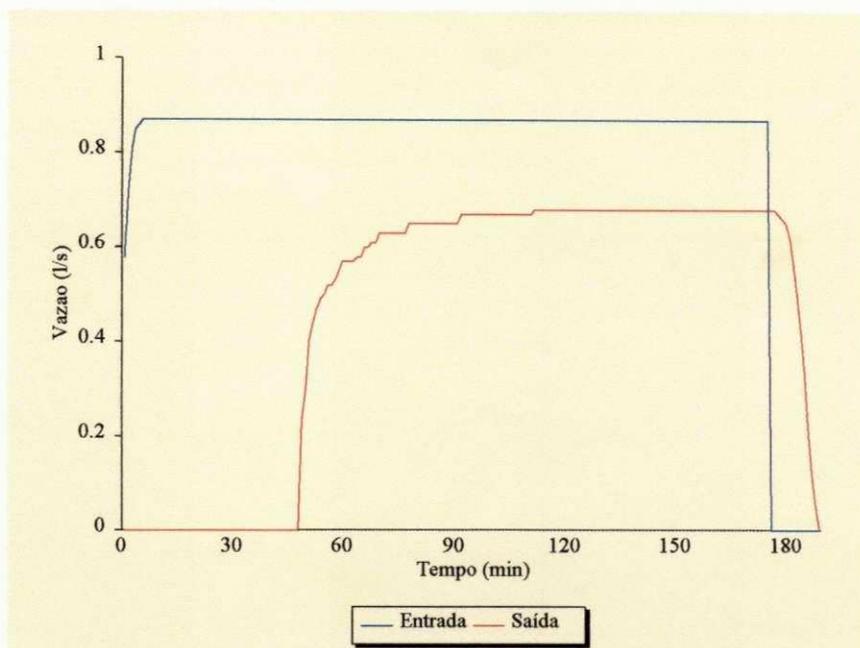


FIGURA 15 - Hidrográfico de fluxo para o décimo segundo evento de irrigação

A Tabela 5 apresenta, para cada evento de irrigação, a vazão de entrada e de saída determinadas a partir do hidrográfico de fluxo

A vazão de entrada teórica foi determinada a partir de uma análise das perdas por percolação e por escoamento ocorridas em cada evento anterior, tendo em vista uma melhoria da performance do sistema nos eventos subsequentes. A vazão de entrada teórica para o primeiro evento correspondeu ao valor determinado no dimensionamento do sistema. A partir da curva do sifão, foi determinada uma carga hidráulica para cada vazão teórica. Comparando-se as vazões de entrada teóricas com as vazões de entrada medidas, verifica-se que na grande maioria dos eventos não conseguiu-se aplicar a vazão desejada (chamada de teórica). As dificuldades para tal empreendimento estão nas imprecisões no estabelecimento da carga hidráulica, como também em sua eventual variação ao longo do tempo de aplicação d'água. A última coluna da Tabela 5 apresenta o percentual de escoamento superficial em relação à vazão de entrada que será discutido posteriormente.

TABELA 5 - Vazão de entrada e de saída para cada evento de irrigação

eventos de irrigação	Vazão de entrada (Qe) (l/s)		Vazão de saída (Qs) (l/s)	Qs/Qe
	Qet	Qem		
1	1.22	1.02	0.76	0.74
2	0.85	0.84	0.21	0.25
3	0.95	0.90	0.32	0.34
4	0.95	0.96	0.50	0.53
5	1.00	1.00	0.60	0.60
6	0.95	0.98	0.68	0.69
7	0.95	0.95	0.66	0.69
8	0.80	0.85	0.62	0.73
9	0.85	0.90	0.63	0.70
10	0.85	0.89	0.67	0.75
11	0.85	0.89	0.65	0.73
12	0.85	0.87	0.61	0.70

Qet - Vazão de entrada teórica

Qem - Vazão de entrada medida

Perfilometria dos sulcos

As Figuras 16 a 25 apresentam a variação espacial e temporal da seção de fluxo dos sulcos. A partir destas figuras foram elaboradas as Tabelas 6, 7 e 8. As áreas na tabela 6 foram determinadas através de planimetria. Observa-se que a seção de fluxo apresenta uma geometria irregular com tendência a uma forma parabólica. LOPEZ (1975) e OLLITA (1978) também identificaram sulcos com essa geometria. Verifica-se na tabela 6 que a

seção de fluxo do sulco variou tanto ao longo do sulco como ao longo da estação de cultivo. A variação espacial, apresentando uma média dos eventos igual a 72%, com um coeficiente de variação de 45%, foi mais acentuada que a variação temporal que apresentou uma média ao longo do sulco igual a 59%, com um coeficiente de variação de 21,5%. Observa-se que as variações espaciais foram, em geral, diminuindo ao longo da estação de cultivo com uma tendência de estabilização a partir do quinto evento de irrigação. As variações espaciais máxima (94%) e mínima (49%) ocorreram, respectivamente, no primeiro e no último eventos. Entretanto, as variações temporais ao longo do sulco, quase que sistematicamente, tanto diminuíram como aumentaram, não exibindo, então, uma tendência predominante. A maior variação temporal (92%) foi verificada nos primeiros vinte metros, que correspondem a 25% do comprimento total do sulco. Provavelmente, isto ocorreu, em grande parte, devido a maiores velocidades d'água no início do sulco, apesar da vazão aplicada ter sido sempre menor que a erosiva. Nos últimos 21 metros de sulco, a variação temporal tendeu a estabilizar-se.

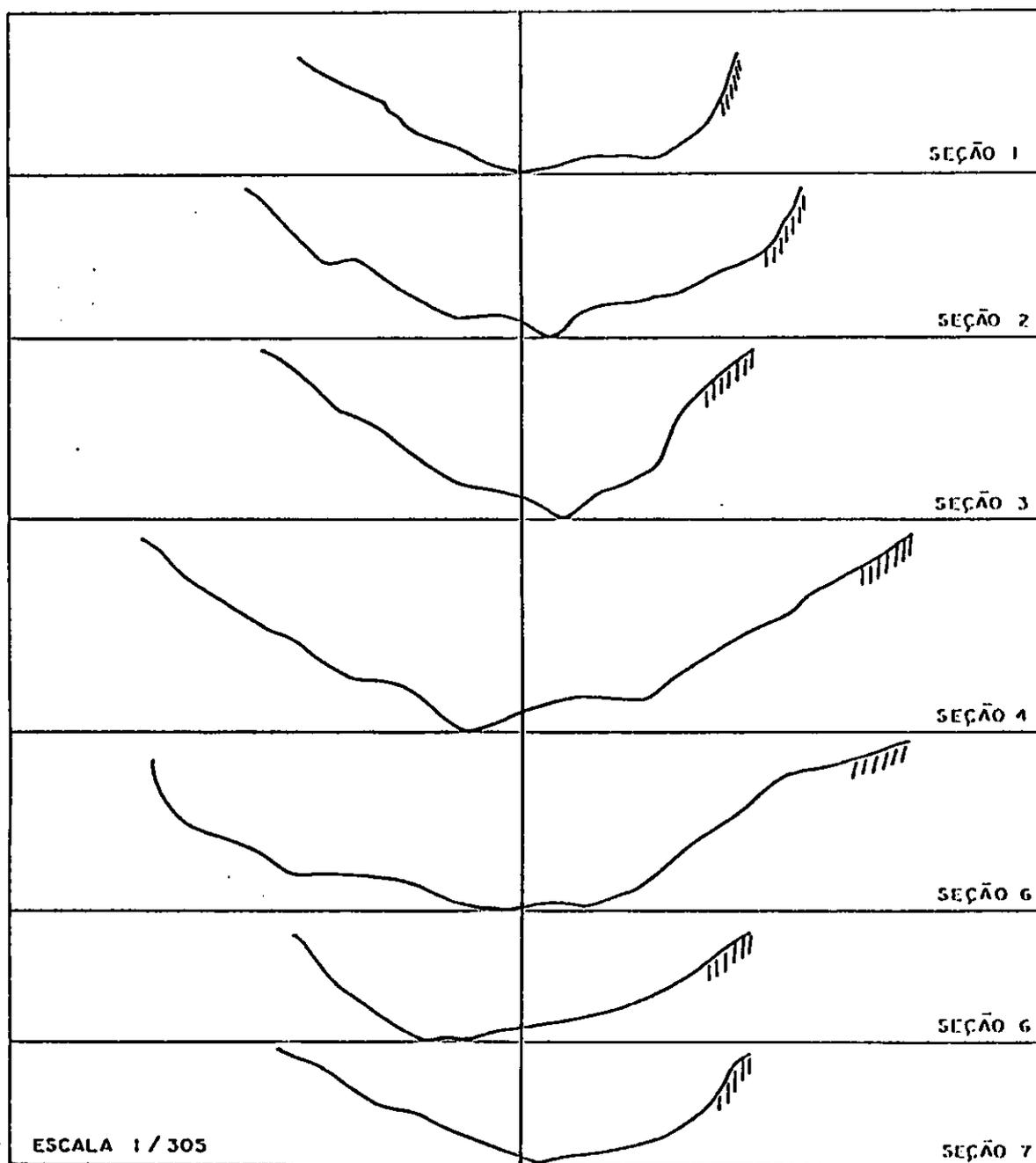


FIGURA 16 - Variação espacial da seção de fluxo para o primeiro evento de irrigação.

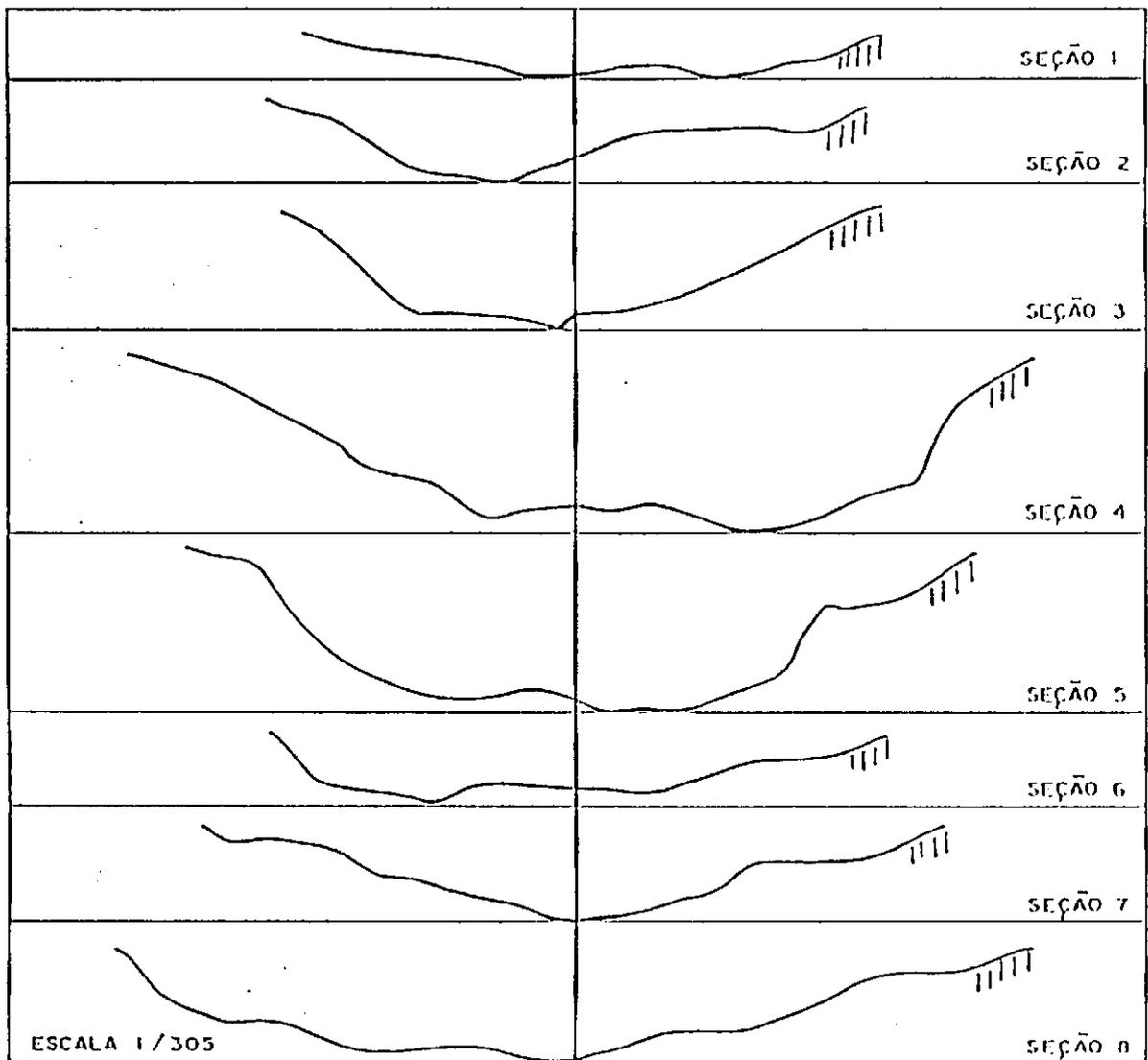


FIGURA 17 - Variação espacial da seção de fluxo para o segundo evento de irrigação.

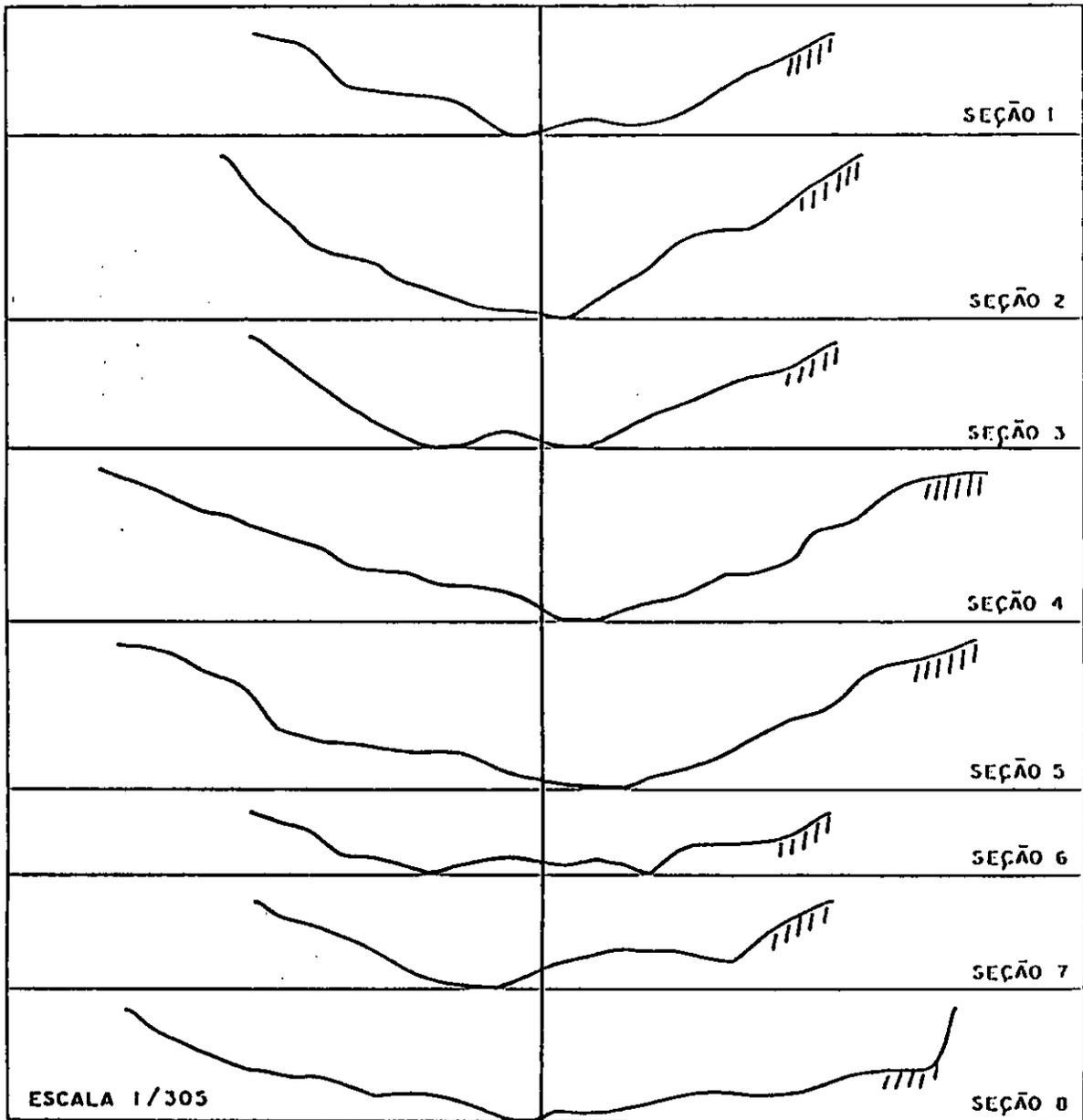


FIGURA 18 - Variação espacial da seção de fluxo para o terceiro ovento de irrigação.

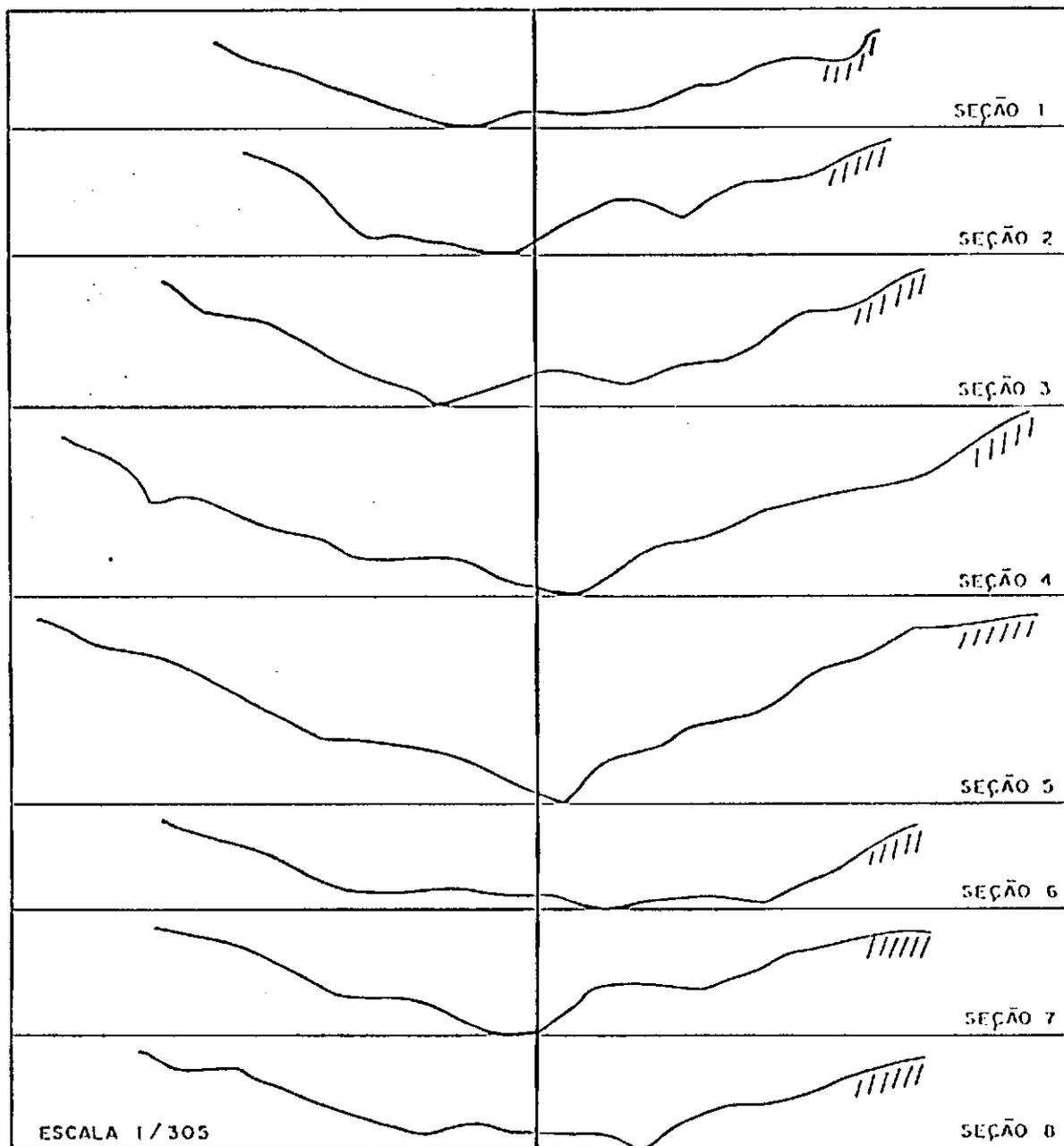


FIGURA 19 - Variação espacial da seção de fluxo para o quarto evento de irrigação.

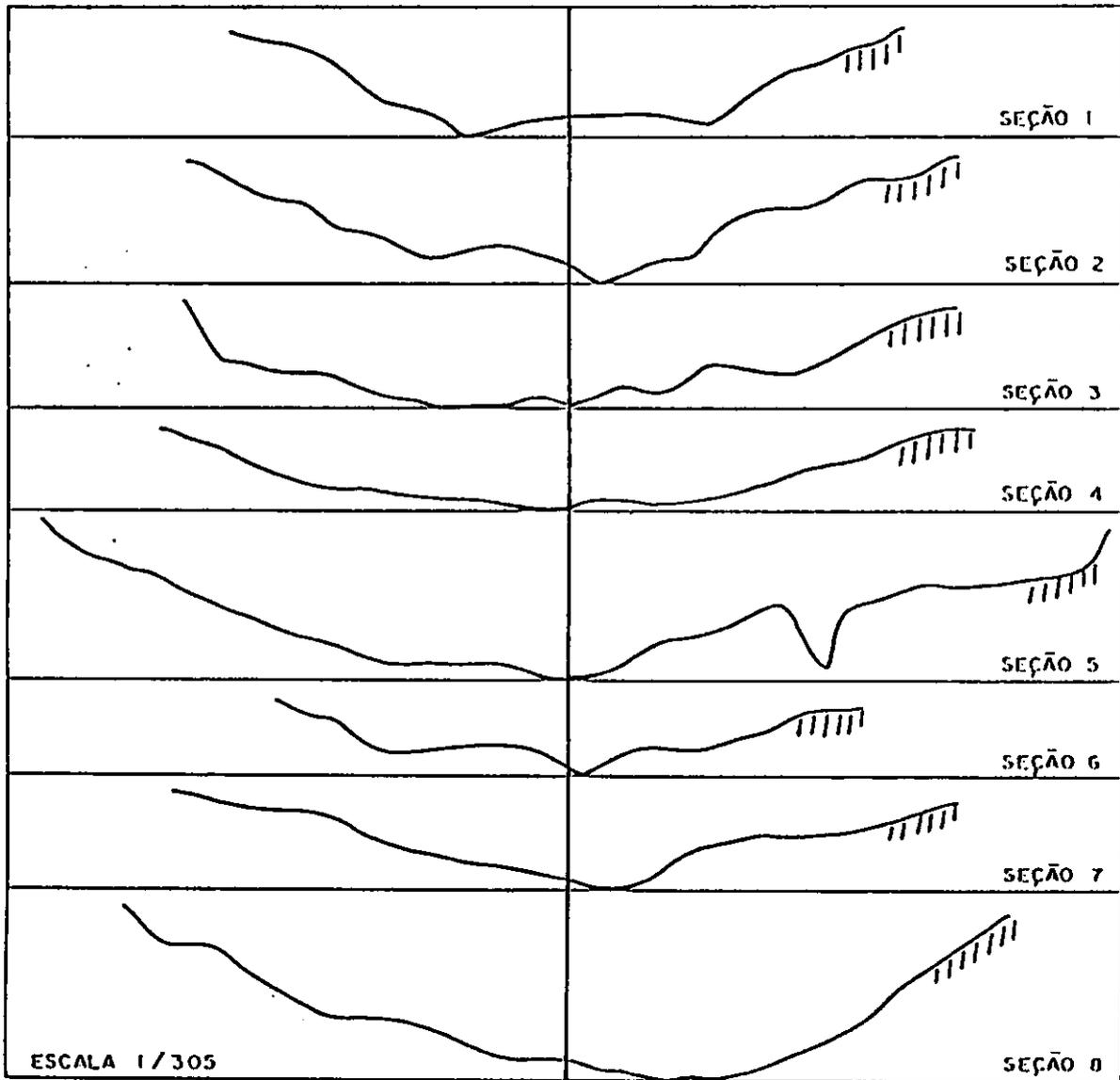


FIGURA 20 - Variação espacial da seção de fluxo para o quinto evento de irrigação.

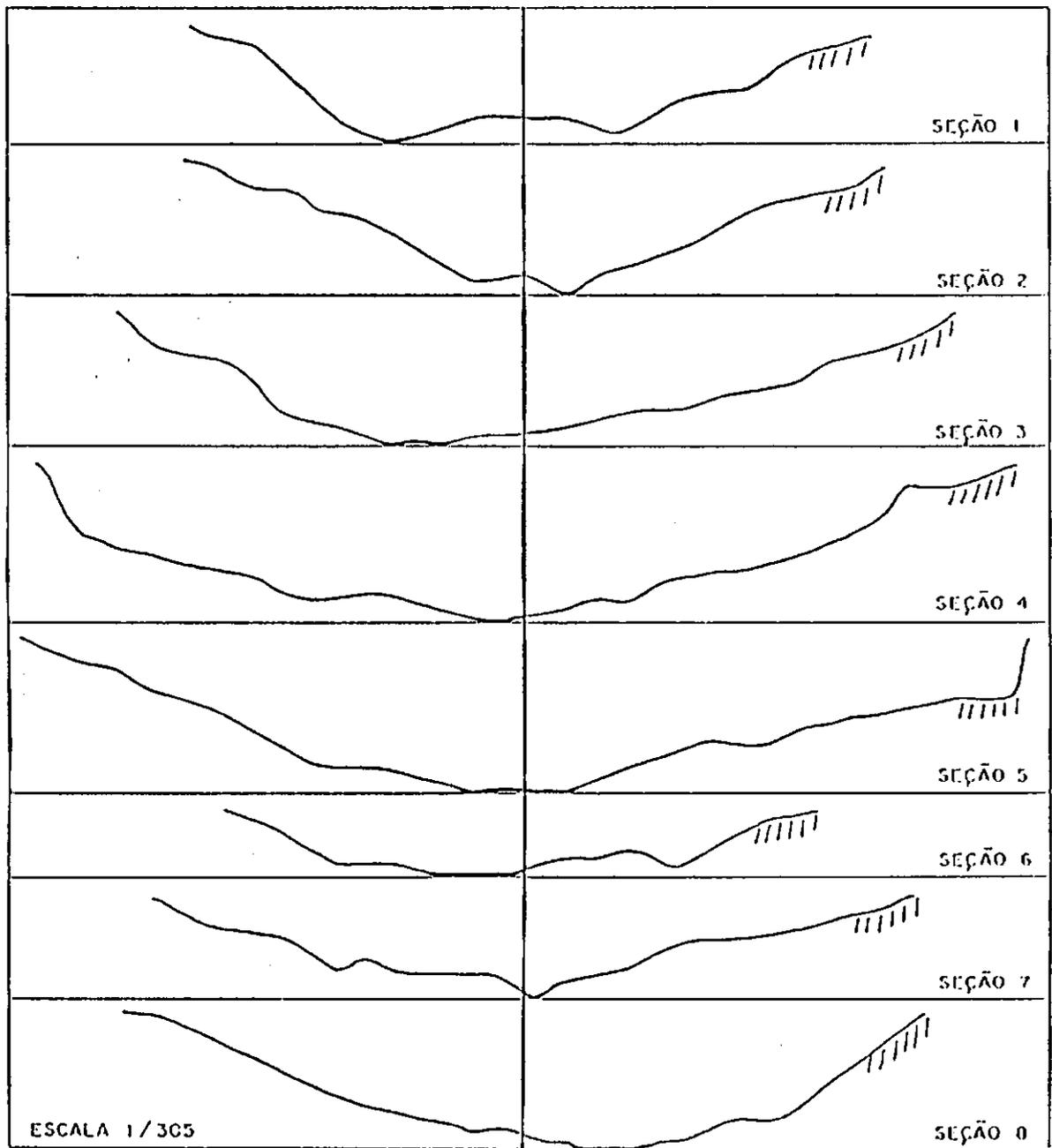


FIGURA 21 - Variação espacial da seção de fluxo para o sexto evento de irrigação.

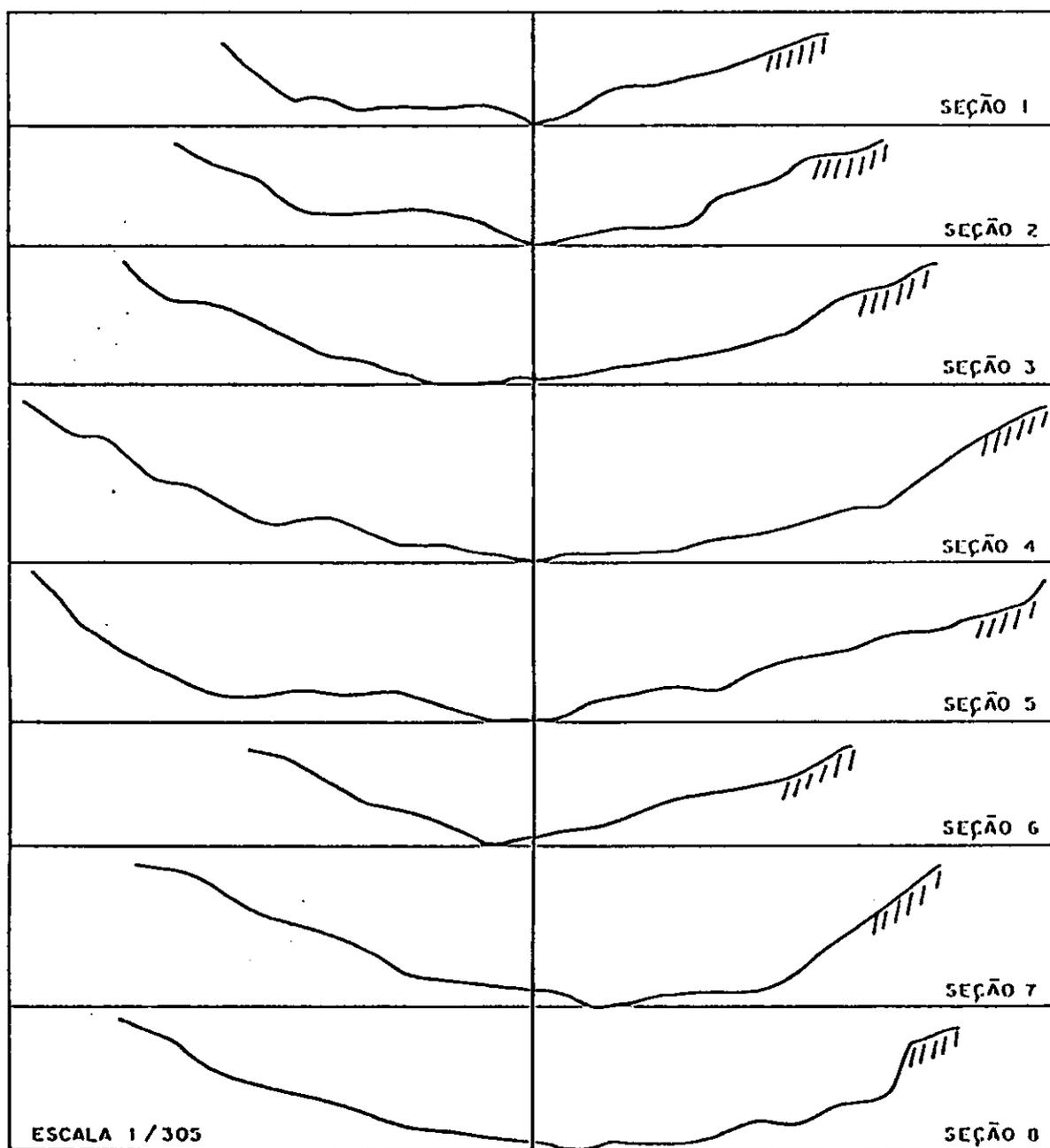


FIGURA 22 - Variação espacial da seção de fluxo para o sétimo evento de irrigação.

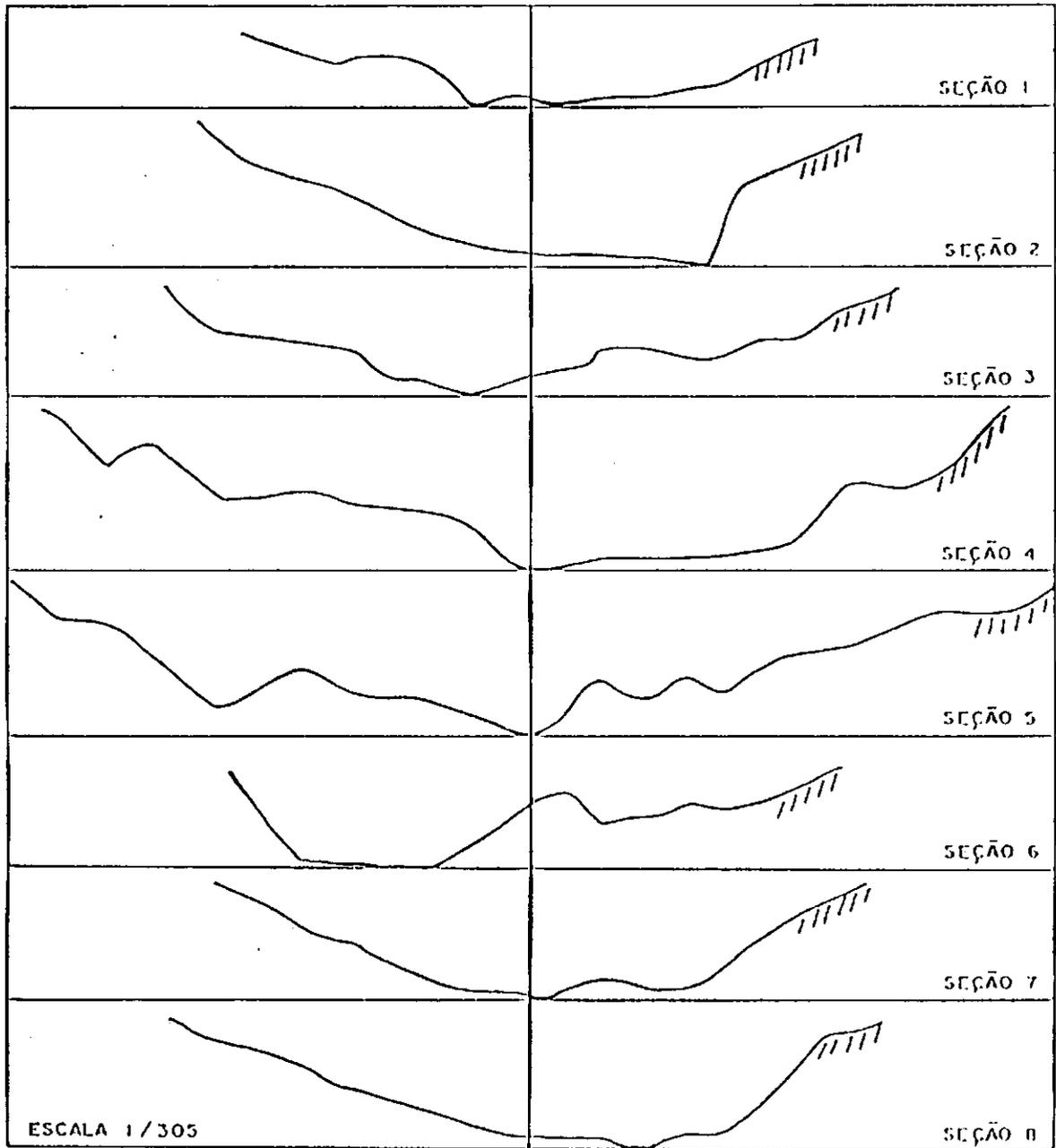


FIGURA 23 - Variação espacial da seção de fluxo para o oitavo evento de irrigação.

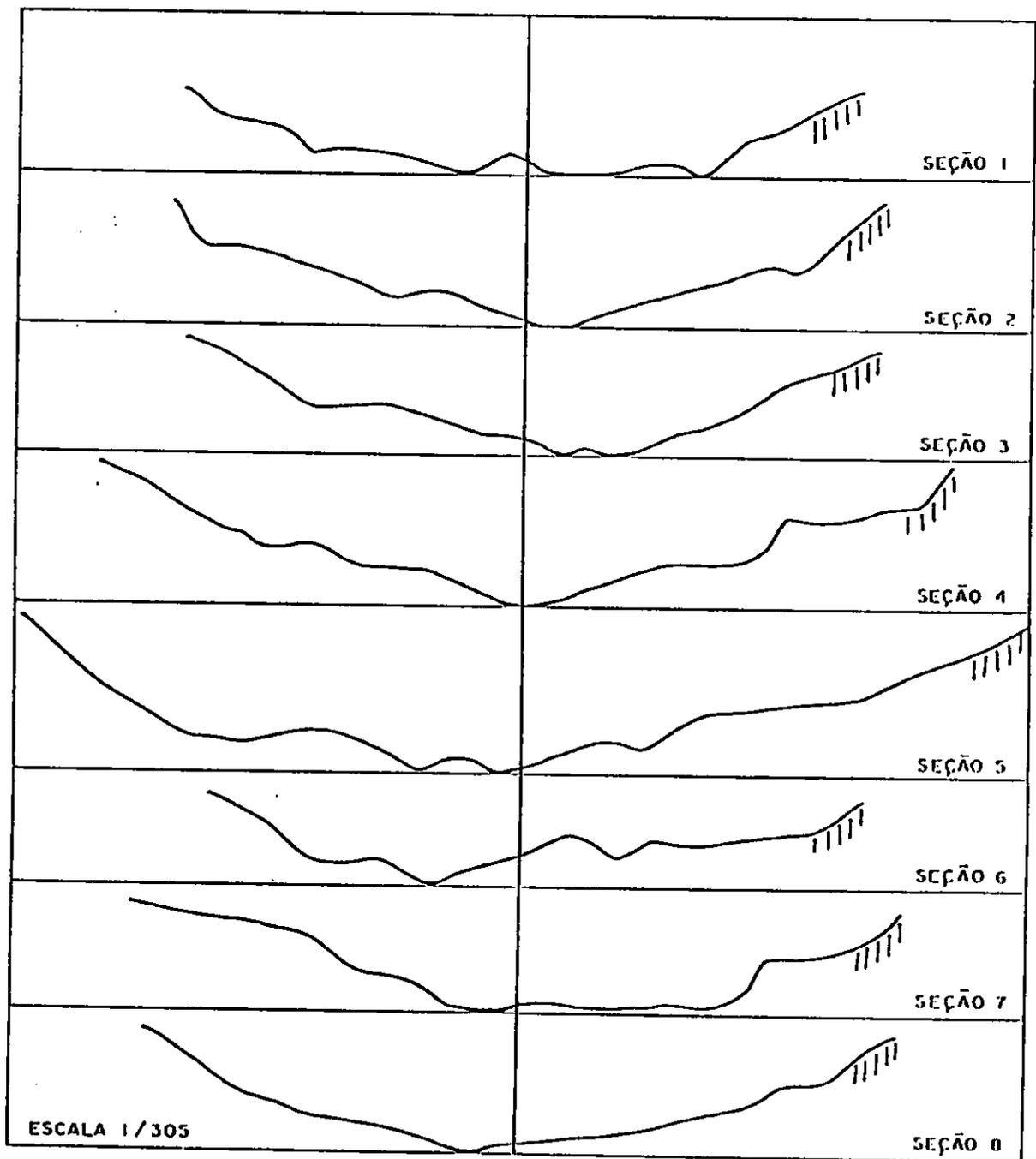


FIGURA 24 - Variação espacial da seção de fluxo para o nono evento de irrigação.

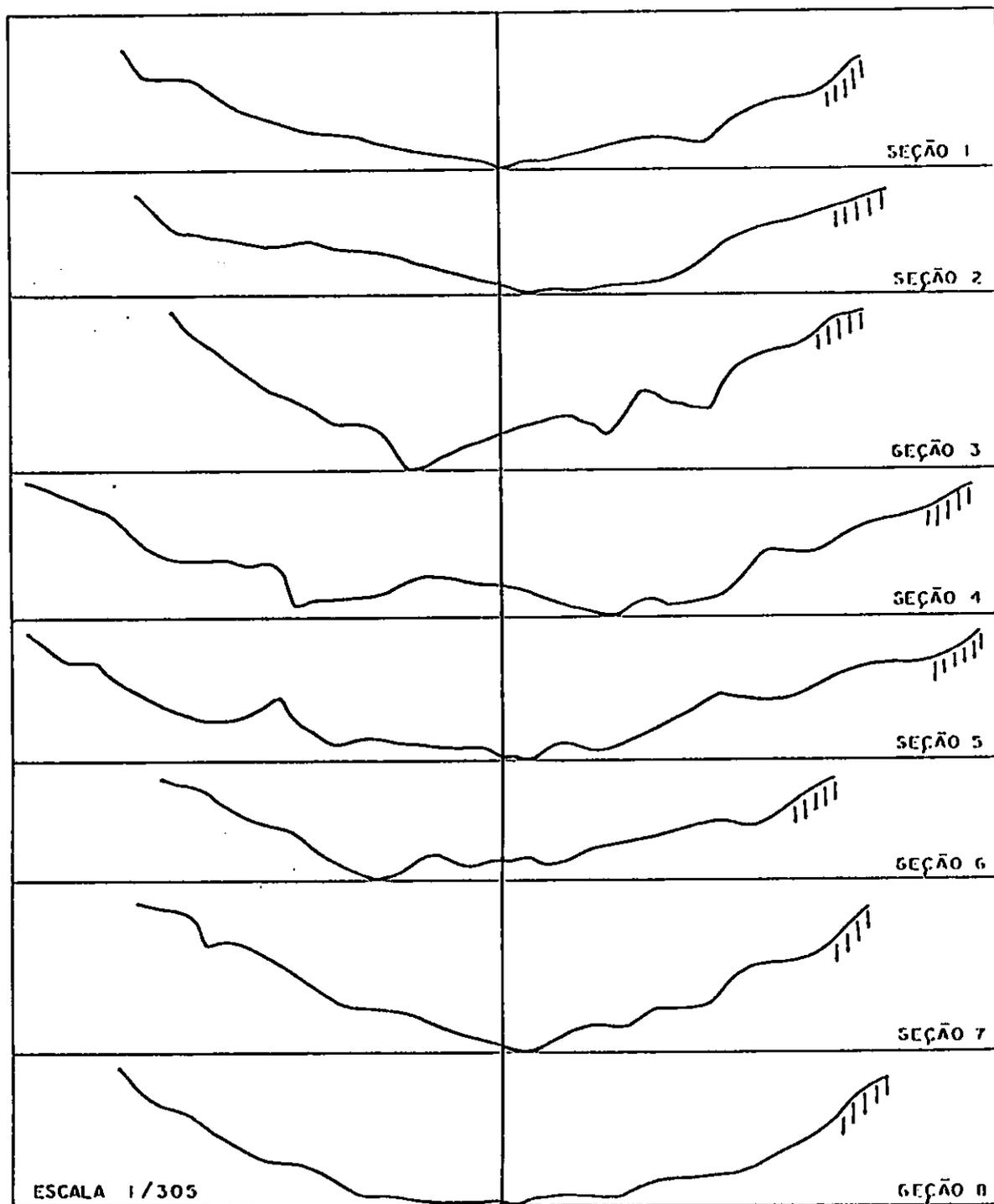


FIGURA 25 - Variação espacial da seção de fluxo para o décimo evento de irrigação.

TABELA 6 - Área (cm²) da seção de fluxo ao longo do sulco e ao longo da estação de cultivo

Eventos de irrigação	Distância (m) ^a								Média espacial	Variação espacial (%)	Coeficiente de variação (%)
	10	20	30	40	50	60	70	80.65			
1	72	10	98	180	180	69	70	-	97	94	64
2	32	41	73	165	147	47	63	117	86	81	59
3	64	125	79	134	146	46	59	125	97	68	40
4	74	78	117	193	178	91	80	82	112	62	43
5	67	94	100	80	191	40	69	177	102	78	53
6	93	96	131	215	197	51	84	147	127	76	45
7	61	84	126	221	197	76	148	148	133	72	43
8	47	102	98	193	186	65	99	115	113	76	46
9	90	130	104	170	218	78	104	130	128	64	36
10	94	131	135	177	179	92	147	170	141	49	24
Média temporal	69	89	106	173	182	66	92	135	114 ^d	52 ^b	
Variação temporal (%)	66	92	45.6	63.9	33.2	57	60.4	53.3		59 ^c	
Coeficiente de variação (%)	29	44	20	24	12	29	35	22			

a - Distância das seções a partir da seção de entrada

b - Média da variação espacial ao longo da estação de cultivo

c - Média da variação temporal ao longo do sulco

d - Média espacial e temporal da seção de fluxo

Acredita-se que as variações espaciais e temporais na seção de fluxo foram devido aos ajustes nos parâmetros operacionais (vazão e tempo de aplicação), variações nas características de infiltração do solo, degradação física natural da seção transversal, tratos culturais (quinto e sétimo eventos), rearranjo da estrutura do solo e acomodação de sua superfície devido a esses tratos (sexto e oitavo eventos), e alterações na rugosidade da superfície devido, em grande parte, ao surgimento de vegetação (principalmente tiririca) nos sulcos (décimo evento).

TABELA 7 - Média espacial da seção de fluxo dos sulcos para cada evento de irrigação

Eventos de irrigação	Altura máxima (cm)	Largura máxima (cm)	Largura na metade da altura máxima (cm)	Base (cm)
1°	6,8	25,2	17,0	7,6
2°	4,5	29,5	18,2	8,2
3°	5,0	30,2	19,9	5,8
4°	5,7	35,0	21,7	8,3
5°	4,9	33,3	20,9	9,7
6°	5,7	35,7	22,5	9,2
7°	5,5	35,5	25,0	15,8
8°	5,6	33,1	20,6	11,8
9°	5,6	35,2	24,6	13,9
10°	6,0	37,0	24,4	14,8
Média temporal (cm)	5,5	33	21,5	10,5
Variação temporal (%)	33,8	31,9	32,0	63,0

Observa-se na Tabela 7 que a base do sulco foi a dimensão que mais se degradou ao longo do tempo (63% de variação), o que era de se esperar, obviamente, porque as alterações nas demais dimensões contribuem sensivelmente para variações nessa dimensão. A altura máxima e as larguras na altura máxima e na altura correspondente a 50% da altura máxima, praticamente tiveram um mesmo percentual de variação (em torno de 32,6%), evidentemente, porque essas dimensões estão interrelacionadas, isto é, devido à geometria parabólica dos sulcos, a largura de fluxo torna-se função da altura de fluxo. Como a largura de fluxo, ao longo do tempo, depende fundamentalmente da degradação física do sulco, suas variações resultaram num alargamento da seção como um todo. A deposição de material de solo e de restos de vegetais no fundo do sulco, oriunda principalmente de sua degradação física ao longo da estação de cultivo, resultou em variações em sua base tanto crescente como decrescente. A altura de fluxo como depende tanto da degradação física da seção de fluxo, como das variações na vazão, no tempo de aplicação, e nas características de infiltração, tiveram, também, variações crescentes e decrescentes.

Observa-se na Tabela 8 que não ocorreram disparidades gritantes entre as variações, ao longo do sulco, nas quatro dimensões básicas da seção de fluxo, tal como ocorreram ao longo do tempo, onde a base do sulco variou 63% e a variação média nas outras três dimensões ficou em 32,6%. Especialmente, a largura na metade da altura máxima foi a dimensão que mais variou (46,8%) e a média de variação nas demais dimensões foi de 34%. Os valores da altura máxima de fluxo, ao longo do sulco, detectaram variações na seção de fluxo. Por exemplo, nas três primeiras estações onde foram feitas as medições da seção de fluxo (as estações estavam 10m equidistantes), a

altura de fluxo variou, entre as estações, no máximo 2cm. Isto indica variações praticamente insignificantes nesse trecho. Da terceira à quinta estação, a altura máxima aumentou, respectivamente, de 30,9cm para 42,1cm, tendo sido seu incremento máximo de 10cm, que ocorreu da terceira para a quinta estação. Isto demonstra, então, um estreitamento na seção de fluxo no referido seguimento. Da quinta à sexta estação ocorreu uma variação aberrante na altura máxima, que diminuiu 15cm.

TABELA 8 - Média temporal da seção de fluxo dos sulcos para diferentes seções ao longo do sulco. erro?

Distância ¹ (m)	Altura máxima (cm)	Largura máxima (cm)	Largura na metade da altura máxima (cm)	Base (cm)
10	27.52	17.69	4.06	9.78
20	29.95	18.34	6.51	8.46
30	30.90	20.34	5.87	8.59
40	40.50	26.92	7.00	12.08
50	42.09	28.20	7.14	12.09
60	26.91	17.72	3.80	9.99
70	31.22	18.08	5.18	9.51
80.65	35.60	25.34	5.22	13.17
Média espacial	33.08	21.58	5.60	10.46
Variação espacial (%)	34.60	37.27	46.78	30.02

1 - Distância das seções a partir da seção de entrada do sulco

Verifica-se, então, nesses 10m um alargamento na seção de fluxo. Nas três últimas estações, a altura de fluxo foi gradativamente aumentando, tendo ocorrido um incremento

máximo de 5cm da sétima para a oitava estação. Apesar dessas variações elevadas, comparando-se as variações na altura máxima nos primeiros e nos últimos 30m do sulco, pode-se inferir que o tempo de aplicação foi suficiente tanto para estabelecer-se condições de saturação no solo (infiltração básica) como para possibilitar uma duração da fase de armazenamento que garantisse condições de irrigação adequada, ou seja, a lâmina aplicada no final da área igual à requerida.

A média espacial e temporal da seção de fluxo do sulco foi 114cm^2 , apresentando um coeficiente de variação de 45,35% e 21,5% respectivamente. Finalmente, constata-se, então, que as variações tanto espaciais como temporais na seção de fluxo do sulco foram bastante elevadas.

Características de infiltração

A Tabela 9 apresenta os coeficientes da equação de Kostiakov-Lewis para cada evento de irrigação. Os valores fornecidos pelo modelo SIRTOM foram extraídos das tabelas A-1 a A-12 (Apêndice A). Verifica-se na Tabela 9 e na Figura 26 que as variações nos coeficientes da equação de Kostiakov-Lewis ao longo da estação de cultivo, foram relativamente pouco acentuadas. Os coeficientes da equação de Kostiakov-Lewis dependem da textura e estrutura do solo e de sua condição física no momento da irrigação, como por exemplo a existência de fendas e o conteúdo de umidade inicial. Os parâmetros K (com unidade $\text{m}^3/\text{min}^2/\text{m}$) e f_0 (com unidade $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$) expressam a taxa de variação na quantidade de água que se infiltra ao longo do tempo. O k descreve o processo dinâmico da infiltração, ou seja, a infiltração sob condições de insaturação. Assim sendo, esse

parâmetro depende mais da estrutura do solo e de sua condição física. O coeficiente f_0 se encarrega do processo estático (condições de saturação), representando o que se chama de velocidade de infiltração básica. Desse modo, f_0 depende mais da estrutura. O expoente a descreve o grau de variação não-linear entre a lâmina infiltrada e o tempo de oportunidade de infiltração. Dessa forma, esse parâmetro depende da textura e estrutura e da condição física do solo. As variações que ocorreram nas características de infiltração do solo, ao longo da estação de cultivo, foram devido a alterações na estrutura do solo e em sua condição física, principalmente o conteúdo de umidade inicial. Os parâmetros a e f_0 mostraram-se mais sensíveis a essas alterações que o parâmetro K . As variações, ao longo da estação de cultivo, nos parâmetros K , a e f_0 foram, respectivamente, 6,9%, 22% e 27%. As variações de um evento a outro nos parâmetros K e a (Figura 26) foram mais acentuadas (respectivamente 6,1% e 17,2%) entre o sétimo e o décimo evento, período no qual foram executados tratos culturais, ocorrendo alterações tanto na estrutura do solo como em sua condição física inicial. Observa-se na Tabela 9 que imprecisões nas medições de campo da velocidade de infiltração básica resultou numa variação temporal bastante acentuada (66%) desse parâmetro. O modelo SIRTOM corrigiu essas imprecisões fazendo investigações através de técnicas de otimização não-linear, na busca de valores para os parâmetros de Kostiakov-Lewis que resultasse num avanço simulado próximo ao avanço medido. A variação temporal na velocidade de infiltração caiu então para 27%.

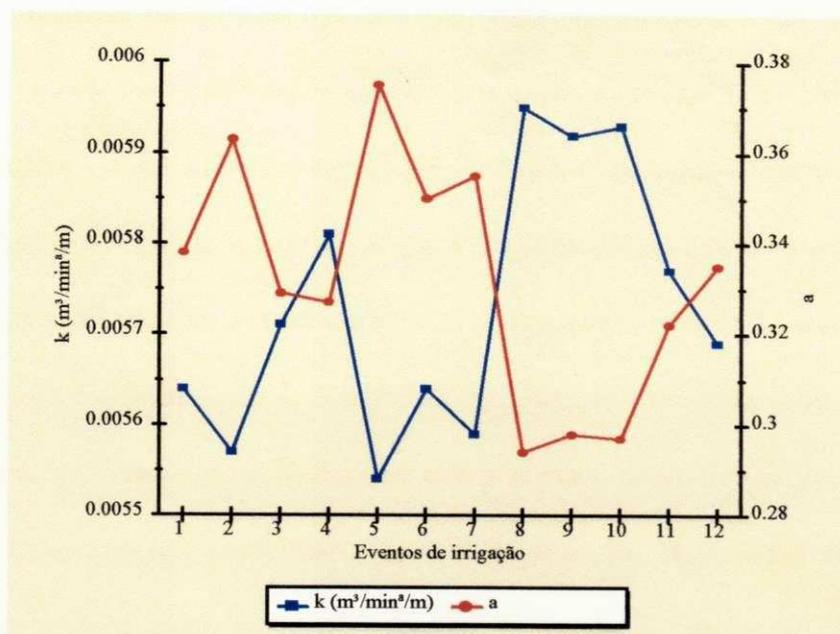


FIGURA 26 - Variação temporal nos parâmetros da equação de Kostakov - Lewis

TABELA 9 - Coeficientes da equação de Kostiakov-Lewis para cada evento de irrigação.

Eventos de irrigação	Coeficientes de Kostiakov-Lewis			
	$K (m^3/min^a/m)^1$	a^1	$f_0 (m^3/min/m)^1$	$f_0 (m^3/min/m)^2$
1	0.00564	0.338	0.00035	0.00019
2	0.00557	0.363	0.00035	0.00047
3	0.00571	0.329	0.00038	0.00043
4	0.00581	0.327	0.00048	0.00034
5	0.00554	0.375	0.00039	0.00030
6	0.00564	0.350	0.00042	0.00022
7	0.00559	0.355	0.00036	0.00021
8	0.00595	0.294	0.00040	0.00017
9	0.00592	0.298	0.00042	0.00020
10	0.00593	0.297	0.00042	0.00016
11	0.00577	0.322	0.00040	0.00018
12	0.00569	0.335	0.00038	0.00019
Média temporal	0.00573	0.332	0.00040	
Vriação temporal (%)	6.9	21.6	27.1	66

1 - Valores fornecidos pelo modelo SIRTOM

2 - Valores medidos

As Figuras 27 a 29 ilustram, também, a variação temporal nas características de infiltração do solo. Observa-se que a maior infiltração não ocorreu no primeiro evento, o que deveria teoricamente ter acontecido. Isto justifica-se pelo fato de que as avaliações de campo iniciaram-se após as irrigações de pré e pós-plantio. As características de infiltração praticamente não variaram nos três primeiros eventos. Do primeiro para o quarto evento houve um aumento na infiltração acumulada de 19%, para um tempo de oportunidade de 175 minutos, que resultou na infiltração máxima ocorrida ao longo de toda estação de cultivo. Aumentos na capacidade de infiltração do solo ocorreram devido ao desenvolvimento do sistema radicular do algodoeiro, cultivado em fileiras duplas, com 115.942 plantas/ha, que revitalizou um pouco a estrutura do solo. A partir do quarto evento a infiltração tendeu, na maioria das vezes, a diminuir ou manter-se constante. Do quarto para o quinto evento ocorreu uma diminuição de 7%. Do oitavo para o nono evento houve um aumento de 4% na infiltração acumulada. A infiltração não variou do quinto para o sexto, do sétimo para o oitavo, e nos quatro últimos eventos. Após o quarto evento, a infiltração acumulada mínima (nesses 175 minutos) foi de $0,097 \text{ m}^3/\text{m}$, resultando numa diminuição, ao longo da estação de cultivo, de 16% na infiltração acumulada em relação ao seu valor máximo. Sabe-se que, geralmente, a infiltração d'água no solo diminui ao longo da estação de cultivo devido a uma degeneração de sua estrutura e a um aumento em seu conteúdo de umidade inicial. A Tabela 9 apresenta uma equação média de infiltração para a estação de cultivo, que pode ser utilizada com segurança devido às pequenas variações nas características de um evento a outro.

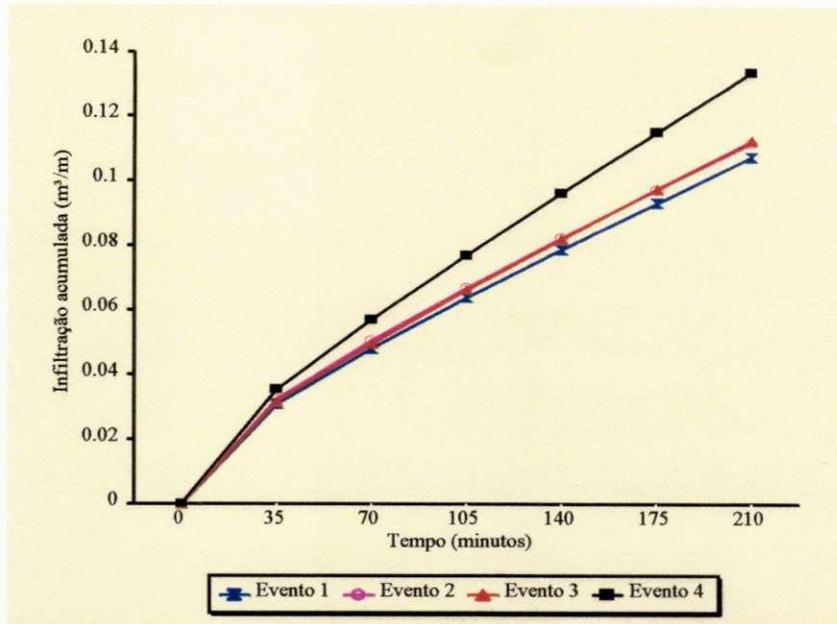


FIGURA 27- Variação temporal das características de infiltração do solo

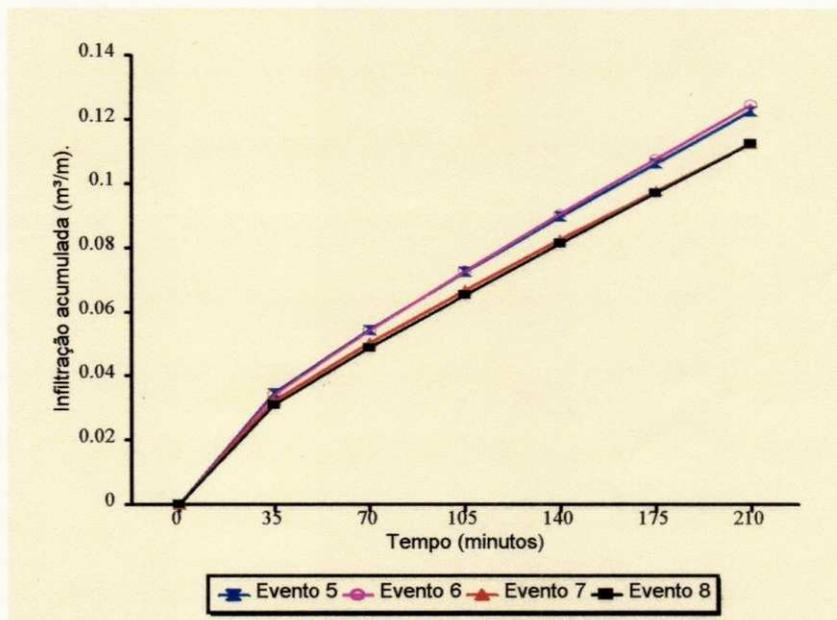


FIGURA 28 - Variação temporal das características de infiltração do solo

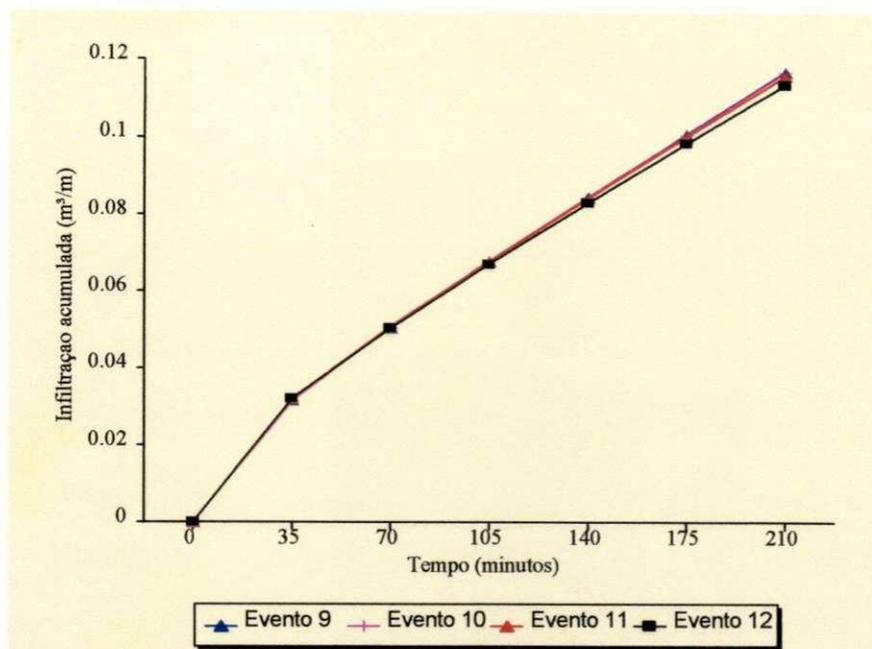


FIGURA 29 - Variação temporal das características de infiltração do solo

Fase de Avanço

As Figuras 30 a 32 mostram o comportamento espacial e temporal na fase de avanço, que dependeu, evidentemente, das grandezas e/ou das variações dos parâmetros de campo (comprimento dos sulcos, rugosidade e declividade da superfície do solo, seção transversal de fluxo dos sulcos, e as características de infiltração do solo) e dos parâmetros operacionais, principalmente a vazão de entrada, muito embora um determinado tempo de aplicação possa tornar-se insuficiente para a água avançar até ao final do sulco, o que é difícil de acontecer num sistema de irrigação por sulco apropriadamente dimensionado e manejado, tendo em vista condições de irrigação adequada, ou seja, sem nenhum déficit d'água ao longo de toda área irrigada.

Observa-se uma variação não-linear no tempo de avanço ao longo do sulco, que tornou-se mais acentuada, em todos os eventos de irrigação, a partir dos primeiros 50m de

sulco, que correspondem a 62,5% do comprimento total do sulco. Para ilustrar essa não-linearidade, basta dizer que na fase de avanço mais lenta, que ocorreu no segundo evento, a água gastou para chegar no final da área (52 minutos) 4,3 vezes o tempo que foi necessário para alcançar sua primeira metade (12 minutos). Houve, então, uma variação de 77% no tempo de avanço na segunda metade do sulco. A rugosidade da superfície de sulcos novos é, geralmente, razoável (considerou-se um coeficiente de Manning igual a 0,04). Apesar da superfície do solo ir tornando-se mais lisa ao longo da estação de cultivo, o desenvolvimento de ervas daninhas dificultam o avanço d'água no sulco. No terceiro e quarto eventos verificou-se a presença de tiririca (*Cyperus rotundum*, sa), tendo-a sido removida através de tratos culturais. No entanto, essa daninha resurgiu novamente nos últimos quatro eventos. A declividade era relativamente amena (0,2%). Declividades grandes podem contribuir para avanços completamente lineares em sulcos (AZEVEDO, 1992). A infiltração instantânea d'água no solo diminui o fluxo d'água no sulco à medida que a frente de avanço

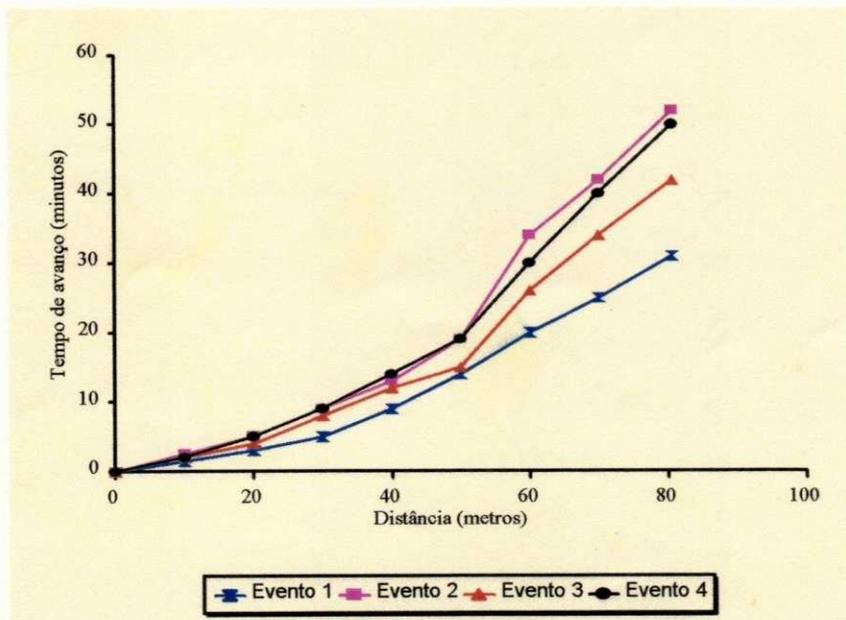


FIGURA 30 - Variação temporal da fase de avanço para o 1º, 2º, 3º e 4º eventos de irrigação

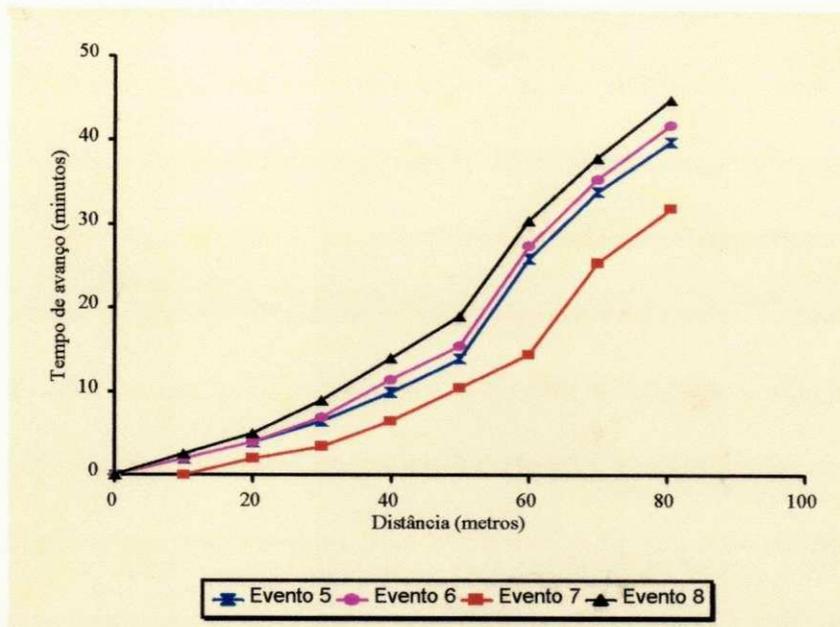


FIGURA 31 - Variação temporal da fase de avanço para o 5º, 6º, 7º e 8º eventos de irrigação

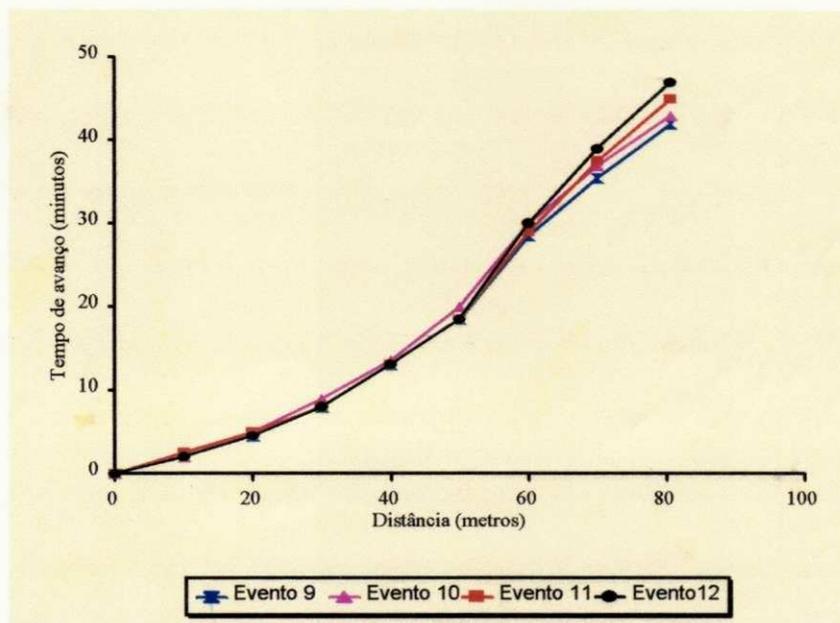


FIGURA 32 - Variação temporal da fase de avanço para o 9º, 10º, 11º e 12º eventos de irrigação

se distancia da cabeceira do sulco (seção de entrada). Assim sendo, quanto maior a taxa de infiltração maior será o grau de variação não-linear no tempo de avanço ao longo do sulco. A infiltração foi máxima do segundo ao quarto eventos de irrigação, período no qual o grau de variação não-linear na fase de avanço foi mais acentuado. Tanto vazões pequenas

como sulcos excessivamente longos podem resultar num elevado grau de não-linearidade no avanço, principalmente sob condições de infiltração alta. Nesta pesquisa as vazões de entrada, para cada evento de irrigação, foram determinadas tendo em vista balancear as perdas por percolação profunda e por escoamento superficial. Dessa maneira, houve com certeza uma contribuição da vazão na variação não-linear do avanço. Tratando-se de um sulco curto, supõe-se que seu comprimento (80,65m) contribuiu muito pouco para esse tipo de variação no avanço. WALKER e HUMPHERYS (1983) apresentam sulcos de até 360m de comprimento, que resultou num excessivo grau de não-linearidade na segunda metade da fase de avanço (90% de variação). Nesses sulcos, para a água atingir o final da área foi necessário 10,3 vezes (400 minutos) o tempo que ela gastou (39 minutos) para chegar a primeira metade da área. A seção transversal de fluxo contribuiu para a variação não-linear no avanço à medida que ocorreu sua degradação ao longo da estação de cultivo, que resultou em seu alargamento.

As fases de avanço detectaram variações tanto espaciais como temporais nos parâmetros de campo. O avanço d'água no trecho do sulco entre os 40m aos 60m de comprimento indica que houve um aumento na rugosidade, principalmente devido ao surgimento de ervas daninhas, e/ou um aumento na seção de fluxo. As variações temporais na rugosidade e na seção de fluxo (variação que resultou num aumento nesses parâmetros) foram compensadas pelas variações temporais nas características de infiltração (variação que resultou numa diminuição), porque o avanço foi tornando-se mais rápido ao longo da estação de cultivo. As fases de avanço demonstraram, também, que as variações temporais nos parâmetros de campo tenderam a estabilizar-se, porque, por exemplo, do primeiro ao quarto evento de irrigação o tempo de avanço no final da área variou 38%, enquanto que

nos quatro últimos eventos teve-se apenas 11% de variação. Nesta pesquisa, o monitoramento da fase de avanço, ao longo da estação de cultivo, tinha como propósito estabelecer um manejo do sistema de irrigação, que levando em consideração as variações espaciais e temporais nos parâmetros de campo, balanceasse as perdas por percolação profunda e por escoamento superficial. Assim sendo, observa-se na Tabela 5, que do primeiro ao oitavo evento de irrigação a vazão de entrada tanto diminuiu como aumentou dependendo das variações nos parâmetros de campo num determinado evento. Como a infiltração diminuiu ao longo do tempo, tornando-se, inclusive, praticamente constante nos quatro últimos eventos, a partir do nono evento a vazão foi diminuindo, ficando quase que constante, para que fossem evitadas perdas por escoamento superficial excessivas.

Avaliação do Sistema

Eficiência de armazenamento e uniformidade de distribuição

As Figuras 33 a 44 exibem as variações no tempo de oportunidade de infiltração e na lâmina d'água infiltrada ao longo do sulco, para cada evento de irrigação. A Tabela 10 apresenta, a taxa de variação do tempo de oportunidade de infiltração ao longo de todo o sulco e em apenas na sua segunda metade, o tempo de aplicação, e a lâmina infiltrada no final do sulco, para cada evento de irrigação. Observa-se que a variação na segunda metade do sulco no tempo de oportunidade foi máxima no segundo evento e mínima no primeiro evento. Evidentemente, porque nesses eventos o tempo de avanço foi, respectivamente, máximo e mínimo. A taxa de variação ao longo de todo o sulco foi quase que constante, variando em média apenas 20%. Obviamente essas taxas refletem a uniformidade de aplicação d'água ao longo do sulco. No primeiro evento, como elas foram mínimas, o perfil de infiltração é praticamente linear. A desuniformidade de aplicação d'água mostrou-se bem acentuada do segundo ao quarto evento. Por exemplo, no quarto evento para se aplicar a lâmina requerida no final do sulco (15,6mm) foi necessário aplicar na seção de entrada do sulco uma lâmina de 46mm. A partir do quinto evento ela foi tornando-se bem mais amena, momento em que começou-se a ter um melhor domínio das variações nos parâmetros de campo, e, conseqüentemente, um manejo mais adequado dos parâmetros operacionais.

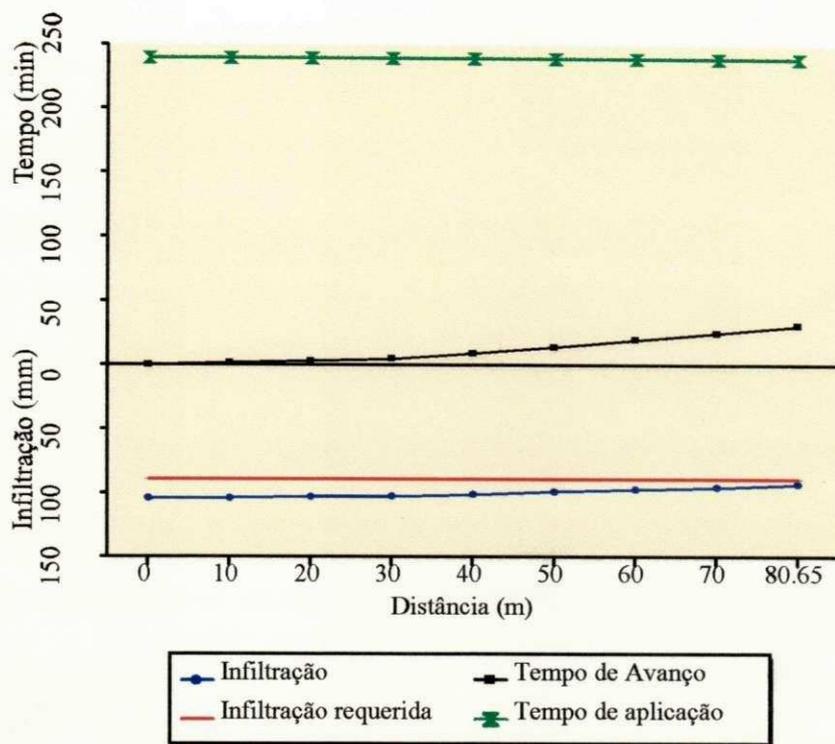


FIGURA 33 - Perfil de infiltração e fases de avanço e armazenamento para o primeiro evento de irrigação

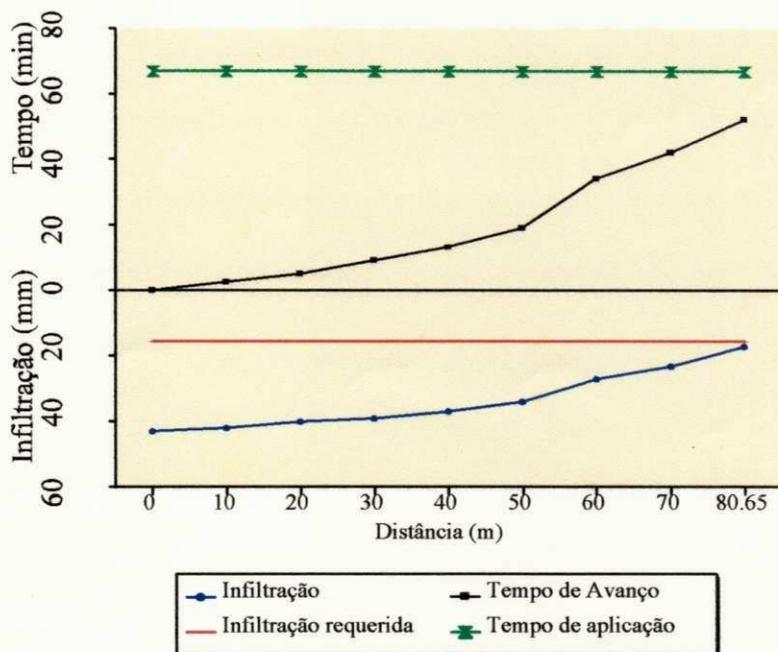


FIGURA 34 - Perfil de infiltração e fases de avanço e armazenamento para o segundo evento de irrigação

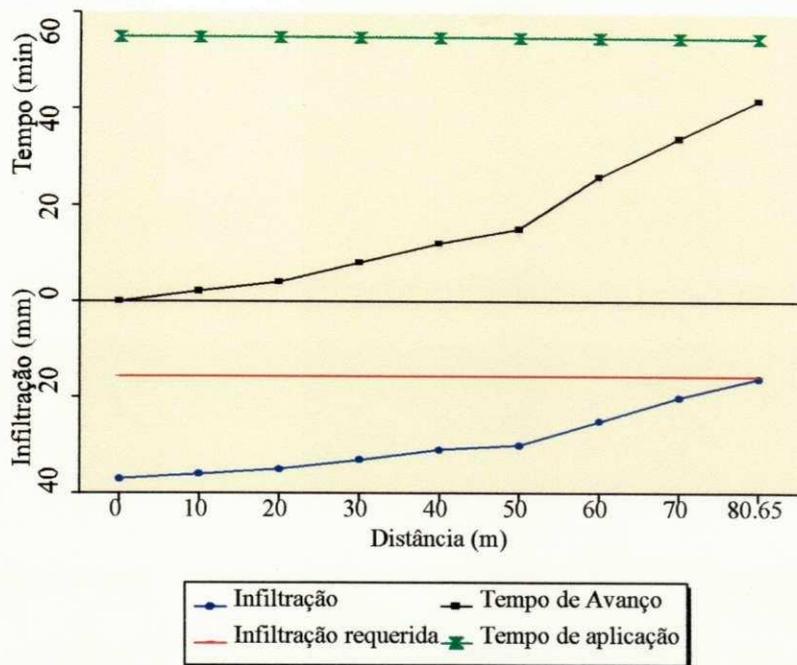


FIGURA 35 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o terceiro evento de irrigação

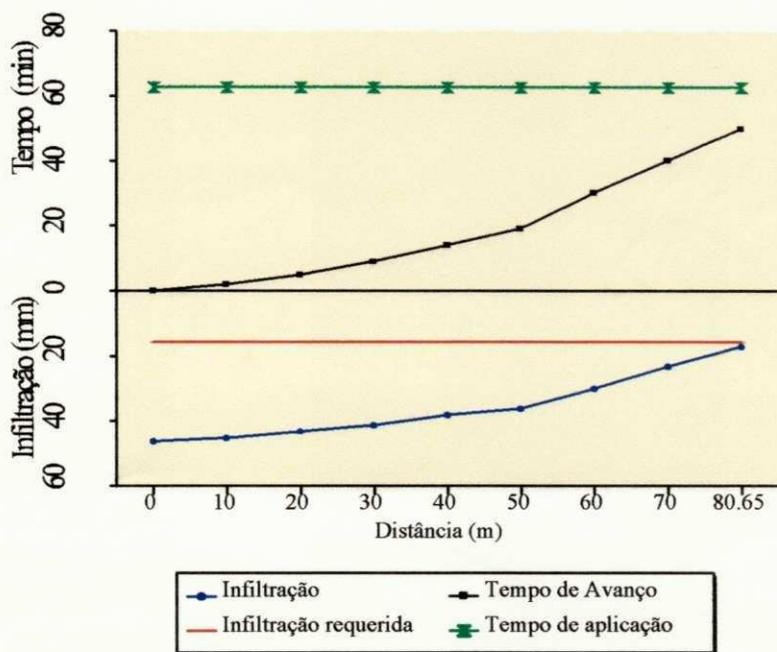


FIGURA 36 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o quarto evento de irrigação

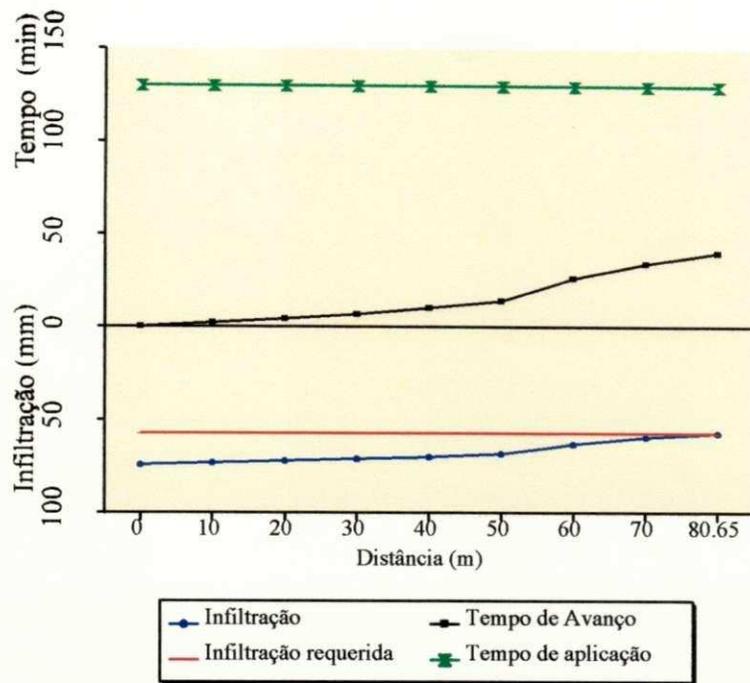


FIGURA 37 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o quinto evento de irrigação

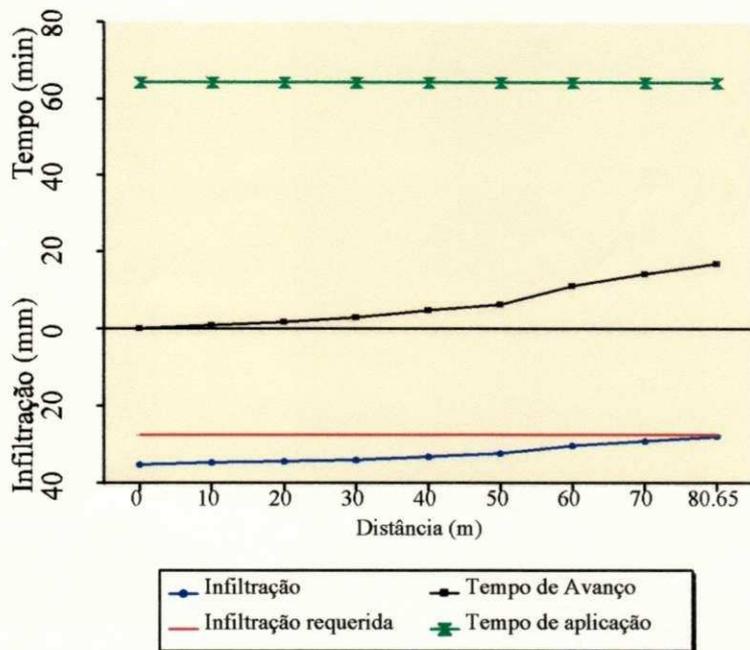


FIGURA 38 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o sexto evento de irrigação

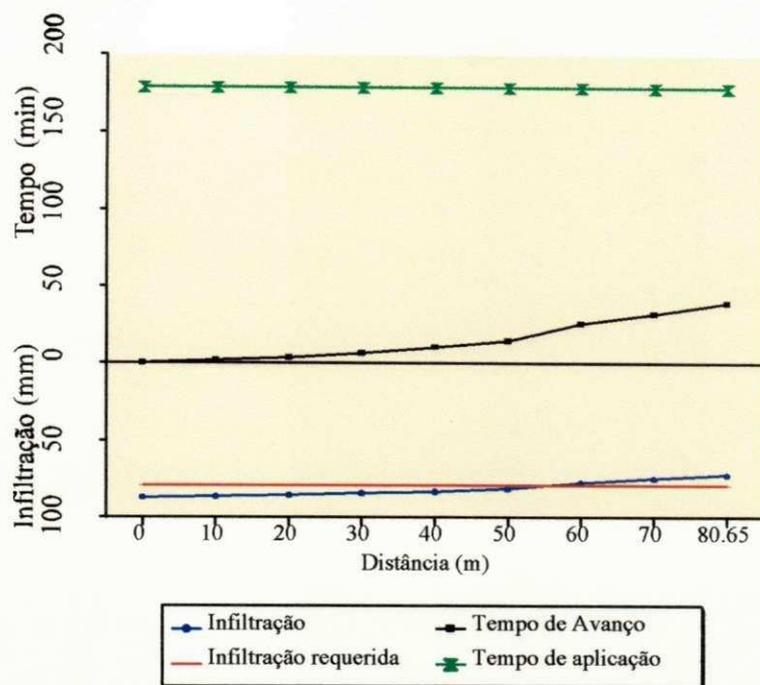


FIGURA 39 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o sétimo evento de irrigação

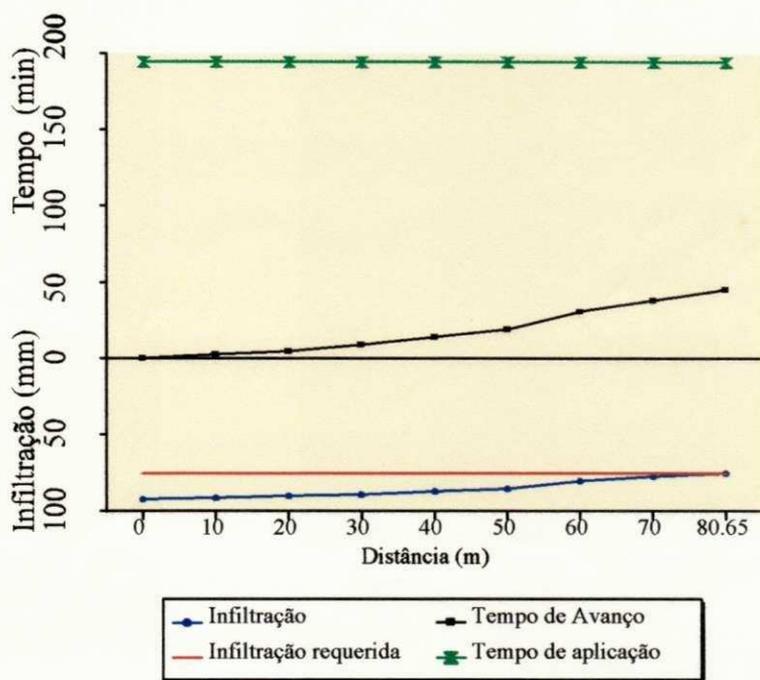


FIGURA 40 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o oitavo evento de irrigação

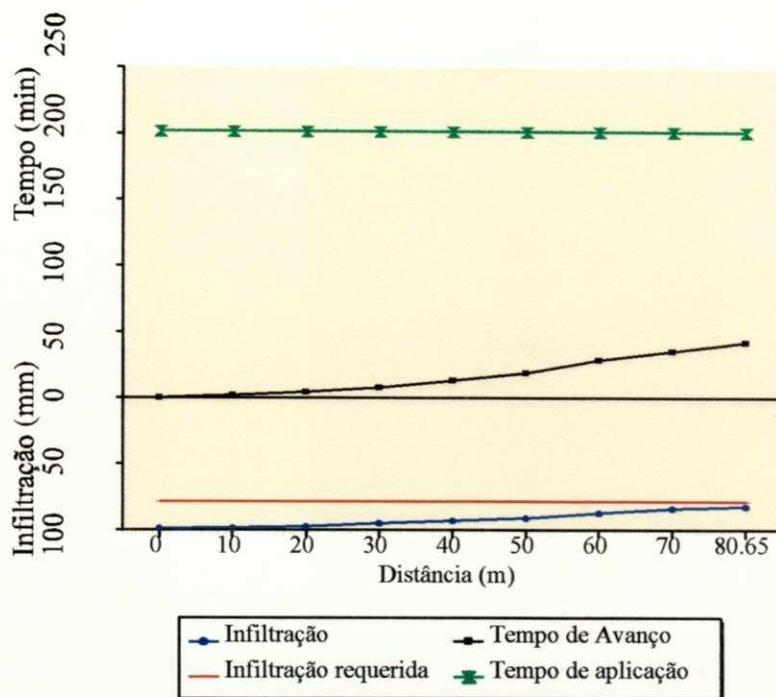


FIGURA 41 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o nono evento de irrigação

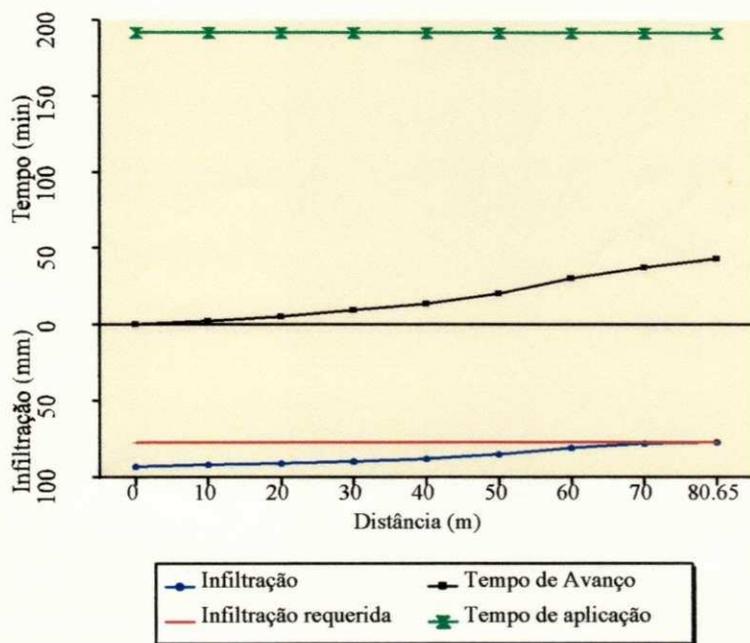


FIGURA 42 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o décimo evento de irrigação

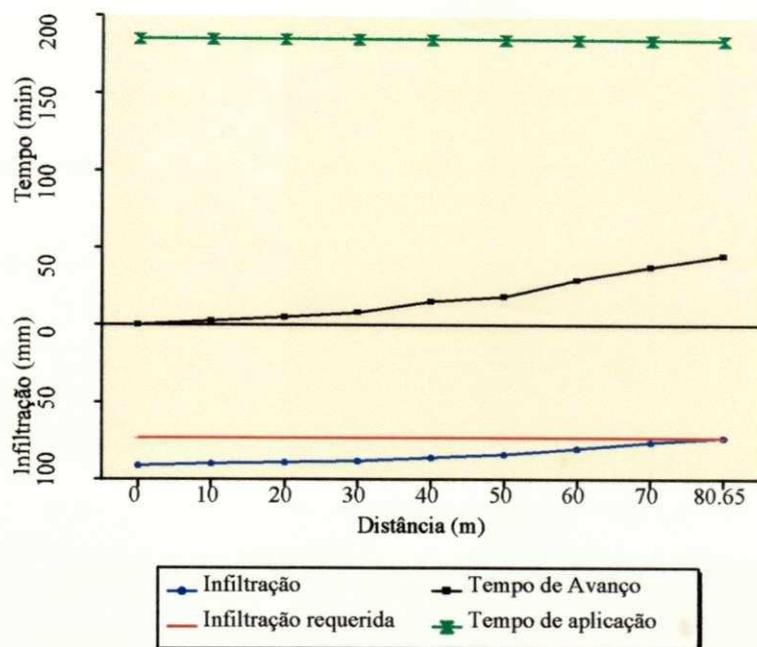


FIGURA 43 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o décimo primeiro evento de irrigação

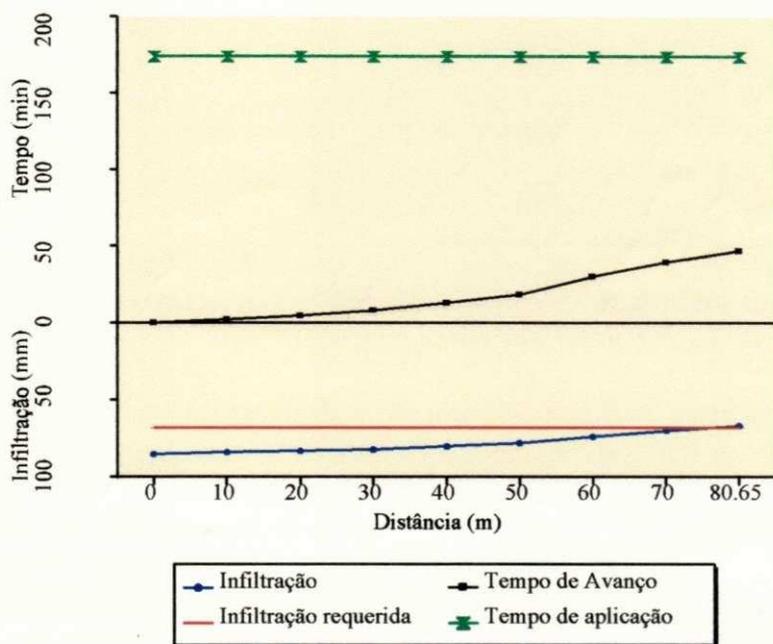


FIGURA 44 - Perfil de infiltração e fase de avanço e armazenamento para o décimo segundo evento de irrigação

TABELA 10 - Variação dos tempos de avanço, oportunidade e aplicação, e da lâmina aplicada ao longo da estação de cultivo

Eventos de irrigação	t_L (min)	t_L/L (min/m)	$(t_L - t_{0,5L})/L_{0,5}$ (min/m)	Treq (min)	Treal (min)	Tareq (min)	Tareal (min)	Z_e (mm)	Z_L (mm)	Z_{req} (mm)
1	31	0,38	0,55	197	209	228	240	104	93	89
2	52	0,64	0,97	13	15	65	67	43	17	15,6
3	42	0,52	0,75	13	13	55	55	37	16	15,6
4	50	0,62	0,90	11	13	61	63	46	17	15,6
5	40	0,49	0,75	90	90	130	130	74	57	57
6	42	0,52	0,76	118	119	160	161	88	70	69
7	39	0,48	0,71	160	140	199	179	86,7	72	79
8	45	0,56	0,77	150	150	195	195	92	75	75
9	42	0,52	0,72	153	160	195	202	99	82	78,5
10	43	0,53	0,74	149	149	192	192	93	77	77
11	45	0,56	0,80	140	140	185	185	91	73	73
12	47	0,58	0,85	130	127	177	174	85	67	68

t_L - tempo de avanço no final do sulco

t_L/L - taxa de variação do tempo de oportunidade de infiltração do longo de todo o sulco

$(t_L - t_{0,5L})/L_{0,5}$ - taxa de variação do tempo de oportunidade de infiltração na segunda metade do sulco

Treq - tempo de oportunidade de infiltração requerido no final do sulco

Treal - tempo de oportunidade de infiltração que ocorreu no final do sulco

Tareq - tempo de aplicação requerido

Tareal - tempo de aplicação que ocorreu

L - comprimento do sulco

Z_L - lâmina infiltrada no final do sulco

Z_{req} - lâmina requerida no final do sulco

Z_e - lâmina aplicada na seção de entrada do sulco

Observa-se que na maioria dos eventos de irrigação prevaleceu a condição de irrigação adequada ($Z_L = Z_{req}$), resultando em eficiências de armazenamento e de uniformidade de distribuição (na zona radicular) de 100%. Vale lembrar que o propósito desta pesquisa foi monitorar os parâmetros operacionais do sistema tendo em vistas amenizar as perdas d'água sem, no entanto, sacrificar condição de irrigação adequada. Verifica-se no sétimo evento uma condição de irrigação deficiente ($Z_L < Z_{req}$), onde ocorreu nos últimos 45% da área irrigada um déficit de umidade relativamente pequeno (7mm no final da área). O tempo de aplicação (179 minutos), que foi o que provocou o deficit, foi apenas 4% (20 minutos) inferior ao tempo de aplicação necessário (199 minutos) para aplicar a lâmina requerida ao longo de toda área. As eficiências de armazenamento e de uniformidade de distribuição para esse evento foram, respectivamente, 98% e 95,8%.

No primeiro e nono eventos ocorreram a condição de irrigação excessiva ($Z_L > Z_{req}$), no entanto, a lâmina aplicada no final da área nesses eventos, foram, respectivamente, apenas 4,3% e 4,26% maior que a requerida. O tempo de aplicação foi, respectivamente, 5,3% (12 minutos) e 3,6% (7 minutos) superiores aos tempos de aplicação necessários (respectivamente 218 e 195 minutos). No geral, o desempenho do sistema de irrigação, quanto às eficiências de armazenamento e uniformidade de distribuição, mostra que ocorreu um monitoramento sazonal adequado da fase de avanço e do tempo de aplicação.

Eficiência de aplicação

A Figura 45 apresenta a variação temporal da eficiência de aplicação e das perdas por percolação profunda e por escoamento superficial.

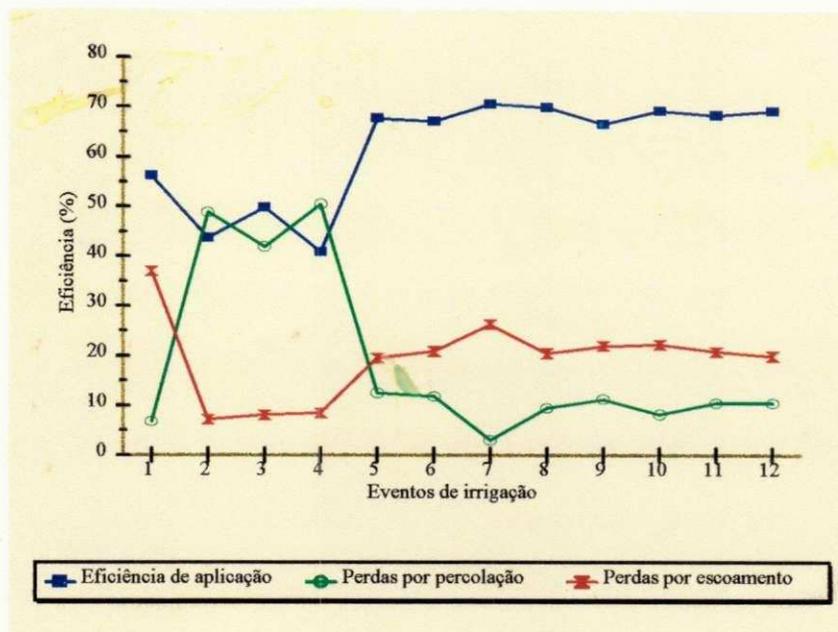


FIGURA 45 - Variação temporal da eficiência de aplicação e das perdas por percolação e por escoamento

Observa-se na Figura 45 que a eficiência de aplicação foi baixa nos primeiros quatro eventos de irrigação, variando de 56,2% a 40,9% (27% de variação), isto correu porque como as variações nos parâmetros de campo nesse período foram bastante acentuadas, tornou-se difícil definir-se um manejo adequado para os parâmetros operacionais. Do quarto para o quinto evento de irrigação ocorreu uma melhoria substancial na eficiência de aplicação ($E_a = 71\%$), que manteve-se praticamente constante até o último evento, a E_a variou do quinto ao décimo segundo evento apenas 5,6%. A eficiência média neste período foi de 68,7%, estando esta dentro do padrão internacional, que admite como satisfatória uma eficiência de aplicação superior a 65%. A eficiência média ao longo de toda estação de cultivo foi 61,71%.

O valor médio encontrado supera as eficiências de aplicação em sulcos clássicos, obtidas em estudos efetuados por AZEVEDO (1992), NOGUEIRA (1976), LEAL (1979), PINTO (1980) e AUGUSTO et al. (1985), cujos valores oscilaram entre 15,7 a 57%. De acordo com DAKER (1970), este aumento da eficiência nos últimos eventos deve-se, em parte, a profundidade e a distribuição do sistema radicular.

Perdas por percolação

Observa-se na Figura 45 um aumento nas perdas por percolação do segundo ao quarto eventos de irrigação, devido a alta infiltração nesse período e ao propósito desta pesquisa de ter-se condições de irrigação adequada ao longo de todo o sulco. Observa-se um aumento de 86% nas perdas por percolação do primeiro para o segundo evento de irrigação. Esta variação deve-se à diminuição da lâmina requerida no final do sulco no segundo evento e ao fato de que a vazão no primeiro evento foi bastante elevada (Tabela 9 e 5). Do quarto para o quinto evento a perda por percolação diminuiu 77%, devido a um aumento na lâmina requerida no final do sulco e a uma diminuição no tempo de avanço no final da área. Para os eventos de irrigação, onde a lâmina requerida no final do sulco foi superior a 50mm (do quinto ao décimo segundo evento), a perda média por percolação foi de 9,4%, que está abaixo do valor que BERNARDO (1977), considera como o máximo permisível (10%). A partir do quinto evento a infiltração foi diminuindo e suas variações ficaram praticamente constantes, resultando, então, em perdas por percolação menores e mais ou menos estabilizadas. No entanto, a taxa de percolação média ao longo de toda estação de cultivo foi de 18,85%, sendo este valor superior 1,88 vezes o valor máximo aceitável.

Perdas por escoamento

Observa-se na Figura 45 uma diminuição nas perdas por escoamento de 80% do primeiro para o segundo evento, devido a uma diminuição, no segundo evento, tanto na lâmina requerida no final do sulco como na vazão. Do segundo ao quarto evento a variação caiu para 15%. Do quarto para o quinto evento as perdas por escoamento aumentaram 57%, devido a um aumento no tempo de aplicação. Do quinto ao décimo segundo evento ocorreu uma variação média de apenas 8,8% nessas perdas. Verifica-se, então, que houve um controle adequado nos parâmetros operacionais ao longo da estação de cultivo.

As seguintes informações sobre o manejo sazonal d'água dão uma idéia global da performance do sistema: O volume sazonal aplicado na área foi de $102,29\text{m}^3$; o volume sazonal requerido pela cultura foi de $66,09\text{m}^3$ (64,6% do volume total aplicado); o volume sazonal aplicado no sistema radicular foi de $66,03\text{m}^3$ (99% do volume requerido pela cultura); o volume sazonal de perdas d'água por percolação foi de $13,18\text{m}^3$ (11,88% do volume total aplicado); e o volume sazonal das perdas de água por escoamento foi de $23,08\text{m}^3$ (22,56% do volume total aplicado).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões:

A partir de uma introspecção nos resultados obtidos elaborou-se as seguintes conclusões alusivas aos objetivos desta pesquisa:

1. Os sulcos apresentaram uma seção de fluxo com uma geometria parabólica irregular. Ocorreram variações tanto espaciais como temporais na seção de fluxo. Especialmente, a largura correspondente à metade da altura máxima de fluxo foi a dimensão que mais variou, apresentando um percentual de variação de 46,8%. Ao longo da estação de cultivo a dimensão mais vulnerável a modificações foi a base do sulco, com um percentual de variação de 63%. As fases de avanço exibiram essas variações;
2. A fase de avanço ao longo da estação de cultivo refletiu variações temporais nas características de infiltração do solo, no entanto, aparentemente ela não evidenciou variações espaciais nesse parâmetro de campo. As características de infiltração apresentou variações pouco acentuadas até o nono evento de irrigação, ocorrendo, para um mesmo tempo de oportunidade, tanto reduções como aumentos na infiltração acumulada. Depois desse evento as variações foram praticamente insignificantes;
3. Os perfis de infiltração mostraram que o monitoramento da fase de avanço contribuiu sensivelmente para atenuar as variações no tempo de oportunidade de infiltração ao longo dos sulcos, minimizando, assim, as perdas por percolação. Os tempos de avanço mais longo e mais curto, no final dos sulcos, foram, respectivamente, 52 e 31 minutos. Tendo-se utilizado o fluxo contínuo, em determinadas situações, a fase de avanço, dependendo principalmente das condições de infiltração do solo no momento, tornou-se

mais lenta ou mais rápida na tentativa de balancear as perdas por escoamento superficial e percolação profunda;

4. O monitoramento dos parâmetros operacionais (vazão de entrada e tempo de aplicação) favoreceu uma melhoria substancial na performance do sistema ao longo da estação de cultivo. A eficiência de aplicação aumentou de 41% para 71%, tendo sido seu valor médio sazonal de 62%. As perdas por percolação e escoamento variaram, respectivamente, de 50,6% a 3,1% e de 37% a 7,2%. Suas médias sazonais foram, respectivamente, 18,85% e 19,43%. Depois do quarto evento de irrigação praticamente ocorreu uma estabilização das perdas d'água. A eficiência de aplicação foi melhorada sem, no entanto, sacrificar-se a condição de irrigação adequada que era uma meta nesta pesquisa, tendo-a ocorrido na maioria dos eventos de irrigação. As eficiências de armazenamento e de uniformidade de distribuição foram 100% em quase todos os eventos;
5. As variações espacial e temporal nos parâmetros de campo, principalmente a perfilometria dos sulcos e as características de infiltração do solo, sem um manejo sistemático e adequado dos parâmetros operacionais, comprometem consideravelmente a performance do sistema de irrigação por sulcos.

Recomendações técnicas:

1. Em áreas a ser irrigadas por superfície, realizar uma adequada sistematização do solo, de tal forma a obter-se sulcos com declividades uniformes com o objetivo de evitar problemas de desuniformidade na distribuição da lâmina de água armazenada no solo;
2. Garantir a sistematização, sem descaracterizá-la durante as tarefas de preparo do solo;

3. Programar adequadamente as irrigações de tal forma que evite excessiva aplicação conseqüentes perdas de água;
4. A utilização de vertedores nos canais parcelares de comprimentos longos e declivosos, com o objetivo de manter a carga hidráulica constante e proporcionar a aplicação de lâminas de água uniformes;
5. Treinar e orientar os colonos quanto ao manejo da água ao nível de parcela, visando o aumento da eficiência de aplicação e armazenamento, bem como da uniformidade de distribuição, evitando as perdas de água no solo e nutrientes e prevenir uma possível contaminação das águas superficiais e subterrâneas, por escoamento superficial e percolação profunda, e ainda economizar os volumes hídricos armazenados;
6. A utilização de sulcos fechados, parcialmente fechados ou a reutilização da água de escoamento, visando o aumento da para eficiência de aplicação;
7. Considerando que as variações, em geral, nos parâmetros de campo foram atenuadas a partir do quinto evento de irrigação e que a eficiência neste evento foi substancialmente melhorada e mantida praticamente constante no restante da estação de cultivo, para economizar tempo e dinheiro, recomenda-se que o monitoramento da performance do sistema seja feito até esse evento. No entanto, os resultados desta pesquisa carecem de confirmação de pesquisas futuras.

Recomendações para futuras pesquisas

1. Utilizando os modelos SIRTOM e SIRMOD, desenvolver um monitoramento que otimize o potencial de desempenho do sistema de irrigação por sulco e por bacias em nível, determinando com maior precisão vazões que maximizem a eficiência de

aplicação e verificando-se a tendência das variações nos parâmetros de campo observadas nesta pesquisa se repetem.

2. Desenvolver uma análise de sensibilidade da performance do sistema de irrigação por sulcos às variações nos parâmetros de campo e operacionais do sistema, para definir-se um manejo mais confiável do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGUSTO, S.G.; SOUZA, F. & COSTA, J.O. Eficiência e Uniformidade de distribuição de água na irrigação por sulcos em declive. Revista Engenharia Agrícola da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Botucatu, Vol. 9. 48p. 1985.
- AZEVEDO, H.M. Características da infiltração em sulcos abertos e fechados. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1975, 62p. Dissertação (mestrado)
- AZEVEDO, C.A.V. Real-Time Solution of the Inverse Furrow Advance Problem. Utah : s. Ed. 1992. Tese (doutorado). University Utah.
- AZEVEDO, C.A.V. Modelagem em Sistemas de Checagem e Controle da Irrigação por Sulcos. In : XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1993. Anais Bahia : SBEA, 1993.
- BARRETO, A.N.; NOGUEIRA, L. C. uso de comporta tubular em canais de irrigação. ITEM, Brasília, n. 39, p.28-31. 1989.
- BERNARDO, S. Irrigação por superfície. Viçosa, Imprensa Universitária / UFV, 1980. 69p.
- BERNARDO, S.; RESENDE, M., e ARAUJO, J.J. Eficiência de irrigação em sulcos com redução da vazão inicial. Revista Ceres, Viçosa, v 24, m. 133, p. 261-277. 1977
- BOS, M.G. e NUGTEREM, J. On Irrigation Efficiencies. International Institute for Lano Reclamation and Improvement. Publication 19. 1974.

- CARVALHO GUERRA, H.D. e SOARES, J.M. Eficiência de Irrigação por sulcos a nível de parcela no sistema de irrigação do Perímetro Irrigado de Bebedouro, Petrolina : EMBRAPA-CPATSA, 1988. 33.. ilust (Circular Técnica, 18).
- CHOUHURY, E.N., MILLAR, A.A. Características físico-hídricas de três latossolos do projeto bebedouro. Boletim Técnico, Petrolina-PE, s. Ed. 1967.
- CLYMA, W., ALI A. e ASRAF, M.M. Irrigation Practices and Application Efficiencies in Pakistan. Water Management Technical Reiport. Colorado, n. 39. 1975
- COROEIRD, G.G. Caracterização dos problemas de sais dos solos irrigados do projeto São Gonçalo. Campina Grande : UFPb. 1977 Dissertação (mestrado)
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.C. SHOCKLEY, D.C. Methods for Evaluating Irrigation Systems. Washington D.C., USDA, 1969. 24p. (Agriculture Handbook, 82).
- DAKER, A. A Água na Agricultura: Irrigação e Drenagem. 3ª Ed. Rio de Janeiro : Freitas Bastos, 1970. V.3. 453p.
- DAKER, A. 1976. Irrigação e Drenagem In: A Água na Agricultura. 4ª Ed., Rio de Janeiro : Livraria Freitas Bastos, 1970. V.3, 453p.
- *MANUAL de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro : EMBRAPA/SNLCS. 1979.
- FISCHBACH, P.E., SOMERHALDER, B.R. Efficiencies of an Automated surface Irrigation System with and without a RUNOFF re-uso system. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 14, n.4, p. 717-718. 1971.

- GAVANDES, S.A. Física de suelos: Principios Y Aplicaciones. Mexico :Ed. Limusa. 1979. 351p.
- GRASSI, C.J. Estimación de Los Usos Consuntivos de Agua Y Requerimiento de Riego Con Fines de Formalación Y Diseños de Proyeltos. Mérida. CIDIAT. 68p. 1968.
- GRASSI, C.J. Infiltration Characteristics of Furrow Irrigation in Heavy-Textured Soil. Netherlands : Agricultural University Wageningen, 1972.
- GRASSI, C.J. Métodos de riego. Mérida, CIDIAT. 1975. 270p.
- GUROVICH, L.A. Infiltração Del Água en suelo. Petrolina : EMBRAPA/CPATSA, 1979. 20p.
- HAMAD, S., STRINGHAM, G.E. Maximun Nonerosive Forrow Irrigation Stream Size. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Now York, v. 104, n. IR 3, p. 275-281. 1978.
- HART, N.E. Irrigation Reuse Systems : (A proposed new ASAE Engineering Practice). ASAE, St. Joseph. 1975. 24p. Paper n° 75.2542.
- ISRAELSEN, O.W. Water Application Efficiencies in Irrigation. Agricultural Experiment Stating. Bulletin. Uthah, p : 371. 55p. 1944.
- ISRAELSEN, O.W., HANSEN, V.E. Principios Y Aplicaciones Del Riego. 2ª ed. Barcelona : Recerté. 396p. 1965.
- JENSEN, M.E.; SWARNER, L.R., PHELAN, J.T. Improving Irrigation. Efficiencie. In: Hagan, R.M.; HAISE, H.R., EDMINSTER, T.W. Ed. Irrigation of Agricultural

Lands. Madison : American Society of Agronomy, p. 1120-1172. 1974. (Agronomy, 11)

JENSEN, MARVIN, S.W. ARNER & JOHN T. PHELAN. Improving Irrigation Efficiencies. In: Agronomy Monograph Irrigation of Agricultural Lands. American Society of Agronomy, Wisconsin, p. 1120-1142. 1967.

KELLER, J., e A.W. Mc CULLOCH. Antes Irrigation Handbook 2° ed. California : SMF-3. W. R. Ames Company. 1962.

KRUSE, E.G. e HEERMANN, D.F. Implications of Irrigation System Efficiencies. Journal of Soil and Water Conservation, v. 32, n. 6. p. 465-270. 1977.

LAL, R. e PANDYA, A.C. Furrow Irrigation with decreasing inflow rate. Journal of the Irrigation and Drainage Division. New York. V. 96, n. IR 4, p. 451-460. 1970.

LEAL, M.V.P. Determinação da Eficiência de Irrigação a Nível de Parcela, no Projeto de Irrigação Bebedouro-Petrolina-PE. Viçosa : Imprensa Universitária. 1974. 94p. Dissertação (mestrado). UFV.

LEAL, M.V.P. Determinação da Eficiência de Irrigação, a Nível Parcelar no Projeto de Irrigação Bebedouro Petrolina-PE, Viçosa : UFV, 1979, p. 42-56.

LOPEZ, J.E. Riego por surcos. Petrolina : Minter, 1973. 46p.

MARR, J.C. Furrow irrigation. California Agricultural Experiment Station. University of California. 66p. 1967. (Manual 37).

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. e ALFARO, J.F. Irrigation System Evaluations and Improvement. Logan : Utah State University, 1973.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W., ERB, K. Tospatal Variability of Field-Measured soil-water properties. Hilgardia. V. 42, n. 7, p. 214-259. 1973.

NOGUEIRA, FRANCISCO DAS CHAGAS. 1976. Determinação de Eficiência de aplicação de água em sulcos nos perímetros Irrigados do estado da Paraíba. Campina Grande, UFPb, 1976. p. 4-13.

OLITTA, A.F.L. Os métodos de irrigação. São Paulo : Nobel, 1978. 267p.

PINTO, D.S. Efeito da vazão e da declividade sobre as perda de água e sobre a eficiência de aplicação na irrigação por sulco. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 1980. 73p. Dissertação (mestrado), UFV.

POIREE, M.E., OLLIER, C. El Regadio. 2º ed. Barcelona : Editores Técnicos Associados, S.A., 1970.

SOARES, J.M. Eficiência de irrigação por sulco com redução de vazão e/ou reuso de "Runoff". Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 1980. 132p. Dissertação (mestrado), UFV.

SOARES, J.M., BERNARDO, S., BRITO, R.A.L., FERREIRA, P.A. Irrigação por sulco com e sem utilização da água de escoamento. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19(1) : 59-66, 1984.

- SOARES, J.M., BERNARDO, S., BRITO, R.A.L., FERREIRA, P.A. Análise Comparativa Entre o Uso da Vazão Constante e Redução da Vazão Inicial e seu Efeito na Eficiência de irrigação por Sulco. 1981.
- VALDIVIESO-SALAZAR, CARLOS REEDER, Avaliação do manejo de águas no perímetro irrigado de Bebedouro, Petrolina, PE, Petrolina : EMBRAPA/CPATSA, 1985. 34p. Ilust. (Boletim de pesquisa, 25).
- WALKER, W.R., SKOGERBOE, G.V. Surface irrigation: Theory and practice. New Jersey : Prentice Hall, 1987.
- WALKER, W.R., HUMPHERYS, A.S. Kinematic-Wave Furrow Irrigation Model, Journal of the Irrigation and drainage Engineering, ASCE, 109(4), 377-92. 1983.
- WILLARDSON, L.S., BISHOP, A.A. Analysis de surface irrigation application efficiency. Journal of the irrigation and drainage division. New York, v. 93, n. IR 2, p. 21-36. 1967.
- WITHER, B., VIPOND, S. Irrigação: projeto e prática. São Paulo : Nobel, 1988. 339p.

ANEXO A

TABELA A-1 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o primeiro evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00465	0.000	0.000350	80.6	10.6
37.2	0.00556	0.082	0.000350	80.6	12.7
49.6	0.00569	0.328	0.000350	80.6	28.1
62.0	0.00562	0.348	0.000350	80.6	30.7
74.4	0.00543	0.413	0.000350	80.6	42.8
86.8	0.00548	0.388	0.000350	80.6	37.0
100.0	0.00564	0.338	0.000350	80.6	29.3

TABELA A-2 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o segundo evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.01017	0.000	0.000350	80.6	19.4
37.2	0.00626	0.114	0.000350	80.6	18.6
49.6	0.00403	0.218	0.000350	80.6	17.7
62.0	0.01002	0.245	0.000350	80.6	55.2
74.4	0.00563	0.356	0.000350	80.6	51.6
86.8	0.00573	0.334	0.000350	80.6	45.8
100.0	0.00557	0.363	0.000350	80.6	53.1

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min³/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).

TABELA A-3 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o terceiro evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00706	0.000	0.000380	80.6	14.6
37.2	0.00470	0.173	0.000380	80.6	16.6
49.6	0.00586	0.303	0.000380	80.6	36.9
62.0	0.00618	0.252	0.000380	80.6	30.1
74.4	0.00582	0.315	0.000380	80.6	39.1
86.8	0.00582	0.314	0.000380	80.6	38.9
100.0	0.00571	0.329	0.000380	80.6	41.4

TABELA A-4 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o quarto evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00706	0.204	0.000480	80.6	31.3
37.2	0.00425	0.220	0.000480	80.6	19.8
49.6	0.00381	0.255	0.000480	80.6	20.6
62.0	0.01079	0.243	0.000480	80.6	65.0
74.4	0.00590	0.317	0.000480	80.6	48.0
86.8	0.00588	0.320	0.000480	80.6	48.8
100.0	0.00581	0.327	0.000480	80.6	50.4

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min⁰/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).

TABELA A-5 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o quinto evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00780	0.000	0.000390	80.6	14.1
37.2	0.00810	0.036	0.000390	80.6	15.4
49.6	0.00416	0.203	0.000390	80.6	14.0
62.0	0.00658	0.221	0.000390	80.6	23.2
74.4	0.00549	0.399	0.000390	80.6	47.3
86.8	0.00552	0.385	0.000390	80.6	43.4
100.0	0.00554	0.375	0.000390	80.6	40.9

TABELA A-6 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o sexto evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00820	0.030	0.000420	80.6	16.1
37.2	0.00592	0.116	0.000420	80.6	15.7
49.6	0.00623	0.259	0.000420	80.6	28.9
62.0	0.00862	0.247	0.000420	80.6	39.7
74.4	0.00559	0.370	0.000420	80.6	47.1
86.8	0.00563	0.357	0.000420	80.6	43.8
100.0	0.00564	0.350	0.000420	80.6	41.8

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min²/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).

TABELA A-7 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o sétimo evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00751	-0.241	0.000360	80.6	11.3
37.2	0.00747	0.047	0.000360	80.6	15.5
49.6	0.00575	0.318	0.000360	80.6	32.4
62.0	0.00581	0.304	0.000360	80.6	30.6
74.4	0.00550	0.390	0.000360	80.6	46.5
86.8	0.00555	0.370	0.000360	80.6	41.5
100.0	0.00559	0.355	0.000360	80.6	38.4

TABELA A-8 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o oitavo evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00724	0.068	0.000400	80.6	19.3
37.2	0.00538	0.147	0.000400	80.6	19.8
49.6	0.00947	0.257	0.000400	80.6	64.2
62.0	0.00956	0.245	0.000400	80.6	60.0
74.4	0.00579	0.322	0.000400	80.6	51.4
86.8	0.00587	0.307	0.000400	80.6	47.6
100.0	0.00595	0.294	0.000400	80.6	44.6

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min²/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).

TABELA A-9 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o nono evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00635	0.081	0.000420	80.6	17.1
37.2	0.00470	0.173	0.000420	80.6	17.8
49.6	0.00591	0.301	0.000420	80.6	42.1
62.0	0.00596	0.292	0.000420	80.6	40.5
74.4	0.00568	0.343	0.000420	80.6	52.2
86.8	0.00577	0.325	0.000420	80.6	47.2
100.0	0.00592	0.298	0.000420	80.6	41.6

TABELA A-10 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o décimo evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5) min
	(2) k	a	(3) fo		
12.4 *					
24.8	0.00691	0.205	0.000420	80.6	31.1
37.2	0.00411	0.221	0.000420	80.6	19.5
49.6	0.00397	0.231	0.000420	80.6	19.5
62.0	0.00977	0.263	0.000420	80.6	65.6
74.4	0.00584	0.318	0.000420	80.6	47.7
86.8	0.00596	0.299	0.000420	80.6	43.6
100.0	0.00593	0.297	0.000420	80.6	42.8

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min²/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).

TABELA A-11 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o décimo primeiro evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5)
	(2) k	a	(3) fo		min
12.4 *					
24.8	0.00676	0.088	0.000400	80.6	18.1
37.2	0.00654	0.097	0.000400	80.6	18.1
49.6	0.00412	0.217	0.000400	80.6	18.2
62.0	0.01083	0.230	0.000400	80.6	56.6
74.4	0.00565	0.350	0.000400	80.6	51.9
86.8	0.00569	0.339	0.000400	80.6	48.7
100.0	0.00577	0.322	0.000400	80.6	44.5

TABELA A-12 - Características de infiltração d'água no solo determinado pelo modelo SIRTOM, para o décimo segundo evento de irrigação

Comp. (1) %	Parâmetros de infiltração			xa (4) meters	ta (5)
	(2) k	a	(3) fo		min
12.4 *					
24.8	0.00536	0.124	0.000380	80.6	16.8
37.2	0.00462	0.173	0.000380	80.6	17.3
49.6	0.00605	0.278	0.000380	80.6	36.4
62.0	0.00605	0.278	0.000380	80.6	36.5
74.4	0.00560	0.360	0.000380	80.6	54.2
86.8	0.00564	0.350	0.000380	80.6	51.0
100.0	0.00569	0.335	0.000380	80.6	47.0

* Posição da primeira estação de medição do avanço. O processo de ajuste do avanço simulado ao medido é inicializado a partir das duas primeiras estações onde foram medidos o tempo de avanço.

(1) Percentagem do comprimento do sulco a partir da seção de entrada

(2) K em (m³/min²/m)

(3) f₀ em (m³/min/m)

(4) Distância na qual o avanço completo foi simulado. O comprimento do sulco foi 80,6m.

(5) Tempo de avanço simulado no final da distância Xa (4).