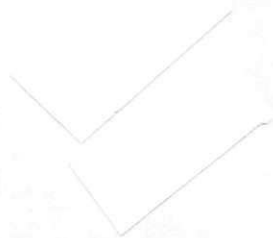


PARAMETRIZAÇÃO DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO POR
SULCOS NO VALE DO AÇU - RN



JOSÉ OSMAR COELHO SARAIVA

PARAMETRIZAÇÃO DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO POR
SULCOS NO VALE DO AÇÚ - RN

Dissertação apresentada ao Curso de
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL da Uni
versidade Federal da Paraíba, em cum
primento às exigências para obtenção
do grau de Mestre em Ciências (M.Sc)

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS SUB-ÁREA: IRRIGAÇÃO

ORIENTADOR : RICARDO AUGUSTO LOPES BRITO (EMBRAPA)

CO-ORIENTADOR : HAMILTON MEDEIROS DE AZEVEDO (UFPB)

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

AGOSTO / 1986

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

S243p Saraiva, Jose Osmar Coelho
Parametrizacao do metodo de irrigacao por sulcos no Vale
do Acu - RN / Jose Osmar Coelho Saraiva. - Campina Grande,
1986.
82 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Metodo de Irrigacao - 2. Irrigacao por Sulcos 3.
Engenharia Agricola 4. Dissertacao I. Brito, Ricardo
Augusto Lopes, Dr. II. Azevedo, Hamilton Medeiros de III.
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV.
Titulo

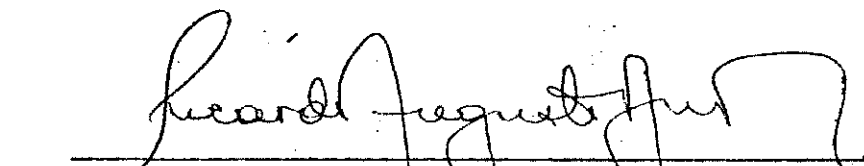
CDU 626.84(043)

PARAMETRIZAÇÃO DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO POR
SULCOS NO VALE DO AÇÚ - RN

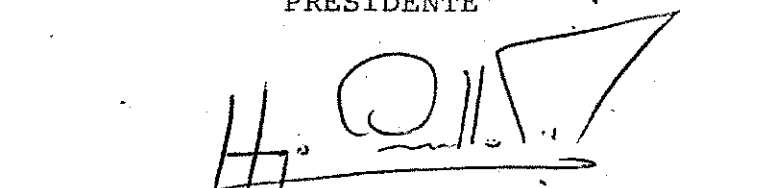
JOSÉ OSMAR COELHO SARAIVA
ENGENHEIRO AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 02 / 09 / 86

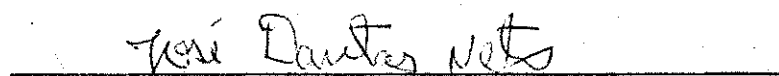
COMISSÃO:



Dr. RICARDO AUGUSTO LOPES BRITO - EMBRAPA
PRESIDENTE



Prof. HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA - UFPB
EXAMINADOR



Prof. JOSÉ DANTAS NETO - UFPB
EXAMINADOR

Para

*meus pais, pelo
incentivo*

A G R A D E C I M E N T O S

O autor agradece:

- . Ao Dr. RICARDO AGUSTO LOPES BRITO da Empresa de Pesquisa Agropecuária Brasileira - EMBRAPA, por sua inestimável colaboração de caráter técnico-científico na orientação deste trabalho;
- . Ao Professor HAMILTON MEDEIROS DE AZÊVEDO da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, por sua importante orientação e sugestões prestadas;
- . À Campina Grande Industrial S.A - CANDE, pela doação de parte do material utilizado no experimento deste trabalho (tubos janelados);
- . À Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN, por colocar à disposição seu Centro Experimental de Ipanguaçu e pelo empenho de recursos financeiros necessários para o desenvolvimento deste trabalho em sua fase de coleta de dados no campo, junto aos órgãos de pesquisa, notadamente CNPq/EMPRAPA;
- . Aos Professores FRANCISCO MONTE ELVERNE DE SALES SAMPAIO e JOSÉ DANTAS NETO, pelo apoio dado junto ao laboratório de Engenharia de Irrigação/UFPB;
- . À SIRAC - Serviços Integrados de Assessoria e Consultoria Ltda., pela sua colaboração prestada na reprodução gráfica deste trabalho;
- . E enfim, a todos os professores, amigos e pessoas que colaboraram para a efetivação deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um estudo de pesquisa sobre o método de irrigação por sulcos no Vale do Açu-RN, objetivando a obtenção de dados básicos para o manejo eficiente da irrigação.

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos em aluvião de textura média, na Base Física de Produção e Experimentação da EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO NORTE EMPARN, em Ipanguassu - RN.

Os trabalhos de campo foram realizados em sulcos de 100 m de comprimento e declividade média de 0,29%. Determinou-se as equações de avanço tomando como base a vazão de 1,52 l/s obtido pela fórmula $q_{m\acute{a}x} = \alpha S \beta$ para α e β iguais a 0,613 e 0,733, respectivamente, vazão esta que apresentou uma erosão moderada nos sulcos. Testou-se ainda as vazões de 1,45 e 1,70 l/s. A primeira não apresentou nenhuma erosão ao longo dos sulcos enquanto que com a utilização da segunda este efeito foi bem pronunciado. As equações de avanço e de infiltração acumulada, determinada com a vazão de 1,45 l/s, são da forma $L = 10,62 T^{0,86} (m)$ e $D = 4,78 T^{0,57} (mm)$, respectivamente.

A faixa de umedecimento, alcançada pela infiltração lateral d'água sob a ação de um sulco, atingiu uma largura média de 76 cm, após 70 minutos de irrigação.

A avaliação do método foi feita obedecendo a metodologia apresentada por Bernardo (1982), para valores de R variando de 1 até 4 e redução de vazão inicial de 1,45 l/s para 1,0 e 0,7 l/s, respectivamente. Os testes de campo foram realizados em sulcos de 100 m de comprimento e valores simulados, a partir da equação de avanço d'água no sulco, de 50; 75 e 125 m.

A análise dos resultados demonstrou que a vazão máxima não erosiva real para a declividade de 0,29% é de 1,45 l/s; a redução da vazão mais eficiente é de 1,45 para 1,0 l/s, para qualquer valor de R; sulcos de 100 e 125 m são recomendados com uma eficiência de alicação média de 75%.

ABSTRACT

The main purpose of this present work was the improvement of a research study about furrow irrigation method in Vale do Açu-RN, with the objective to achieve basic data to efficient management of the irrigation.

Fieldworks were developed on average texture latosols in Production and Experimentation Physical Base, of the Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-EMPARN, in Ipanguaçu-RN.

Fieldtests were conducted in 100 m length furrows with average of 0,29 percent. Advance's equations were established based on flow of 1,52 l/s obtained by formula $q_{max} = S$, where and equal to 0,613 and - 0,733, respectively. For this flow, furrows showed a moderated erosion. Besides, they were realized for flows of 1,45 and 1,70 l/s. For the first flow, furrows didn't show any erosion along of themselves, whereas for the second it was well evident. Advance's equations and accumulated water intake, determined with a flow of 1,45 l/s, were $L = 10,62 T^{0,86}$ (m) $D = 4,78 T^{0,57}$ (mm), o respectively.

The moistening strip reached by lateral water intake with the action of a furrow obtained an average width of 76 cm, after 70 minutes of irrigation.

The method's survey was done following the methodology suggested by Bernado (1982), for 50, 75, 100 and 125 m furrows length; values of R varying from 1 up to 4 and flow reduction from 1,45 to 1,0 l/s and 0,75 l/s, respectively.

The results analysis showed that the real nomerosive maximum flow for a slope of 0,29 percent was 1,45 l/s; the most efficient flow reduction was from 1,45 to 1,0 l/s to whatever value of R; furrows of 100 and 125 m length were recommended with a medium water application efficiency of 75%.

I N D I C E

	Página
DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
ÍNDICE	
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
Movimento da Água no Solo	04
Declividade	06
Vazão	09
Espaçamento dos Sulcos	11
Comprimento dos Sulcos	12
Curva de Avanço	13
Curva de Infiltração	16
Eficiência de Aplicação de Água	21
Eficiência de Condução	22
Eficiência de Distribuição	23
Eficiência de Aplicação	24
Perdas de Água na Irrigação por Sulco	25
CAPÍTULO III	
MATERIAIS E MÉTODOS	33
Caracterização da Área Experimental	33
Características Físico-Hídricas do	
Solo estudado	33
Parâmetros de Irrigação	35

	Vazão	35
	Curva de Avanço	37
	Curva de Infiltração	39
	Avaliação do Método de Irrigação por Sulco	40
	Lâmina Média Aplicada por Sulco	40
	Lâmina média Infiltrada no início e no final do sulco	41
	Preparo da Área e Instalação do Experimento	42
CAPÍTULO IV	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
	Propriedades Físico-Hídricas do Solo	44
	Parâmetros de Irrigação	44
CAPÍTULO V	CONCLUSÕES	76
	BIBLIOGRAFIA	78

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os benefícios advindos da irrigação são indiscutíveis, principalmente quando se trata de uma Região Semi-Árida como o Nordeste do Brasil. A instabilidade climática existente na Região é um critério mais que suficiente para que seja implantado no Nordeste uma exploração agrícola sob regime permanente de Irrigação. A escassez de chuvas, em sí, não representa o único grande problema que impede a expansão agrícola do Nordeste, considerando-se o potencial hídrico, superficial e subterrâneo, existente na Região e ainda subaproveitado.

O Rio Grande do Norte encontra-se localizado quase que totalmente no Polígono das Sêcas e, a exemplo dos demais estados nordestinos, a agricultura de sequeiro torna-se uma atividade de alto risco, perante as prolongadas estiagens que normalmente ocorrem na Região. O Vale do Baixo Açú constitui um dos maiores recursos de água e solo existente no Estado. A exploração agrícola praticada nesta região, sob regime de irrigação, ainda é feita sem obedecer a critérios de racionalização e manejo de aplicação de água, refletindo, portanto, em baixa produtividade das culturas e elevando os perigos de salinização dos solos. Uma das metas dos órgãos governamentais é a implantação, na Região, do Projeto Baixo Açú, com

fins de aproveitamento dos recursos disponíveis através da agricultura irrigada. A viabilização deste projeto representa um dos maiores empreendimentos do setor no Nordeste e atualmente, encontra-se concluída na área a Barragem Engenheiro Armando Gonçalves, cuja capacidade de armazenamento é de 2.4 bilhões de m³.

O método de irrigação por sulcos, sistema empregado na maioria dos projetos governamentais implantados no Nordeste apresenta, geralmente, baixa eficiência de aplicação e de distribuição de água, quando esta não é uma característica própria do método, sendo as causas principais que levam à existência deste quadro o dimensionamento e/ou o manejo inadequado do sistema.

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um estudo de pesquisa sobre o método de irrigação por sulcos no Vale do Baixo Açú-RN, com o objetivo de se obter os dados básicos para o manejo eficiente da irrigação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prática de irrigação tem como objetivo básico a reposição, ao solo, do déficit de umidade que resulta da insuficiência de precipitação para compensar a evapotranspiração dos cultivos. Complementarmente, a irrigação assegura a lixiviação de sais para manter o balanço no solo e garantir, em geral, melhores condições físicas para o manejo e melhores condições ambientais para o desenvolvimento dos cultivos (Grassi, 1972).

Em se tratando de agricultura, não basta que a semente seja ótima, que o terreno seja fértil e que se processe um perfeito combate às pragas e doenças, a fim de que a produção satisfaça o ponto de vista econômico. Para produzir economicamente, torna-se essencial satisfazer a fisiologia do vegetal, fornecendo à planta, no momento oportuno, a quantidade de água necessária para que ela se desenvolva normalmente e produza o máximo de seu rendimento (Daker, 1976).

O método de irrigação por sulcos constitui o processo de aplicação de água mais conhecido e mais usado em todo o mundo, sendo inclusive um dos poucos métodos tradicionais no Brasil. Adapta-se bem aos solos com boa capacidade de infiltração e baixa erodibilidade (Olitta, 1978).

Não é fácil compreender, pela sua complexidade, o regime hidráulico da irrigação por superfície e, não obstante, para que um projeto de irrigação obtenha êxito, depende fundamentalmente do conhecimento dos princípios que o regem (Israelsen e Hansen, 1965). Os principais parâmetros que caracterizam o método de irrigação por sulcos são: movimento da água no solo, declividade, vazão, espaçamento e comprimento dos sulcos, infiltração e avanço da água no sulco, eficiência de aplicação e de distribuição de água e as perdas por percolação profunda e por escoamento superficial no final do sulco. Esta última pode ser eliminada com a utilização de sulcos fechados no final, supondo-se um manejo adequado da irrigação.

2.1 - MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO

O movimento da água no solo ocorre quando existem diferenças de potencial entre diversos pontos do sistema. A água tende a mover-se de pontos com alto potencial para pontos de menor potencial. Considerando que a componente de sucção, representada pelos gradientes de potencial matricial, osmótico e térmico, pode exceder a componente gravitacional, a água pode mover-se verticalmente para cima e para baixo ou permanecer em equilíbrio, quando a componente de sucção balanceia a força de gravidade (Gavande, 1979).

Segundo Olitta (1978), o movimento da água no solo é particularmente importante na irrigação por sulcos, com vistas a determinar a extensão do volume de solo molhado na ir

rigação, e também com relação a velocidade de infiltração da água, uma vez que isto determina o tempo necessário para a aplicação de uma determinada lâmina de irrigação.

A água infiltra-se no sulco através do perímetro molhado do mesmo. A interface entre o solo úmido e seco move-se de cima para baixo, desde o perímetro molhado, determinada pela frente de umedecimento que delimita seções transversais, circulares ou elípticas. O movimento da água, em solos não saturados, é causado por gradientes de potencial matricial e gravitacional. O movimento ascendente se deve a gradientes de potencial matricial, enquanto o movimento descendente depende de ambos os gradientes de potencial, matricial e gravitacional (Grassi, 1972).

Darcy (1956), citado por Hillel (1971), foi o primeiro a estabelecer uma equação para o movimento da água no solo dada pela seguinte relação:

$$q = K \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

Onde:

q = é a densidade de fluxo de água.

K = fator de proporcionalidade chamado de condutividade hidráulica.

$\frac{\Delta H}{L}$ = gradiente hidráulico.

O conhecimento do fluxo de água no solo pela equação de Darcy não é o suficiente em estudos dinâmicos da água no solo. Em condições de solos não saturados, situação mais co

num no campo, é importante quantificar a variação do conteúdo de umidade com o tempo. Reichardt (1975), apresenta uma equação diferencial mais geral do movimento da água no solo da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right)$$

em que:

θ = é o conteúdo de umidade do solo.

t = tempo.

K_i = condutividade hidráulica do solo nas direções $i = x, y$ e z .

ψ = potencial total de água no solo.

O movimento da água dentro do perfil do solo, após uma chuva ou irrigação, responsável pelo umedecimento das camadas mais profundas, é chamado de redistribuição da água no solo ou de drenagem interna. A velocidade e duração desse processo determinam a capacidade efetiva de armazenamento do solo, propriedade esta de vital importância na economia de água para as plantas. A capacidade de armazenamento de água no solo não é uma quantidade fixa ou propriedade estática do solo, mas sim um fenômeno temporário, determinado pela dinâmica do movimento de água no solo (Reichardt, 1975).

2.2 - DECLIVIDADE

Considerando que os princípios que determinam o movimento d'água em canais, também são aplicáveis aos sulcos e um dos principais parâmetros que determinam a velocidade da água é a declividade, a mesma pode ser expressa pela equação de Manning, citado por Bernardo (1982).

$$V = n^{-1} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

em que:

V = é a velocidade da água.

Rh = raio hidráulico.

n = coeficiente de rugosidade da superfície.

S = declividade.

Em geral, a declividade está associada com a natureza do solo, com o comprimento do sulco e a quantidade de água a ser aplicada em cada sulco. Até certos limites, quanto mais pesado for o solo, mais curtos serão os sulcos e menor deverá ser a declividade (Daker, 1976).

A erosão dos sulcos está associada com a velocidade da água e com a maior ou menor erodibilidade do solo. Para evitar erosão excessiva nos sulcos, sua declividade, de modo geral, não deve exceder a 2%, salvo em tipos especiais que permitem maiores declividades (Bernardo 1982). Segundo Zimmerman (1966), a forma ideal para uma distribuição uniforme da água ao longo do sulco seria uma declividade constante ou que aumentasse gradualmente. A declividade aceitável depende da força erosiva

da água, conforme a seguinte equação (Olitta, 1978).

$$F_e = \gamma \cdot h \cdot S$$

Onde:

F_e = força erosiva da água.

γ = peso específico da água.

S = declividade.

h = altura da lâmina d'água no sulco.

Segundo Israelsen e Hansen (1965), em solos onde os sulcos têm declividade de 10 a 15% utiliza-se com êxito a irrigação, desde que sejam aplicadas pequenas vazões e observando-se a erosão que se produz. As declividades situadas entre 0,5 a 3% são as mais aceitáveis e, em alguns tipos de solos se pode irrigar satisfatoriamente com declives na faixa de 3 a 6%. De um modo geral, para sulcos de determinada forma, comprimento e tipo de solo, existe a possibilidade de operar com as mais variáveis declividades. Quando a força erosiva da água alcança limites perigosos, pode-se diminuir a declividade, mudando a direção dos sulcos, obedecendo os seguintes critérios, (Grassi, 1972):

1. Sulcos em direção normal à máxima declividade;
2. Sulcos em direção diagonal à máxima declividade;
3. Direção dos sulcos dependendo de outros fatores do projeto.

De acordo com Booher (1974), a maneira mais eficiente para aplicar a água é quando os sulcos têm uma declividade uniforme. As declividades não uniformes causam, geralmente,

profundidades desuniformes de distribuição da água ao longo do sulco, e pode ocorrer que, como consequência da erosão nas partes de maiores declividades, haja depósito de terra nas partes mais baixas dos sulcos.

2.3 - VAZÃO

A vazão aplicada no sulco é um dos fatores mais importante para se obter uma eficiente irrigação. Maiores uniformidades de aplicação de água são obtidas quando se usa irrigação com redução de vazão, ou seja, aplica-se inicialmente a maior vazão que o sulco possa conduzir, sem transbordar e sem causar erosão e, quando a frente de avanço atingir o final do sulco, a vazão inicial é reduzida.

Os fatores mais importantes que estão intimamente ligados com a erosão do solo são a declividade e o tipo de solo e estes limitam a vazão máxima admissível (Silva e Duarte, 1980).

Segundo Olitta (1978), como a velocidade de infiltração decresce exponencialmente em função do tempo, o ideal seria utilizar vazões decrescentes durante a irrigação para evitar perdas excessivas por escoamento no final do sulco. A vazão máxima, permitida no início da irrigação, deve ser a que não causará erosão no sulco. A vazão máxima não erosiva é função da declividade do sulco e da erodibilidade do solo.

Gardner e Lauritzen (1946), citados por Hamad e Stringham (1978), estudando o efeito da vazão e da declividade na erosão, em sulcos de irrigação, propuseram a seguinte

te equação empírica, para determinação da vazão máxima não erosiva:

$$q_{\text{máx}} = \alpha S^{\beta}$$

onde:

$q_{\text{máx}}$ = vazão máxima não erosiva.

S = declividade do sulco.

α e β = são coeficientes em função do tipo de solo, sendo $0 < \alpha < 1$ e $-1 < \beta < 0$.

Hamad e Stringham determinaram os valores de α e β para seis grupos de solos diferentes.

Cridlle *et alii* (1956), citado por Bernardo (1982), propuseram uma equação única para os diferentes tipos de solos, da forma:

$$q_{\text{máx}} = \frac{0,631}{S}$$

onde:

$q_{\text{máx}}$ = vazão máxima não erosiva.

S = declividade do sulco.

Esta equação, segundo Hamad e Stringham (1978), superestima a vazão máxima não erosiva, para declividades inferiores a 0,5% e geralmente subestima a vazão máxima não erosiva para declividades superiores a 0,5%.

Millar *et alii* (1978), encontraram, para um latosso

lo, que a vazão máxima não erosiva e mais eficiente foi de finida a partir dos dados de testes de avanço de água nos sulcos, sendo que as combinações mais eficientes de vazão - declividade foram: 2,5l/s - 0,15%, 2l/s - 0,24% e 1,5l/s - 0,37%.

2.4 - ESPAÇAMENTO DOS SULCOS

O espaçamento entre sulcos dependerá, geralmente, do tipo de equipamento que será usado nos tratos culturais, da cultura a ser irrigada e do perfil de umedecimento do solo (Daker, 1976; Olitta, 1978; Bernardo, 1982).

De acordo com Grassi (1972), o espaçamento dos sulcos, deve estar relacionado com a natureza física e profundidade do solo que se deseja irrigar, de acordo com a profundidade radicular do cultivo. Com base em critérios estritamente edáficos, o espaçamento deve ser menor em solos arenosos que nos solos de textura fina.

Segundo Zimmermam (1966), os solos arenosos, leves e calcários necessitam um espaçamento menor entre sulcos, visto que estes solos permitem uma excessiva percolação vertical com muito pouco movimento capilar lateral da água. Boers e Millar (1974) observaram que, para solo aluvião, a infiltração lateral não alcançou uma distância maior que 20cm, de modo que uma área considerável ficava sem ser atingida pela irrigação, no caso de sulcos espaçados de 60cm.

Veihmeyer e Herdrickson (1970), citados por Granados (1971), determinaram que a infiltração lateral em solos are

nosos chegou a uma distância de 30cm desde a borda do sulco enquanto que em solos argilosos esse avanço alcançou 75cm , o que evidencia muito bem a dependência do espaçamento dos sulcos com o tipo de solo.

2.5 - COMPRIMENTO DOS SULCOS

O comprimento a ser dado aos sulcos de irrigação depende da natureza do solo, incluindo sua resistência à erosão e capacidade de drenagem; de sua declividade e do volume de água a ser aplicado (Daker, 1976). Segundo Bernardo (1982), os principais fatores que devem ser considerados na determinação do comprimento do sulco são a forma e o tamanho da área a ser irrigada, o tipo de solo, a declividade do sulco, a vazão a ser aplicada e a cultura a ser irrigada.

Booher (1974), afirma que o comprimento pode aumentar à medida que aumenta a profundidade média de água a ser aplicada. Como a quantidade a aplicar está relacionada com a capacidade de retenção de água pelo solo e com a profundidade de enraizamento da planta, pode-se usar sulcos muito mais longos para plantas de raízes profundas em solos argilosos que para as de raízes superficiais em solos arenosos.

Se os sulcos são curtos, o sistema de distribuição de água é constituído por grande número de canais ou canalizações, ocupando parte da área e requerendo uma mudança mais frequente de fornecimento de água de um sulco para outro. Se o comprimento é demasiadamente longo, ocorrem excessiva perda por percolação de água no início do sulco (Olitta, 1978).

Em razão das maiores perdas por percolação, o comprimento dos sulcos é menor em solos de textura grossa do que nos de textura fina. Para solos de igual textura, o comprimento dos sulcos diminui à medida que aumenta a declividade, ou seja, quando aumenta a força erosiva da água (Grassi, 1972).

Israelsen e Hansen (1965), citam que o comprimento dos sulcos varia desde 30m até 400m em cultivos intensivos. Os comprimentos mais frequentes estão compreendidos entre 90 e 150m. Em geral, na determinação do comprimento dos sulcos, utiliza-se a recomendação de Cridlle *et alii* (1956) citado por Olitta (1978), em que o comprimento deve ser tal que a água atinja o seu final em 1/4 do tempo de irrigação.

2.6 - CURVA DE AVANÇO

A representação gráfica da distância que a água percorre em função do tempo denomina-se curva de avanço, e esta mostra a diminuição da velocidade de avanço com o tempo. Este comportamento é independente dos fatores hidráulicos e se deve à diminuição da vazão com a distância (Grassi, 1972). Segundo Willardson e Bishop (1967), o avanço da água nos sulcos é influenciado pela dimensão do fluxo, infiltração do solo, rugosidade e comprimento do sulco.

Bishop (1962), desenvolveu uma metodologia relacionando o tempo necessário para que seja aplicada uma determinada lâmina de irrigação na extremidade final dos sulcos e o tempo de avanço ao longo destes sulcos.

O estudo das características hidráulicas da irrigação

por sulcos permitiu a vários pesquisadores desenvolver um equacionamento matemático do avanço da água, considerando as variáveis envolvidas no processo, tais como: vazão, infiltração, forma e comprimento do sulco, declividade e rugosidade da superfície.

Cridlle *et alii* (1956) e Bishop (1962), citados por Fok e Bishop (1965), afirmam que o comprimento percorrido pela frente de umedecimento é influenciado pela eficiência de aplicação, taxa de infiltração d'água e pelo tempo de irrigação. Estudos realizados (Fok e Bishop, 1965; Grassi, 1972; Olitta, 1978; Bernardo, 1982), concluíram que o avanço da frente de água no sulco é uma função exponencial de variável tempo, da forma:

$$L = C T^m$$

em que:

L = comprimento do sulco percorrido pela água no tempo T.

C e m = coeficientes empíricos da função de avanço.

Nugtereng (1969), citado por Grassi (1972), encontrou que "C" depende da declividade, vazão, características hidráulicas do fluxo e rugosidade da superfície, enquanto que "m" está relacionado com as características físicas do solo expressa em função da infiltração.

Willardson e Bishop (1967), apresentaram uma equação empírica da seguinte forma:

$$t_x = a (e^{cx} - 1)$$

onde:

t_x = tempo necessário para a água percorrer a distância x .

x = distância percorrida pela frente de avanço.

e = base do logaritmo natural.

a e c = são constantes empíricas.

Grassi *et alii* (1965) citados por Azevedo (1975), en contraram uma equação racional, através de análise dimensional, para o processo de avanço da água, da forma:

$$D = \frac{K}{I_p} \cdot Q^{1,722} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \cdot t_e^{0,722}$$

onde:

D = comprimento do sulco percorrido pela água.

K = coeficiente.

Q = vazão.

R = raio hidráulico do sulco.

S = declividade do sulco.

t_e = tempo de escoamento.

I_p = infiltração.

Fok e Bishop (1965), baseando-se nas relações obtidas por Christiansen *et alii* (1956), para o avanço da água no sistema de irrigação por "bordas", desenvolveram um método para o avanço da água no sistema de irrigação por sulcos, que leva em consideração a forma e a rugosidade dos mesmos. A expressão é da seguinte forma:

$$L = \frac{Q t}{\frac{u \cdot D_0^{m'}}{1+b} + \frac{w F K t^{n+1}}{(n+1)(n+2)}}$$

onde:

L = comprimento do sulco coberto pela água durante a irrigação.

Q = vazão de entrada no sulco.

t = tempo de aplicação de água.

u e m' = são coeficientes de área da secção transversal do sulco.

D₀ = profundidade normal da lâmina d'água no sulco.

w = parâmetro que pode ser o perímetro molhado, a largura da água no sulco ou o espaçamento dos sulcos, dependendo do processo utilizado na determinação da equação de infiltração.

F = fator de correção para a lâmina média de água absorvida pelo solo durante a irrigação.

K e n = são constantes empíricas da equação de infiltração.

b = expoente da função de avanço.

2.7 - CURVA DE 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 fator muito importante na irrigação, visto que ela determina o tempo em que se deve manter a água na superfície do solo, de modo

que se aplique a quantidade desejada.

De acordo com Israelsen e Hansen (1965), a velocidade de infiltração depende de muitos fatores, entre os principais, a lâmina de água empregada na irrigação, a temperatura da água e do solo, a estrutura, textura e conteúdo de umidade do terreno e a existência de camadas impermeáveis no perfil do solo.

Em rigorosa análise, na irrigação por sulco, o movimento da água não é permanente. Por outro lado, a velocidade de infiltração varia em função do tempo. Em igualdade de condições de solo e com o mesmo conteúdo de umidade, Grassi (1972), mostra que a velocidade de infiltração da água nos sulcos é função da vazão, declividade, rugosidade e largura do sulco.

Erie (1962), citado por Resende (1972), afirma que os fatores mais importantes relacionados com a infiltração da água no solo são: condições da superfície do solo, características internas do solo, conteúdo de umidade, temperatura do solo e da água e duração de aplicação da água.

Segundo Gurovich (1979), a capacidade de infiltração de um solo e sua variação no tempo depende do conteúdo inicial da água e da tensão, assim como da textura, estrutura e uniformidade do perfil do solo. Em geral, a velocidade de infiltração da água no solo é alta nos estágios iniciais de infiltração, especialmente quando o solo está seco, e tende a decrescer e, eventualmente, a alcançar assintoticamente uma velocidade constante, que se chama geralmente velocidade de infiltração básica, ou seja, o processo alcança uma velocidade

de constante que aparentemente não diminui com o tempo.

Cristiansen e Bourrier (s.d), citados 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 colóides).
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 retardam a circulação da água no solo.

A penetração da água no solo durante o processo de infiltração não é uniforme. Bodman e Colman (1943), citados por Skaggs et alii (1980), dividiram em quatro zonas o processo de infiltração da água, ou seja:

- I. Zona saturada: camada superficial do solo, de pequena profundidade, na qual o conteúdo de umidade rapidamente alcança o grau de saturação;
- II. Zona de transição: região de rápido decréscimo do conteúdo de umidade do solo, alcançando também pequenas profundidades;
- III. Zona de transmissão: nesta zona o conteúdo de umi

dade se mantém praticamente constante e é a que alcança maiores profundidades. Existe uma relação aproximadamente linear entre o conteúdo de umidade e a permeabilidade nesta fase (Israelsen e Hansen, 1965).

IV. Zona de umedecimento: o conteúdo de umidade decresce consideravelmente e esta fase termina com a frente de umedecimento que é o limite visível da penetração da água no solo.

Existem vários métodos e maneiras para determinar a velocidade de infiltração de um solo e inúmeras fórmulas foram desenvolvidas para expressar este fenômeno físico. Bernardo (1982) menciona que, para irrigação por sulcos, a velocidade de infiltração deve ser determinada pelo método da "Entrada e Saída" d'água no sulco, ou pelo método do "Infiltrômetro de Sulco", considerando que nesses casos tanto ocorre infiltração na direção vertical como na horizontal.

Dentre as equações que quantificam a infiltração da água em um solo, a mais simples e mais empregada na prática é a de Kostiaikov (1932), citado por Israelsen e Hansen (1965), da forma:

$$D = K t^n$$

onde:

D = infiltração acumulada no tempo T

K e n = são coeficientes que dependem das características físicas do solo.

Segundo Gavande (1979), o parâmetro "K" está associada com a infiltração durante o intervalo de tempo inicial, portanto, depende da estrutura e da condição 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 tem somente poros pequenos. O parâmetro "n" indica a forma com que a velocidade se reduz 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 a medida que aumentou o conteúdo inicial de água no solo. Enquanto que o expoente "n" não foi afetado com o conteúdo inicial de água do solo.

Existem várias outras equações propostas na literatura, que envolvem estudos mais complexos do processo de infiltração da água no solo, como a equação de Green e Ampt (1911), citado por Moore (1981), que tem a seguinte forma:

$$K \cdot t = F - S_w \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left(1 + \frac{F}{S_w \cdot \Delta\theta} \right)$$

onde:

K = condutividade hidráulica da zona umedecida.

t = tempo.

F = volume de infiltração.

S_w = potencial capilar da frente de umedecimento.

$\Delta\theta$ = déficit inicial de umidade.

ou a equação de Horton 1939, 1940, citado por Skaggs *et*

alii (1980), expressa da seguinte forma:

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-\beta t}$$

em que:

f = infiltração acumulada.

f_c = infiltração final ou básica.

f_o = infiltração inicial (t=0)

β = parâmetro do solo em função da diminuição da velocidade de de infiltração.

e = base de logarítmo natural.

t = tempo

A equação de Phillip (1959), citado por Hillel(1971) , tem a forma:

$$I = S \cdot t^{1/2} + K \cdot t$$

onde:

I = infiltração acumulada.

S = parâmetro chamado de "sorptividade" que indica a capacidade de um solo homogêneo em absorver ou liberar água.

K = condutividade hidráulica da zona de transmissão.

t = tempo.

2.3 - EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

A eficiência de aplicação de água de irrigação está determinada pela qualidade e custo do trabalho, facilidade

de manejo da água, cultivos irrigados e características do solo. O controle e o manejo adequado da água de irrigação exigem métodos que permitam viabilizar a prática de irrigação, desde a sua fonte de captação até a sua utilização pelas plantas (Israelsen e Hansen, 1965). Segundo Bos e Nugtere (1978), quando se planeja um sistema de irrigação, o maior problema é decidir que eficiência de aplicação de água deve-se utilizar nos cálculos, considerando que são vários os fatores que intervêm na sua escolha, sendo as condições de solo, clima, topografia e manejo as mais importantes.

Em todo sistema de irrigação, ocorrem perdas e desperdícios de água que devem ser considerados, a fim de determinar a viabilidade técnica, econômica e social do projeto. A eficiência de uso da água de um projeto de irrigação, depende não só das condições edafo-climáticas da área, construção e operação da obra, mas de fatores de ordem agrícola, econômico, social, legal e institucional (Grassi, 1968).

Existem vários parâmetros que devem ser determinados, para permitir analisar a eficiência de irrigação e, segundo Bernardo (1982), os mais importantes são:

2.8.1 - Eficiência de Condução:

É a estimativa de perda d'água entre a captação e a entrada na parcela de irrigação, expressa pela seguinte equação:

$$E_c = \frac{V_a}{V_d} \times 100$$

onde:

E_c = Eficiência de condução.

V_a = Volume aplicado na área irrigada.

V_d = Volume d'água derivada da fonte.

A eficiência de condução é afetada por perdas por infiltração através das paredes dos canais, por transbordamento, vazamentos em tubulações e em menor intensidade pela evapotranspiração da vegetação nativa que se propaga nos canais.

2.8.2 - Eficiência de Distribuição:

É a estimativa da uniformidade de infiltração ao longo do sulco. Sob condições apropriadas de manejo, o valor da eficiência de distribuição, normalmente, deveria ser maior do que 70%, exceto em solos muito permeáveis. É dada pela seguinte equação:

$$E_d = \frac{D_f}{(D_i + D_f)/2} \times 100$$

onde:

E_d = Eficiência de distribuição.

D_f = Lâmina infiltrada no final do sulco.

D_i = Lâmina infiltrada no início do sulco.

2.8.3 - Eficiência de Aplicação:

É a percentagem, do total de água aplicado na parcela, que é considerada útil às culturas. O valor mínimo geralmente recomendado para a eficiência de a-

plicação é de 60%, sendo que o ideal seriam valores acima de 70%. É expressa pela seguinte relação:

$$Ea = \frac{Df}{Dm} \times 100$$

onde:

Ea = Eficiência de aplicação.

Df = Lâmina infiltrada no final do sulco.

Dm = Lâmina média aplicada por sulco.

A Lâmina média aplicada por sulco, quando se usa vazão constante, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Dm = \frac{Tr \times q}{C \times E}$$

em que:

Dm = Lâmina média aplicada no sulco.

Tr = Tempo de irrigação.

q = Vazão aplicada.

C = Comprimento do sulco.

E = Espaçamento entre sulcos, ou largura da faixa de umedecimento dos sulcos.

Quando se usa irrigação com redução de vazão, a lâmina média aplicada durante a irrigação poderá ser calculada pela seguinte equação:

$$D_m = \frac{(T_2 - T_1) \cdot q_r + T_1 \cdot q_i}{C \times E}$$

onde:

D_m = Lâmina média aplicada no sulco

q_i = Vazão inicial.

q_r = Vazão reduzida.

T_1 = Tempo transcorrido até o momento da redução da vazão.

T_2 = Tempo total de irrigação.

Hansen (1953), citado por Resende (1972), admite que uma baixa eficiência de distribuição d'água, em um projeto de irrigação, ou inadequada aplicação, muitas vezes, podem tornar a irrigação indesejável. Nenhum aspecto das eficiências de irrigação pode ser abandonado, para que se possa ter o máximo de rendimento na produção.

Em geral, nas áreas irrigadas do Nordeste, as eficiências são baixas. Leal (1979), avaliando a eficiência de irrigação no Projeto Bebedouro em Petrolina - Pernambuco, encontrou uma eficiência média de aplicação de 33% e uma eficiência de distribuição média de 48%.

Azevedo et alii (1975) recomendam, para melhorar a eficiência de irrigação, a obtenção de dados para fins de dimensionamento de projetos, em solos já irrigados e realização de testes de infiltração a conteúdo de umidade na faixa de 50 a 70% de água disponível, o que representará melhor as condições futuras de manejo do solo sob irrigação.

2.9- PERDAS DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCO

Na irrigação por sulcos, as perdas de água poderão ocorrer de três formas distintas: por evaporação durante a irrigação; por percolação, abaixo da zona do sistema radicular; e por escoamento no final do sulco. As perdas por evaporação normalmente não são consideradas e, as perdas por escoamento superficial no final do sulco, podem ser reduzidas mediante um manejo criterioso da irrigação podem ser aproveitadas em algumas situações, ou eliminadas no caso de sulcos fechados no final, pressupondo-se um manejo adequado dos mesmos.

De acordo com Bernardo (1982), perdas d'água por percolação resultarão em perdas de nutrientes por lixiviação, para as camadas abaixo da zona radicular das culturas, bem como problemas de afloração do lençol freático nas áreas à jusante da que está sendo irrigada, ou na própria área de irrigação, criando problemas potenciais de salinização e causando, com isso, baixo rendimento da cultura e baixa eficiência de irrigação.

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 das raízes. Withers e Vipond (1978), citam que as perdas por percolação (que são uma 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.

Bishop (1962), utilizando as características de infiltração d'água do solo, e o conceito R, propôs a seguinte equação para determinar as perdas por percolação:

$$Pd = \frac{(R + 1)^n - R^n}{(R + 1)^n + R^n} \times 100$$

em que:

Pd = Perda por percolação.

n = Expoente da equação de infiltração acumulada.

R = Relação entre o tempo exigido para aplicação da lâmina desejada no final do sulco e o tempo de avanço d'água no sulco.

Bernardo (1982), apresenta um método mais aproximado, que consiste em dividir o tempo de avanço e o tempo de irrigação em quatro intervalos cada um, tomando-se uma variação linear dentro de cada intervalo, o que será bem mais preciso do que tomar uma variação linear única em todo o tempo de avanço, ou no tempo exigido para a aplicação da lâmina de irrigação. O comprimento de cada setor, quando divide-se o tempo de avanço em quatro intervalos iguais, é calculado utilizando a equação de avanço no sulco, ou seja:

$$L_1 = C(0.25 T_a)^m$$

$$L_2 = C(0.50 T_a)^m - (0.25 T_a)^m$$

$$L_3 = C(0.75 T_a)^m - (0.50 T_a)^m$$

$$L_4 = C(T_a)^m - (0.75 T_a)^m$$

onde:

L_1, L_2, L_3, L_4 = São os comprimentos dos setores quanto divide-se o tempo de avanço em quatro intervalos iguais.

C = Coeficiente da equação de avanço d'água no sulco.

T_a = Tempo de avanço.

m = Expoente da equação de avanço d'água no sulco.

e, as lâminas infiltradas nas extremidades desses setores podem ser calculadas pelas seguintes equações, em função do valor de R , ou seja:

$$D_1 = d_1 (R + 1)^n$$

$$D_2 = d_1 (R + 0,75)^n$$

$$D_3 = d_1 (R + 0,50)^n$$

$$D_4 = d_1 (R + 0,25)^n$$

$$D_f = d_1 R^n$$

sendo:

D_1 = Lâmina infiltrada no início do trecho L_1 (início do sulco).

D_2 = Lâmina infiltrada no início do trecho L_2

D_3 = Lâmina infiltrada no início do trecho L_3

D_4 = Lâmina infiltrada no início do trecho L_4

D_f = Lâmina infiltrada no final do trecho L_4 (final do sulco)

d_1 = Constante igual a $K T_a^n$

- n = Expoente da equação de infiltração acumulada.
 K = Coeficiente da equação de infiltração acumulada.
 Ta = Tempo de avanço d'água no sulco.
 R = Relação entre o tempo necessário para aplicar uma determinada lâmina de irrigação no final do sulco e o tempo de avanço d'água até o final do sulco.

Utilizando o procedimento anterior proposto por Bernardo (1982), a perda por percolação é dada pela seguinte equação:

$$P_p = \frac{(1,75L_1 + 1,25L_2 + 0,75L_3 + 0,25L_4)}{2 RL} \times n \times 100$$

sendo:

- Pp = Perda por percolação.
 Li = Setores em que foi dividido o sulco, i = 1, 2, 3 e 4
 n = Expoente da equação de infiltração acumulada.
 R = Relação entre o tempo exigido para aplicação da lâmina desejada no final do sulco e o tempo de avanço d'água no sulco.
 L = Comprimento total do sulco.

As perdas por percolação podem ser obtidas também pela seguinte equação, segundo Bernardo (1982):

$$P_p = \frac{D_p}{D_m} \times 100$$

onde:

P_p = Perda por percolação.

D_p = Lâmina percolada.

D_m = Lâmina média aplicada por sulco.

As perdas por escoamento superficial no final do sulco ("Runoff"), estão associadas, geralmente, a baixa eficiência de aplicação de água. A minimização destas perdas podem ser obtidas, principalmente, pela redução da vazão inicial aplicada no sulco, para um valor de acordo com as características de infiltração do solo.

Willardson e Bishop (1967), propuseram uma equação geral para estimar a percentagem d'água perdida por escoamento superficial da seguinte forma:

$$Pr = \left(\frac{Tr}{Ta + Tr} \right) \left(\frac{qf}{qi} \right) \times 100$$

onde:

Pr = Perdas por escoamento superficial no final do sulco.

Tr = Tempo exigido para aplicação da lâmina de irrigação no final do sulco.

Ta = Tempo de avanço d'água no sulco.

qf = Vazão que sai no final do sulco.

qi = Vazão aplicada por sulco.

A estimativa da percentagem d'água perdida por escoamento superficial no final do sulco pode ser obtida, segundo Bernardo (1982), pela seguinte relação:

$$Pr = \frac{Dr}{Dm} \times 100$$

onde:

Pr = Perdas por escoamento superficial no final do sulco.

Dr = Lâmina média equivalente ao escoamento.

Dm = Lâmina média aplicada por sulco.

Soares *et alii* (1983), determinaram que, a reutilização da água escoada ocasionou uma eficiência de irrigação de 65% para R igual a 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), avaliando o sistema de irrigação por sulco, em função do valor de R, sobre as perdas de água por percolação e por "runoff", concluiu que, as perdas por percolação tenderam a decrescer e as perdas por escoamento a crescer, quando o valor de R aumentou, para um mesmo comprimento de sulco, sob condições de vazão constante.

Brito e Oliveira (1980), utilizando dados de Willardson e Bishop (1967), analisaram estatisticamente os parâmetros de características de infiltração do solo, velocidade de avanço da água, percolação profunda e escoamento superficial e seus efeitos na eficiência de aplicação por sulco, concluindo que a percolação profunda evidenciou-se como a perda mais significativa, principalmente, para o caso de sulcos longos. A FIGURA 1 mostra o esquema ilustrativo da irrigação no sulco.

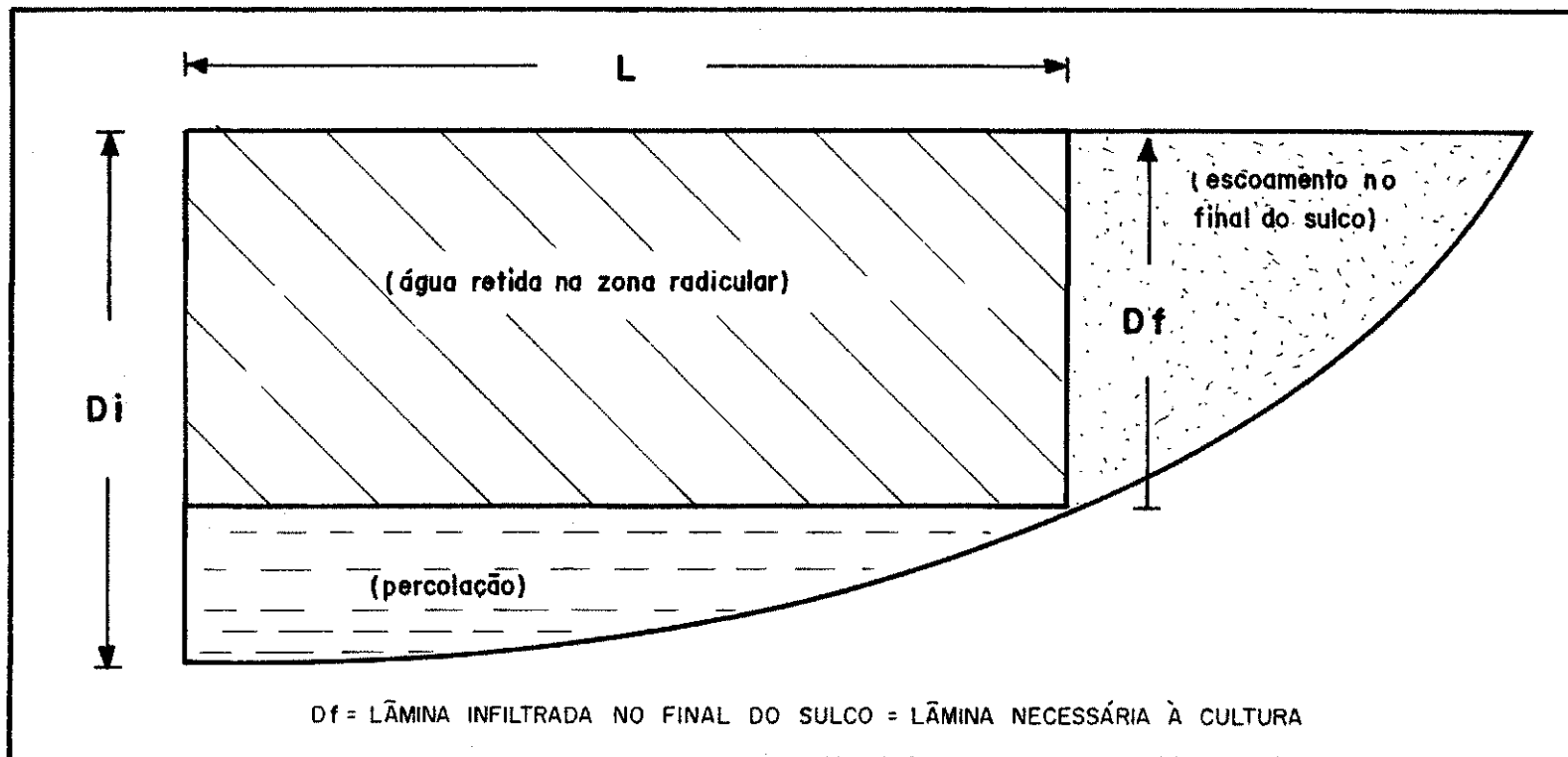


FIG. 1
Esquema ilustrativo da irrigação no sulco.

CAPÍTULO III

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

As atividades de campo do presente trabalho foram desenvolvidas na Base Física de Produção e Experimentação da EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO NORTE - EMPARN, em Ipanguaçu-RN, num aluvião de textura média. Suas coordenadas geográficas correspondem à latitude de 5°31' Sul, longitude de 36°52' Oeste de Greenwich e altitude de 67 metros acima do nível do mar. As características climáticas da Região do Vale do Açu, na qual o referido município está localizado, são mostradas na FIGURA 2.

3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO ESTUDADO

A análise granulométrica do perfil do solo, até a profundidade de 100 cm, em intervalos de 20 cm, foi feita através do método da pipeta (Day, 1965).

A capacidade de campo foi determinada "in situ". O método consistiu em saturar o solo até uma determinada profundidade, utilizando uma bacia de 2 m² e cobrindo com plástico para evitar a evaporação. O teor de umidade do solo foi determinado mediante o método gravimétrico, em cada camada de 20 cm, em intervalos de 24 horas, até a profundidade de

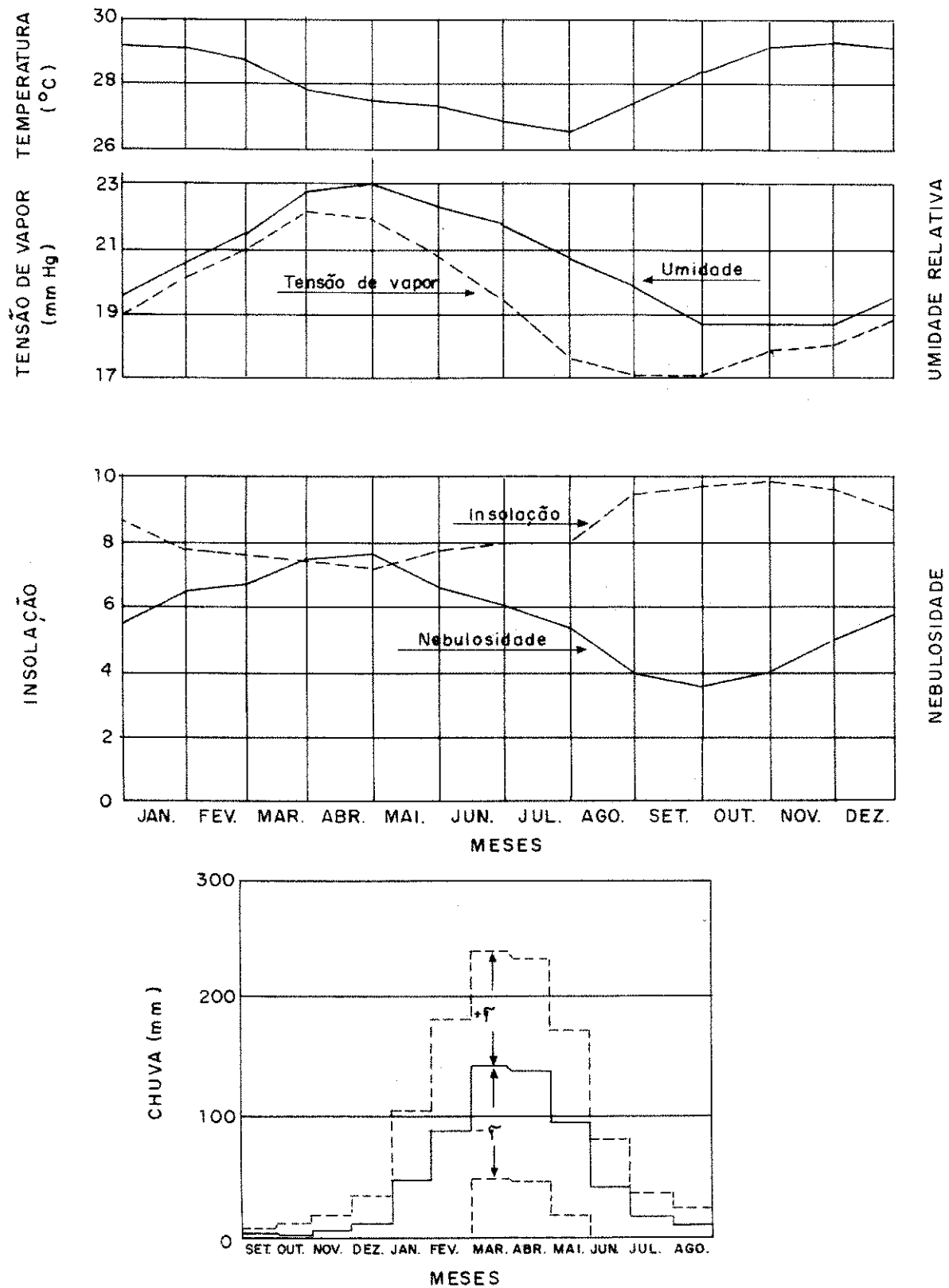


FIG. 2 - Climatograma da Região do Açú fonte: SALINAS E BRITO, 1982 (adaptado).

100 cm. Quando a variação do teor da umidade tornou-se mínima, durante duas repetições, a média destes foi considerada a capacidade de campo.

O ponto de murcha permanente foi retirado da curva de retenção de umidade, obtida pelo método da membrana de pressão descrito por Richards (1947), correspondente à pressão de 15 atmosferas.

A densidade do solo foi determinada, para cada profundidade, através do cilindro amostrador de Uhland.

3.3 - PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO

3.3.1 - Vazão:

A aplicação d'água nos sulcos foi feita através de tubos janelados reguláveis, tendo como fonte de captação um poço amazonas. Para a mensuração das vazões aplicadas, utilizou-se medidores de vazão WSC Flume modelo A. A FIGURA 3 mostra a curva carga x vazão dos medidores utilizados.

As vazões aplicadas nos sulcos foram selecionadas partindo-se do conceito de vazão não erosiva, proposto por Gardner & Lauritzen (1946), citados por Hamad & Stringham (1978), representado pela equação da forma:

$$q_{m\acute{a}x} = \alpha S^{\beta} \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

$q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima não erosiva teórica, l/s

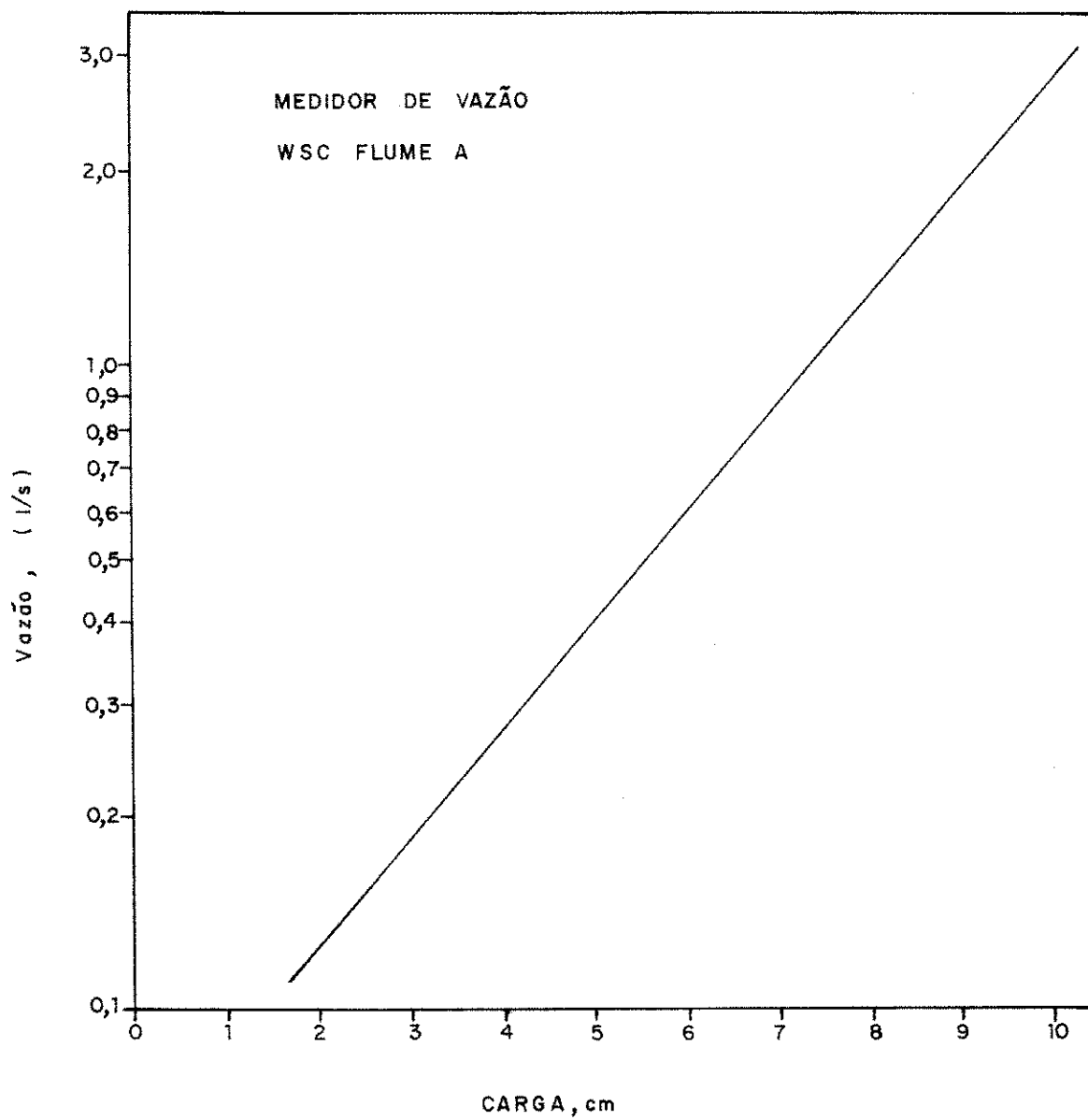


FIG. 3 - Curva carga x vazão do medidor WSC flume - A.

- S = Declividade do sulco, %
 α e β = São coeficientes em função do tipo de solo mostrados na TABELA 1

Com o objetivo de se quantificar a vazão máxima não erosiva real testou-se mais duas vazões, assumindo valores imediatamente superior e inferior à vazão máxima não erosiva teórica, obtida pela equação 1, e ao mesmo tempo, observando-se o grau de erosão causado nos sulcos, através da visualização da quantidade de partículas arrastadas pela água nos trechos iniciais do sulco e também observando-se a quantidade de partículas em suspensão na água escoada no final do sulco.

3.3.2 - Curva de Avanço

As curvas de avanço d'água nos sulcos foram de terminadas utilizando-se os valores de vazões empregados quando da determinação da equação máxima não erosiva real. O método consistiu na colocação de estacas ao longo do sulco, em intervalos de 10 metros, e cronometrar o tempo gasto pela água para atingir cada estaca. Adotou-se a função de avanço da forma:

$$L = CT^m \quad (\text{eq. 2})$$

onde:

L = Comprimento do sulco, m.

T = Tempo de avanço, min.

C e m = São coeficientes empíricos da função de avanço.

TABELA 1 - Valores dos coeficientes α e β para diferentes grupos de solos.

GRUPO DE SOLO	α	β	Coeficiente de correlação
I ^a	0.892	- 0.937	0.891
II ^b	0.988	- 0.550	0.724
III ^c	0.613	- 0.733	0.800
IV ^d	0.644	- 0.704	0.729
V ^e	1.111	- 0.615	0.731
VI ^f	0.665	- 0.548	0.921

- a)- Solos de textura pesada com subsolo e substrato de baixa permeabilidade. A profundidade impermeável situa-se a mais de 914 mm.
- b)- Solos de textura moderadamente pesada com subsolo e substrato de baixa permeabilidade. A profundidade impermeável situa-se entre 508 e 914 mm.
- c)- Solos de textura média com subsolo e substrato de permeabilidade moderadamente baixa. A profundidade impermeável situa-se entre 508 e 914 mm.
- d)- Solos de textura média com subsolo e substrato de permeabilidade moderadamente baixa. A profundidade impermeável situa-se entre 254 e 508 mm.
- e)- Solos de textura leve com subsolo e substrato moderadamente permeável. A profundidade impermeável situa-se entre 254 e 508 mm.
- f)- Solos de textura muito leve com subsolo e substrato de permeabilidade moderadamente rápida. A profundidade impermeável situa-se a menos de 254 mm.

Os coeficientes "C" e "m" foram determinados através de regressão linear, segundo Gomes (1978).

3.3.3 - Curva de Infiltração

Os testes de infiltração foram feitos através do método de "Entrada-Saída" d'água no sulco. A medição das vazões de entrada e saída foram feitas através de instalação, em cada sulco de teste, de dois medidores WSC Flume modelo A, distanciados entre si de 20 m. A vazão utilizada foi a máxima não erosiva real. O procedimento consistiu em se manter no medidor de entrada este valor de vazão e em intervalos de tempo pré-determinados, medir o decréscimo da vazão no medidor de saída até a estabilização de um valor constante. Para representação da infiltração acumulada no decorrer do tempo, adotou-se a equação da forma:

$$D = KT^n \quad (\text{eq. 3})$$

onde:

D = Infiltração acumulada, mm.

T = Tempo, min.

K e n = São coeficientes que dependem das características físicas do solo.

Os coeficientes "K" e "n" foram determinados através de regressão linear, segundo Gomes (1978). A velocidade de infiltração foi obtida pela derivação da equação 3 em função do tempo.

3.4 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

A avaliação do método obedeceu os procedimentos básicos apresentados por Bernardo (1982), tendo como base a equação de avanço, a equação de infiltração acumulada e a relação entre o tempo necessário para se infiltrar uma determinada lâmina de irrigação no final do sulco e o tempo de avanço d'água no sulco, relação esta representada por R. O parâmetro R está intimamente relacionado com as necessidades hídricas das culturas nos seus mais diversos estágios de desenvolvimento.

Analizou-se as perdas por percolação e por escoamento superficial no final do sulco, para valores de R variando de 1 até 4 e assumindo-se comprimentos de sulcos de 100 m usados no experimento e mais três valores simulados, a partir da equação de avanço d'água no sulco, de 50; 75 e 125 m. O procedimento foi feito para condição de vazão constante e mais dois valores de vazão reduzida. A avaliação geral do sistema foi feita através da análise da eficiência de aplicação e de distribuição de água, conforme as equações relacionadas a seguir:

3.4.1 - Lâmina Média Aplicada por Sulco

$$D = \frac{q \times T}{L \times E} \times 60 \quad (\text{eq. 4})$$

onde:

D = Lâmina média aplicada por sulco, mm.

q = Vazão aplicada no sulco, l/s.

T = Tempo de aplicação, min.

L = Comprimento do Sulco, m.

E = Largura da faixa de umedecimento lateral do sulco, m.

A lâmina média aplicada quando se faz redução da vazão inicial é dada por:

$$D_m = \frac{T_1 \times q_i + (T_2 - T_1) \cdot q_r}{L \times E} \times 60 \quad (\text{eq. 5})$$

onde:

D_m = Lâmina média aplicada quando se reduz a vazão inicial, mm.

T_1 = Tempo transcorrido até o momento da redução, min.

T_2 = Tempo total de irrigação, min.

q_i = Vazão inicial, l/s.

q_r = Vazão reduzida, l/s.

3.4.2 - Lâmina Infiltrada no Início e no Final do sulco

$$D_i = K(T_{av})^n \cdot (R + 1)^n \quad (\text{eq. 6})$$

$$D_f = K(T_{av})^n \cdot R^n \quad (\text{eq. 7})$$

onde:

D_i = Lâmina infiltrada no início do sulco, mm.

D_f = Lâmina infiltrada no final do sulco, mm.

K/n = Coeficiente da equação de infiltração acumulada.

T_{av} = Tempo de avanço d'água no sulco, min.

R = Relação entre o tempo necessário para infiltrar uma determinada lâmina no final do sulco e o tempo de avanço.

3.4.3 - Perdas por Percolação e por Escoamento no Fi-

nal do Sulco

$$Pp = (Dp/Dm) \times 100 \quad (\text{eq. 8})$$

$$Pr = (Dr/Dm) \times 100 \quad (\text{eq. 9})$$

em que:

Pp = Perdas por percolação, %

Pr = Perdas por escoamento, %

Dp = Lâmina percolada, mm.

Dr = Lâmina de "runoff", mm.

3.4.4 - Eficiência de Aplicação e de Distribuição de Água

$$Ea = (D_f/D_m) \times 100 \quad (\text{eq. 10})$$

$$Ed = \frac{Df}{(Di + Df)/2} \times 100 \quad (\text{eq. 11})$$

em que:

Ea = Eficiência de aplicação, %

Ed = Eficiência de distribuição, %

3.5 - PREPARO DA ÁREA E INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

Inicialmente o terreno foi arado e submetido a uma sistematização leve, apenas para uniformizar a superfície do terreno, visto que a declividade preliminarmente determinada mostrou-se ideal para os testes. Após a sistematização o terreno foi novamente arado, gradeado e em seguida sulcado. A declividade foi determinada com o auxílio de um nível de

manqueira, fazendo-se leituras dentro dos sulcos em intervalos de 10 metros.

Foram feitos 8 sulcos com 100 metros de comprimento, espaçados entre si de 1,0 metro. Os sulcos apresentaram dimensões médias de 18 cm de altura e 35 cm de largura e declividade média de 0.29 %.

Antes do início dos testes, foram feitas 3 irrigações, com o objetivo de provocar o assentamento do solo ao longo dos sulcos. Os testes foram realizados quando o solo apresentava um conteúdo de umidade em torno de 50% de água disponível, detectado através de determinações da umidade do perfil do solo, nas diversas camadas mencionadas anteriormente, com o auxílio da curva de retenção de umidade.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

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

Os valores da capacidade de campo, do ponto de murcha permanente e da densidade aparente são mostrados na TABELA 3. A FIGURA 4 apresenta as curvas de retenção de umidade das diferentes camadas de solo, confeccionadas a partir dos dados apresentados na TABELA 4. Observa-se que a retenção de umidade a 0,33 atm diminui com a profundidade, e isto é explicado pela diminuição do teor de argila do solo que decresce com a profundidade. A retenção de umidade a 15,0 atm diminui com a profundidade, mas de uma forma pouco acentuada. Observa-se também que os valores de capacidade de campo obtidos em campo são ligeiramente inferiores àqueles obtidos em laboratório, referente a retenção de umidade a 0,33 atm.

4.2 - PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO

A vazão máxima não erosiva teórica, obtida pela equação 1, para uma declividade média dos sulcos de 0.29% e valores de α e β iguais a 0.613 e -0.733, respectivamente, a-

TABELA 2 - Distribuição do Tamanho das Partículas

Profundidade (cm)	Areia %	Silte %	Argila %	Classificação Textural
0 - 20	50,02	40,77	9,21	Franco
20 - 40	52,16	41,70	6,14	Franco Arenoso
40 - 60	47,97	45,88	6,15	Franco Arenoso
60 - 80	53,00	40,84	6,16	Franco Arenoso
80 - 100	70,65	25,27	4,08	Franco Arenoso

TABELA 3 - Características Físico-Hídricas do Solo

Prof. (cm)	Capacidade de Campo (%)	Ponto de Murcha (%)	Densidade Apa- rente (g/cm ³)
0 - 20	21,8	5,99	1,49
20 - 40	19,6	4,31	1,50
40 - 50	19,8	5,00	1,52
60 - 80	18,4	4,75	1,48
80 - 100	16,9	2,72	1,46

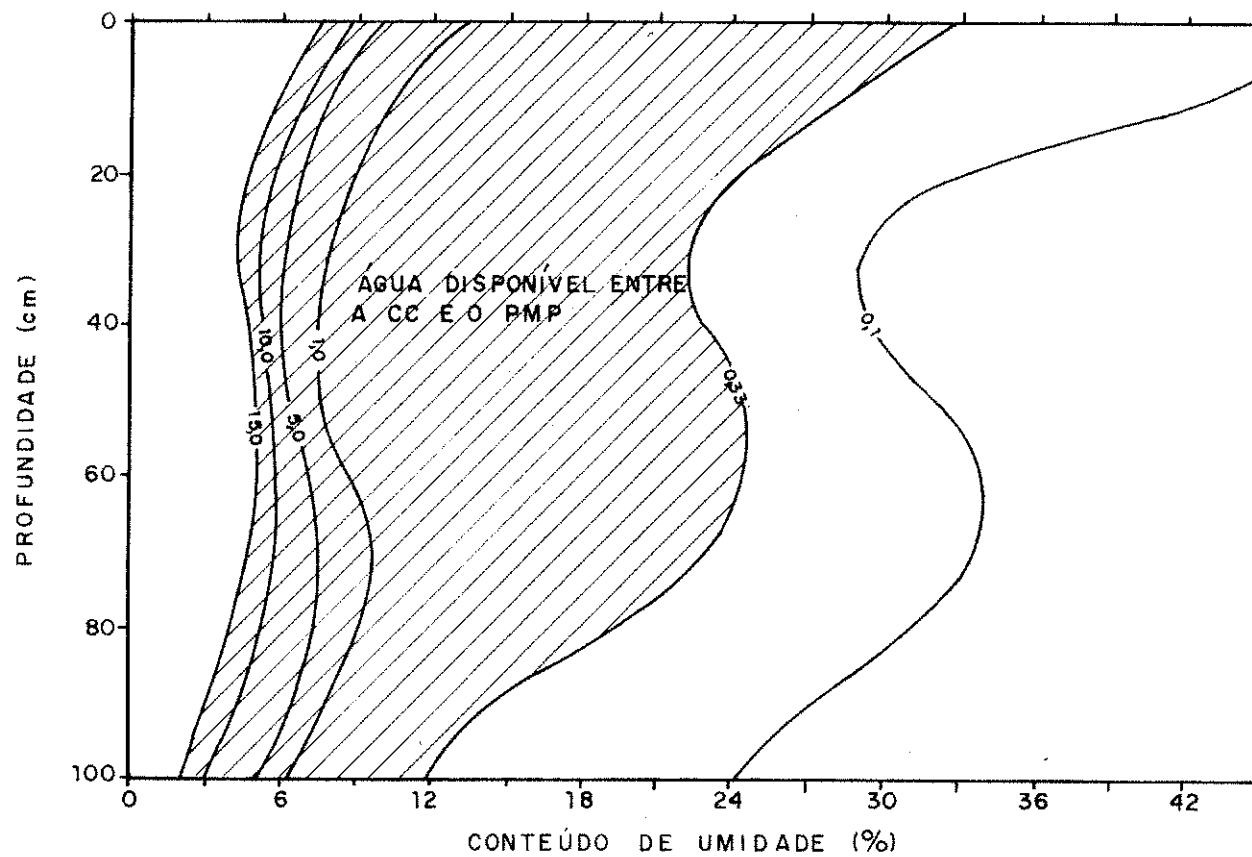


FIG. - 4 - Curvas característica do solo até a profundidade de 100 cm, referente as tensões de 0,1; 0,33; 1,0; 5,0; 10,0; 15,0 atm.

TABELA 4 - Dados de Retenção de Umidade do Solo Estudado

Profundidade (cm)	Tensão (atm)					
	0,10	0,33	1,00	5,00	10,00	15,00
0 - 20	42,65	28,61	10,71	8,05	6,87	5,99
20 - 40	28,60	22,07	8,12	6,23	5,28	4,31
40 - 60	31,95	24,01	7,53	6,11	5,59	5,00
60 - 80	33,89	22,54	9,84	7,73	5,61	4,75
80 - 100	26,89	14,26	7,52	6,57	4,17	2,72

presentou um valor igual a 1.52 l/s. Tomando como base este valor de vazão e com o objetivo de se determinar a vazão máxima não erosiva real, testou-se, em campo, também as vazões de 1.45 e 1.70 l/s. Observou-se no decorrer dos testes que a vazão de 1.70 l/s causou uma erosão alta nos sulcos, principalmente nos trechos iniciais. A vazão máxima não erosiva teórica de 1.52 l/s causou uma erosão moderada ao longo dos sulcos enquanto que, a vazão de 1.45 l/s não provocou este efeito. Portanto, considerou-se a vazão de 1.45 l/s como a vazão máxima não erosiva real.

A TABELA 5 mostra as equações de avanço obtidas com o uso das vazões de 1.45, 1.52 e 1.70 l/s, respectivamente, e a FIGURA 5 apresenta a curva de avanço obtida com a aplicação da vazão de 1.45 l/s.

TABELA 5 - Equações de avanço, erosão observada e coeficientes de correlação, para declividade de 0.29% e vazões utilizadas nos testes.

Declividade %	Vazão l/s	Eq. de Avanço m	Erosão Observada	Coef. Corr. r^2
0.29	1.45	$L = 10.62T^{0.86}$	Inexistente	0.98
	1.52	$L = 11.63T^{0.84}$	Moderada	0.98
	1.70	$L = 16.35T^{0.76}$	Alta	0.98

Observa-se uma boa aproximação entre a vazão máxima não erosiva teórica obtida através da equação 1 e a vazão máxima não erosiva real determinada em campo. Essa aproximação

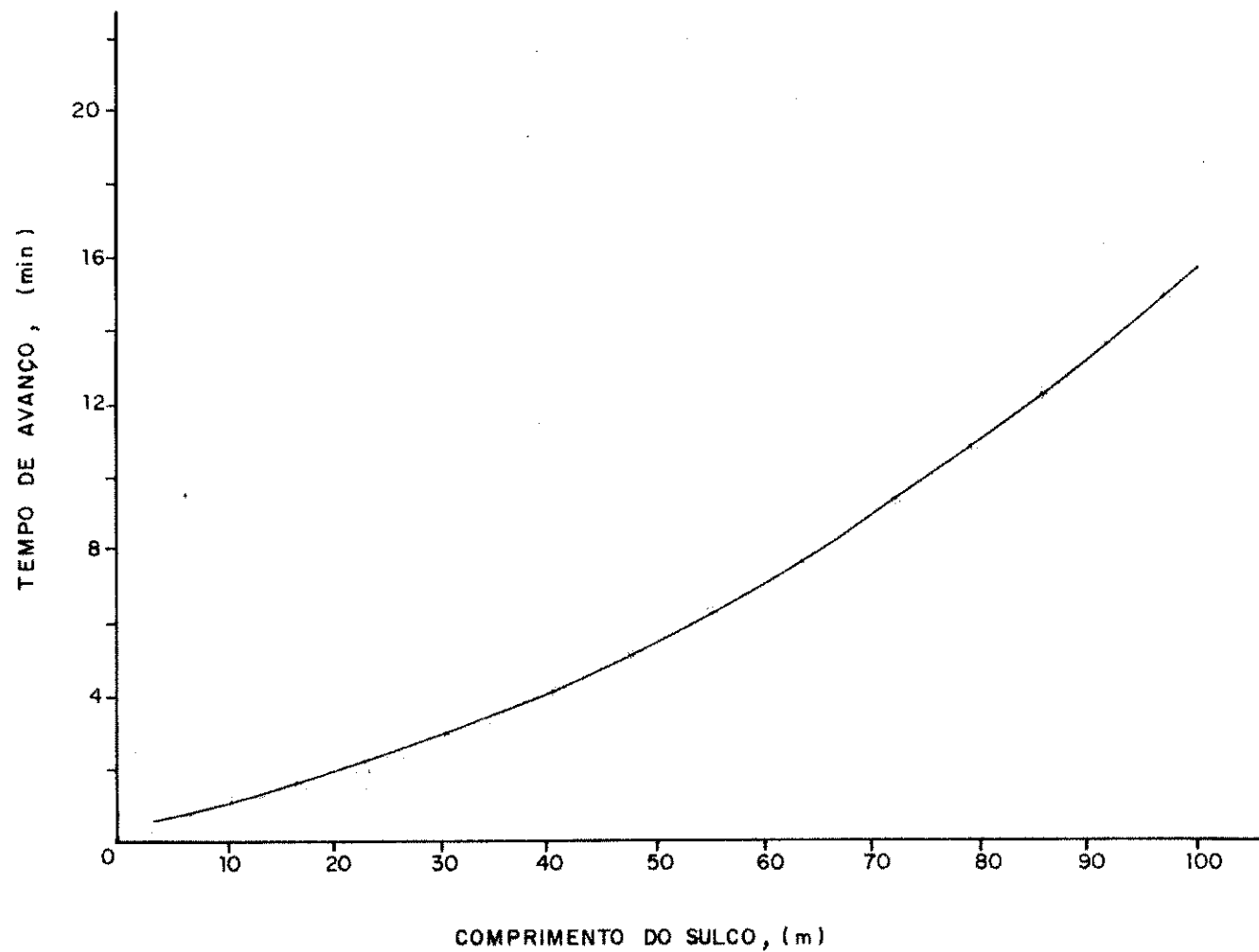


FIG.5 - Curva de avanço d'água no sulco para a declividade de 0.29%.

foi devida a inclusão, na fórmula, dos parâmetros α e β , referentes ao tipo de solo estudado.

Para este mesmo valor de declividade, a vazão máxima não erosiva teórica, calculada pela equação proposta por Cridle et alii (1956), citados por Hamad & Stringham (1978), seria de 2.17 l/s. Esta vazão causaria, evidentemente, uma erosão muito alta nos sulcos.

A equação que representa a infiltração acumulada em função do tempo, obtida através de regressão linear, em dados de três repetições, é dada por:

$$D = 4.78T^{0.57} \text{ (mm)}$$

e a velocidade de infiltração, obtida pela derivação da mesma, é da forma:

$$VI = 16.35T^{-0.43} \text{ (cm/h)}$$

A FIGURA 6 mostra o gráfico da infiltração acumulada e da velocidade de infiltração em função do tempo.

A infiltração lateral d'água no solo foi determinada fazendo-se cortes transversais ao longo do sulco, após 70 minutos de irrigação, encontrando-se um valor médio de 38 cm. Portanto, a largura da faixa umedecida sob a ação de um sulco é de 76 cm. Este parâmetro é de grande importância na avaliação do método de irrigação por sulcos. Normalmente ele é assumido como sendo o espaçamento entre sulcos, porém, Soares (1980) mostra que, se a largura da faixa de umedecimen

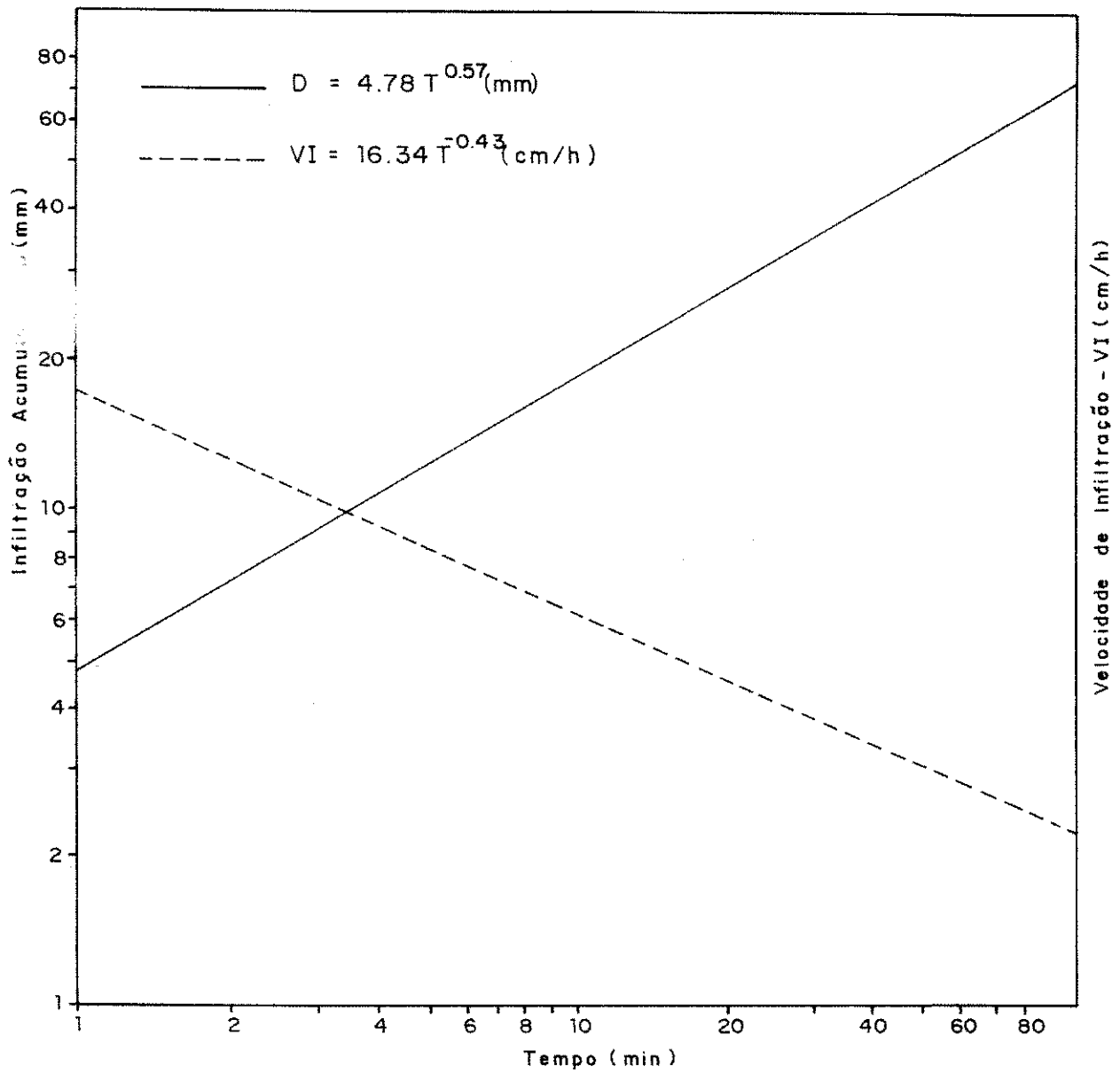


FIG.6 - Infiltração Acumulada (D) e Velocidade de Infiltração (VI) do solo estudado.

to for adotada como sendo o espaçamento entre sulcos, em vez de ser determinada, a avaliação do método não representará o manejo adotado, quando a estimativa inadequada deste parâmetro acarreta, entre outros erros, a obtenção de "runoff" negativo. O tempo de 70 minutos, após o qual foram feitas as determinações, poderá não ser adequado para lâminas que requeiram maior tempo de infiltração e poderá portanto, se for o caso, ser aumentado, possibilitando maior infiltração lateral.

Analisando a FIGURA 5, a curva de avanço referente a vazão de 1.45 l/s apresenta uma concavidade pouco acentuada, indicando, portanto, uma velocidade de avanço consideravelmente rápida. Através da equação que representa o avanço d'água em função do tempo, obtêm-se, para esta vazão, e comprimento de sulco de 100 metros, um tempo de avanço de aproximadamente de 14 minutos.

Para sulcos de 100 metros pode-se considerar o tempo de avanço de 14 minutos como sendo pequeno e, levando-se em conta que o solo possui uma velocidade de infiltração baixa, conforme observações feitas ao longo dos testes, as perdas por escoamento no final dos sulcos ("runoff") mostraram-se bastante altas.

Com a finalidade de amenizar este efeito, considerou-se a redução da vazão de 1.45 l/s para 1.0 e para 0.75 l/s, respectivamente. Como os valores da redução da vazão foram fixados, necessita-se saber em que tempo, após o início da irrigação, deve-se realizar a redução da vazão. Utilizou-se portanto, o método do somatório das infiltrações parciais,

descrito por Bernardo (1982). A TABELA 6 apresenta, para sulcos de 50; 75; 100 e 125 metros, o tempo de redução da vazão, após o início da irrigação, de 1.45 l/s para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

TABELA 6 - Tempo de redução da vazão inicial de 1.45 l/s para 1.0 e 0.75 l/s em função do comprimento do sulco, em minutos.

VAZÃO REDUZIDA l/s	COMPRIMENTO DO SULCO (m)			
	50	75	100	125
1.0	7.0	15	24	35
0.75	10	22	42	65

A avaliação do sistema consistiu na análise das perdas por percolação e por escoamento e das eficiências de aplicação e de distribuição, para valores de R igual a 1; 2; 3 e 4. As TABELAS 7 e 8 mostram os resultados da análise para sulcos de 50; 75; 100 e 125 m com uso de vazão constante de 1.45 l/s e redução desta para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

A FIGURA 7 mostra a lâmina infiltrada na final do sulco, calculada pela equação 7, em função do valor de R e do comprimento do sulco. Observa-se que sulcos de até 125 m são adequados para receber lâminas de até 50 mm aproximadamente. Sulcos mais longos poderão ser necessários para lâminas maiores. A diferença percentual entre a lâmina infiltrada no iní

cio do sulco, calculada pela equação 6, e a lâmina infiltrada no final do sulco, diminui com o aumento do valor de R , conforme mostra a FIGURA 8. Essa diferença é independente do comprimento do sulco, sendo uma função do valor de R e das características de infiltração do solo, representadas pelo expoente da equação de infiltração acumulada e indica também, o decréscimo das perdas por percolação com o acréscimo de R .

A FIGURA 9 mostra a diferença percentual entre a lâmina média aplicada e a lâmina média infiltrada, em função de R para sulcos de 100 m, e vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente. Essas diferenças, para a vazão constante de 1.45 l/s, aumentam de forma linear e brusca de 20 para 58%, quando R aumenta de 1 para 4. Diminuem quando se faz a redução da vazão inicial, apresentando, para este comprimento de sulco, menores diferenças para a vazão reduzida para 1.0 l/s, tendo como valor máximo 26%, para R igual a 4. Esta variação é tanto mais acentuada quanto menor for o comprimento do sulco.

As FIGURAS 10, 11, 12 e 13 ilustram, respectivamente, para sulcos de 50; 75; 100 e 125 m, as perdas por percolação e por "runoff" para valores de R variando de 1 até 4, com o uso de vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s. A variação da vazão, para um mesmo valor de R e comprimento de sulco, não provocou uma variação considerável nas perdas por percolação, conforme mostra a TABELA 7. Considerou-se, portanto, um valor médio no caso em que seja feito a redução de vazão.

TABELA 7 - Cálculo das perdas por percolação e por escoamento em função do valor de R para sulcos de 50; 75; 100 e 125 m, com uso de vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

Comprimento do sulco (m)	R	Vazão = 1.45 l/s				Redução para 1.0 l/s				Redução para 0.75 l/s			
		Dp	Dr	Pp	Pr	Dp	Dr	Pp	Pr	Dp	Dr	Pp	Pr
		(mm)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
50	1	3.22	10.98	11.72	39.97	3.22	7.43	13.46	31.06	3.22	8.77	12.75	34.72
	2	2.56	18.95	6.31	45.98	2.56	11.13	7.67	33.33	2.56	10.11	7.90	31.27
	3	2.21	27.91	4.02	50.80	2.21	15.84	5.16	36.95	2.21	12.44	5.60	31.52
	4	1.99	37.47	2.90	54.51	1.99	21.10	3.80	40.31	1.99	15.34	4.27	32.93
75	1	4.30	8.96	14.09	27.72	4.30	6.09	15.27	21.63	4.30	*	*	*
	2	3.43	15.99	7.50	34.93	3.43	8.89	8.86	22.92	3.43	10.10	8.60	25.32
	3	2.96	24.87	4.85	40.73	2.96	13.07	6.00	26.54	2.96	11.61	6.19	24.92
	4	2.65	34.53	3.47	45.24	2.65	17.94	4.43	30.00	2.65	13.89	4.76	24.95
100	1	5.20	5.32	16.22	16.60	5.20	3.90	16.97	12.73	5.20	*	*	*
	2	4.15	11.98	8.63	24.92	4.15	5.59	9.96	13.41	4.15	*	*	*
	3	3.56	20.30	5.55	31.62	3.56	8.94	6.75	16.95	3.56	12.57	6.31	22.30
	4	3.22	29.50	4.02	36.92	3.22	13.16	5.05	20.63	3.22	14.02	4.98	21.68
125	1	6.01	2.13	18.23	6.46	6.01	1.84	18.40	5.63	6.01	*	*	*
	2	4.79	6.58	9.67	13.30	4.79	2.40	10.87	5.41	4.79	*	*	*
	3	4.13	15.37	6.26	23.31	4.13	4.85	7.45	8.75	4.13	12.27	6.57	19.52
	4	3.71	24.00	4.50	29.12	3.71	8.37	5.55	12.53	3.71	12.95	5.20	18.14

Dp = Lâmina Percolada

Pp = Perda por Percolação

Dr = Lâmina equivalente ao
escoamento

Pr = Perda por escoamento

TABELA 8 - Cálculo da eficiência de aplicação e de distribuição em função do valor de R para sulcos de 50; 75; 100 e 125 m, com uso de vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0,75 l/s.

Comprimento do sulco (m)	R	Tempo (min)		Lâmina infiltrada (mm)		Ed (%)	Vazão=1.45 l/s		Redução para 1.0 l/s		Redução para 0.75 l/s	
		Tav	Tr	Di	Df		Dm (mm)	Ea (%)	Dm (mm)	Ea (%)	Dm (mm)	Ea (%)
50	1	6	12	19.70	13.27	80.50	27.47	48.30	23.92	55.47	25.26	52.53
	2	6	18	24.83	19.70	88.50	41.21	47.80	33.39	59.00	32.37	60.85
	3	6	24	29.25	24.82	91.80	54.94	45.17	42.87	57.90	39.47	62.90
	4	6	30	33.22	29.25	93.65	68.68	45.59	52.34	55.90	46.58	62.80
75	1	10	20	26.36	17.76	80.50	30.52	58.19	28.15	63.10	*	*
	2	10	30	33.22	26.36	88.50	45.78	57.58	38.68	68.15	39.89	66.08
	3	10	40	39.14	33.22	91.80	61.05	54.41	49.25	67.45	47.79	69.51
	4	10	50	44.44	39.14	93.65	76.32	51.28	59.73	65.52	55.68	70.30
100	1	14	28	31.92	21.56	80.50	32.05	61.17	30.63	70.30	*	*
	2	14	42	40.24	31.94	88.50	48.07	66.44	41.68	76.63	*	*
	3	14	56	47.41	40.24	91.80	64.10	62.77	52.74	76.30	56.37	71.38
	4	14	70	53.84	47.41	93.65	80.13	59.17	63.79	74.32	64.65	73.33
125	1	18	36	36.85	24.83	80.50	32.97	75.31	32.68	76.00	*	*
	2	18	54	46.44	36.85	88.50	49.45	74.54	44.05	83.68	*	*
	3	18	72	54.71	46.44	91.80	65.94	70.42	55.42	83.80	62.84	73.90
	4	18	90	62.13	54.71	93.65	82.42	66.38	66.79	81.91	71.37	76.65

Tav = Tempo de avanço
T = Tempo de irrigação

Di = Lâmina infiltrada no início do sulco
Df = Lâmina infiltrada no final do sulco

Ed = Eficiência de distribuição
Ea = Eficiência de aplicação

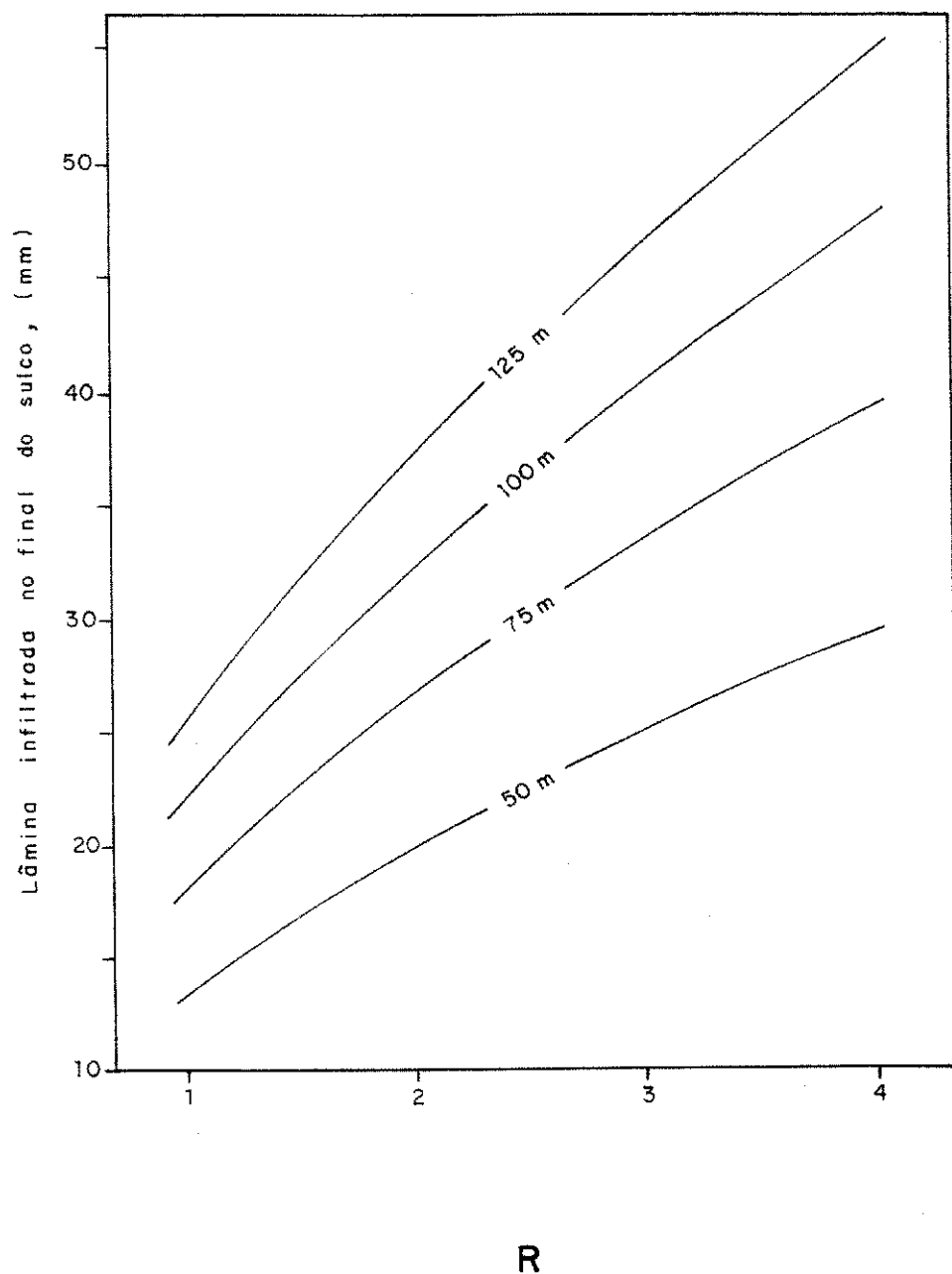


FIG. 7 - Lâmina infiltrada no final do sulco em função do valor de R e do comprimento.

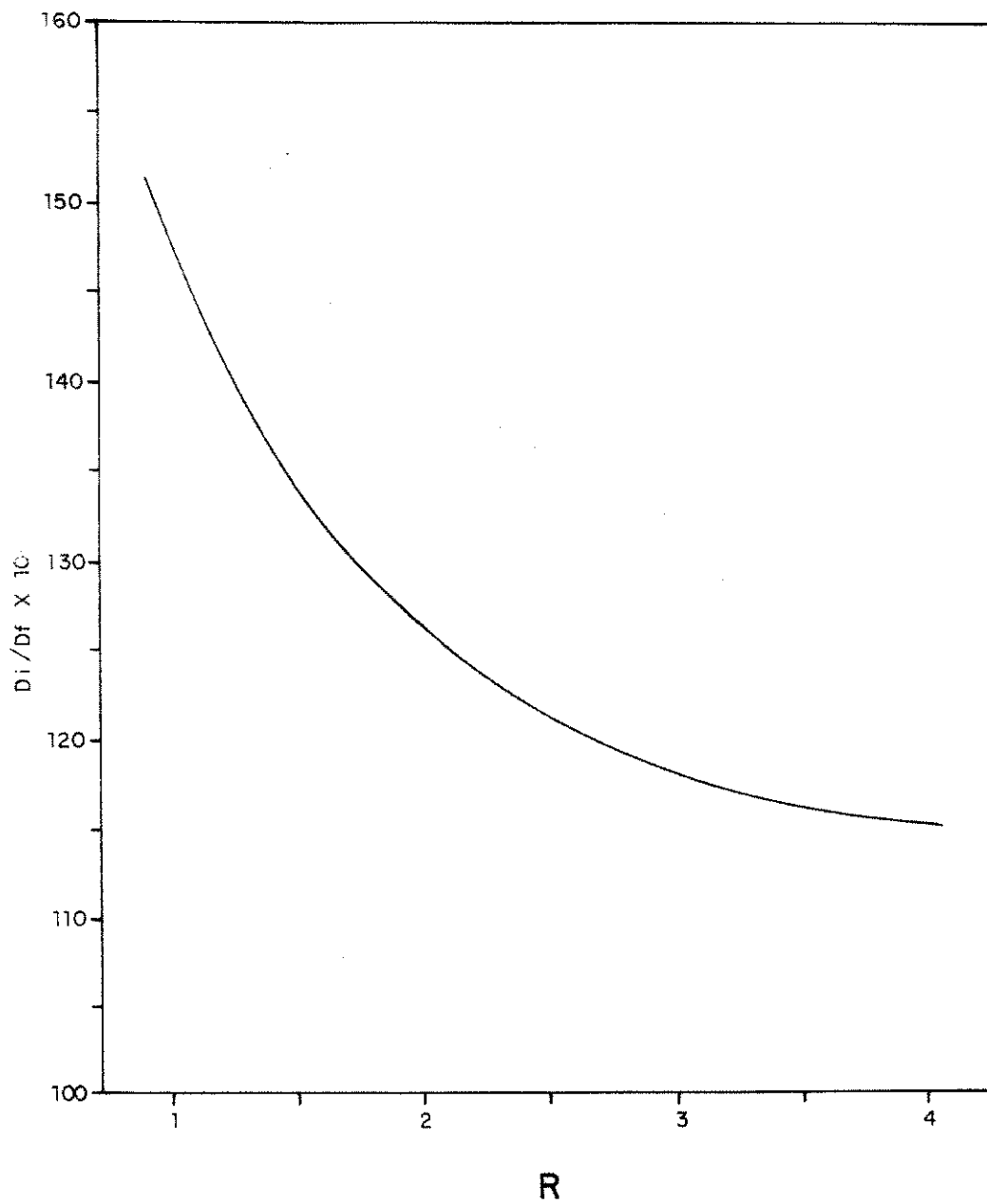


FIG. 8 - Diferença percentual entre a lâmina infiltrada no início do sulco (D_i) e a lâmina infiltrada no final do sulco (D_f)

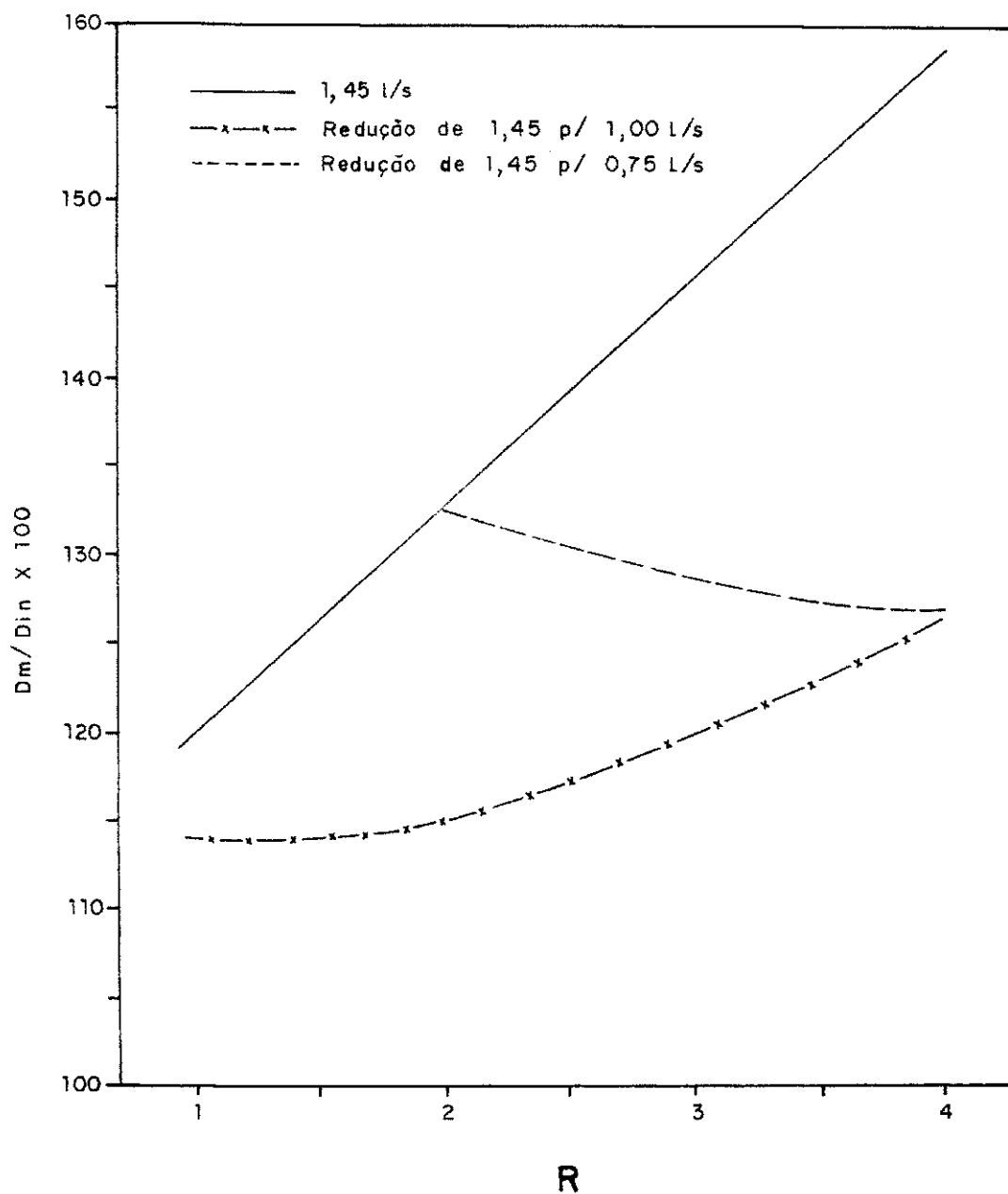


FIG. 9 - Diferença percentual entre a lâmina média aplicada (D_m) e a lâmina média infiltrada ao longo do sulco (D_{in})

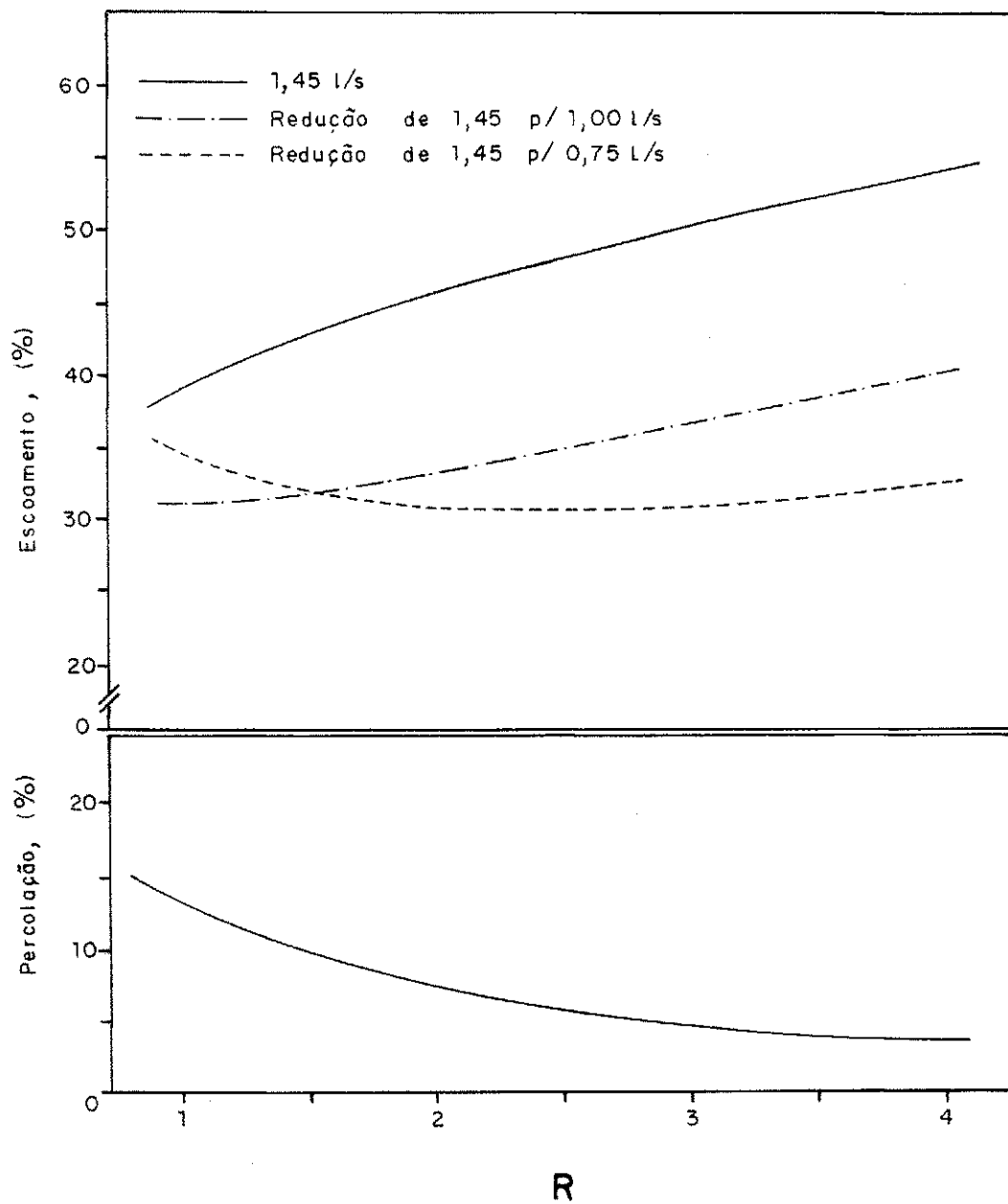


FIG.10 — Perdas por percolação e por escoamento para sulcos de 50 m, vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente

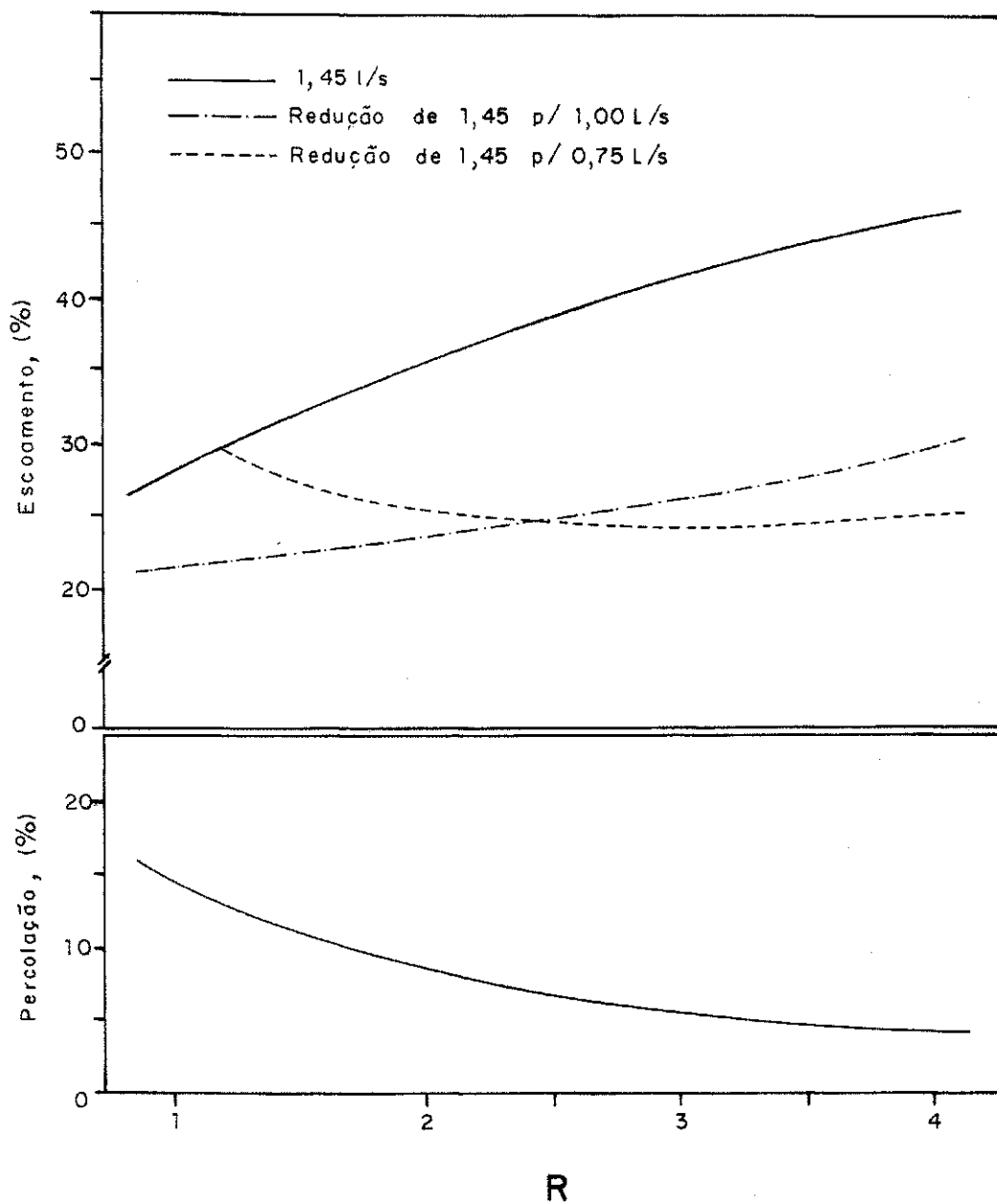


FIG. 11 - Perdas por percolação e por escoamento para sulcos de 75 m, vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

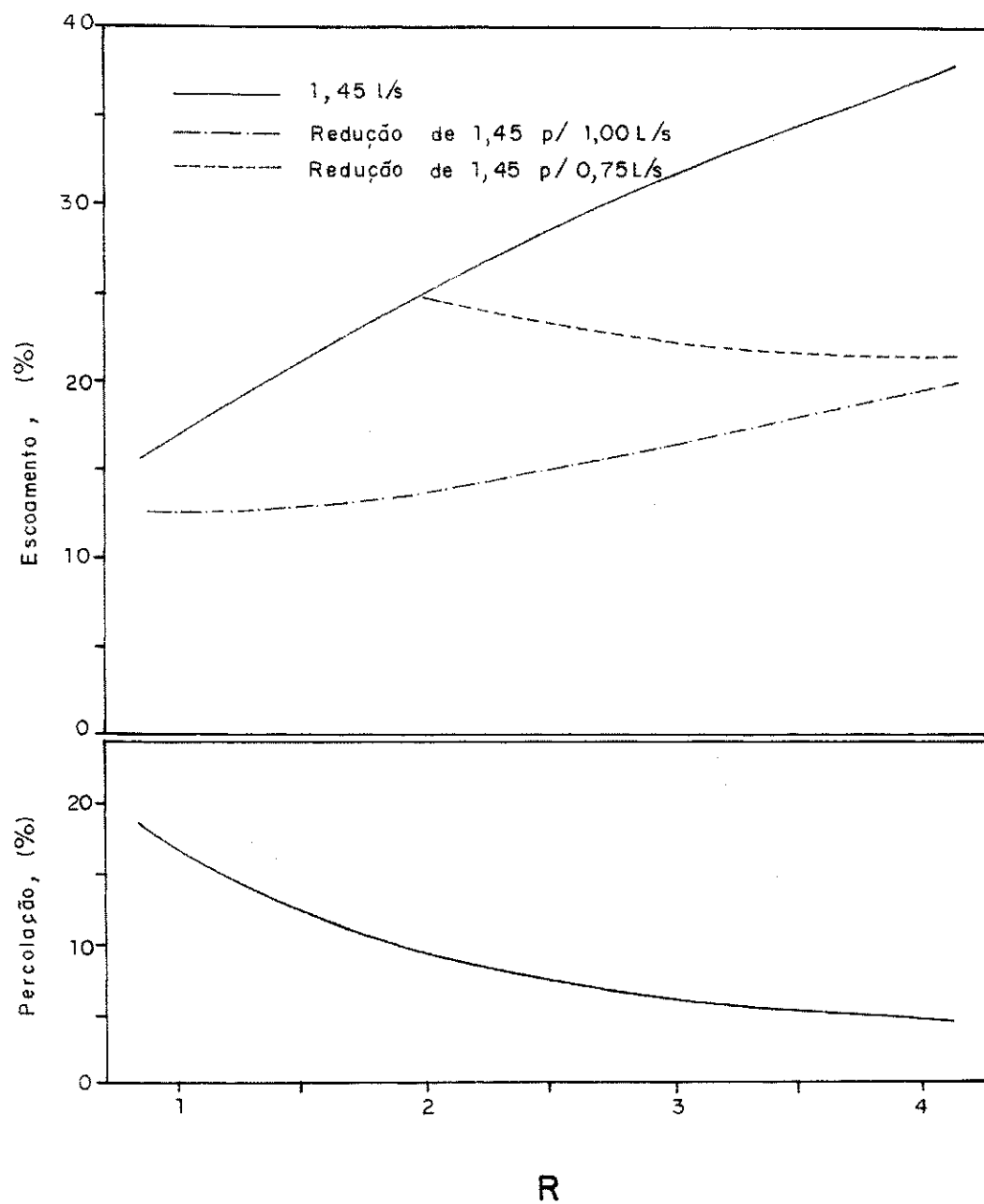


FIG. 12 - Perdas por percolação e por escoamento para sulcos de 100 m, vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

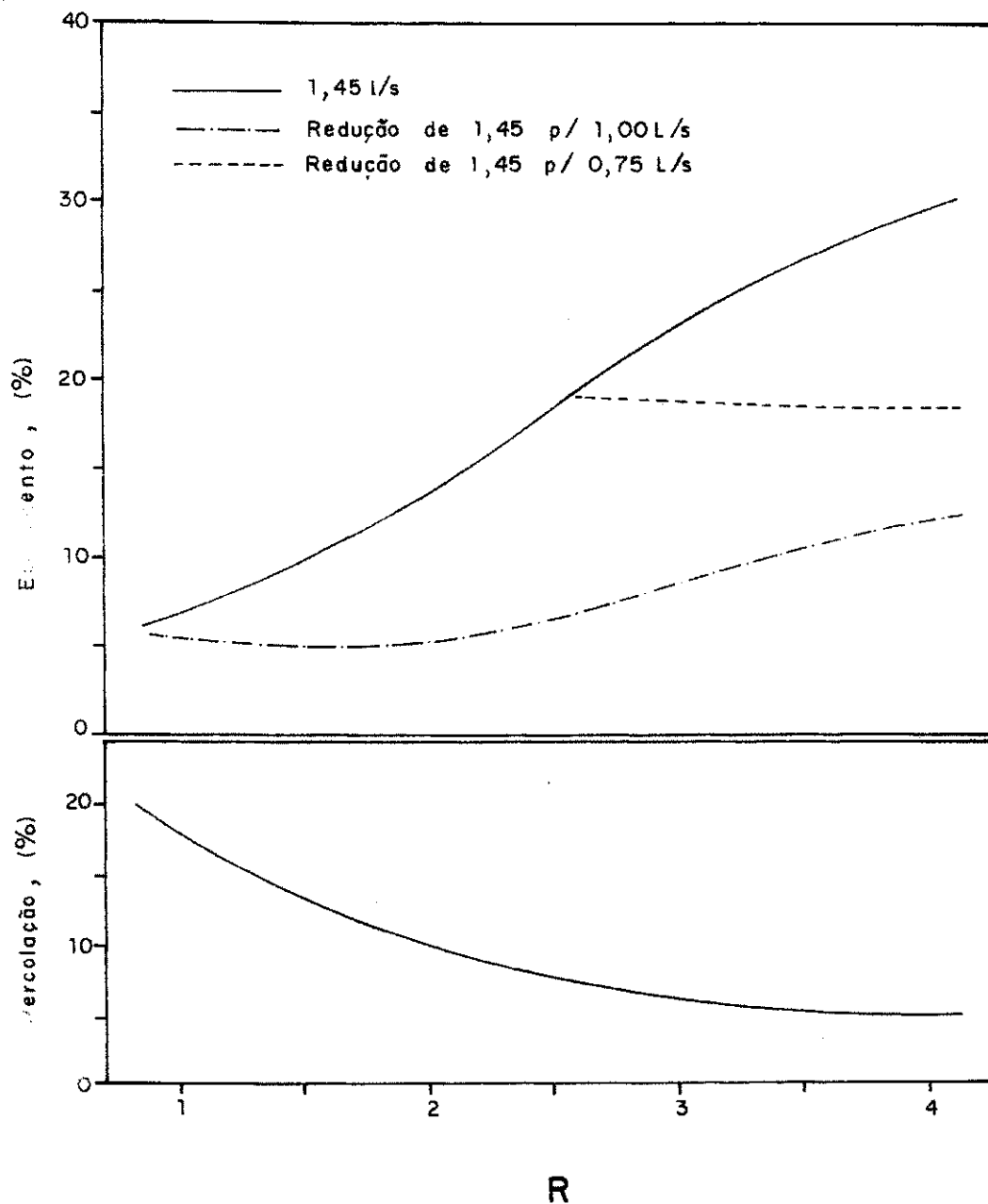


FIG. 13 - Perdas por percolação e por escoamento para sulcos de 125 m, vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

As perdas por percolação diminuem, de forma acentuada, para valores de R entre 1 e 2 quando, a partir de então, esse decréscimo ocorre de forma menos acentuada. Para um mesmo valor de R, as perdas por percolação aumentam com o comprimento do sulco.

Para um mesmo valor de vazão e R, as perdas por escoamento diminuem com o aumento do comprimento do sulco. A FIGURA 10 mostra as perdas por escoamento para sulcos de 50 m. Observa-se que, para a vazão constante de 1.45 l/s as perdas aumentaram com o valor de R, alcançando um máximo de 54% para R igual a 4.

Quando se reduz a vazão para 1.0 l/s as perdas diminuem, em relação a vazão de 1.45 l/s, embora cresçam com o acréscimo de R, atingindo, para R igual a 4, um valor de 40%. Reduzindo-se a vazão de 1.45 l/s para 0.75 l/s, as perdas por escoamento apresentam-se menores, em relação as perdas quando se usa a vazão de 1.45 l/s e, para um valor de R aproximadamente 1.5, são menores em relação as perdas quando se usa a vazão reduzida para 1.0 l/s.

Em relação ao valor de R, as perdas por escoamento para redução de vazão de 1.45 para 0.75 l/s, diminuem para R variando de 1 até 2, permanecem praticamente constante para valores entre 2 e 3, quando começa novamente a crescer, alcançando, para R igual a 4, o valor de 33%.

A FIGURA 11 apresenta as perdas por "runoff" para vazão de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente para sulcos de 75 m. Para a vazão de 1.45 l/s as perdas, sempre crescentes com o valor de R, atingem, para R igual a 4,

o valor de 45%. A redução da vazão de 1.45 para 1.0 l/s, apresenta valores das perdas por escoamento aumentando com R, embora de forma menos acentuada, comparadas com as obtidas com o uso da vazão inicial, alcançando, para R igual a 4, o valor de 30%. A redução para 0.75 l/s indica decréscimo das perdas com o aumento de R, atingindo para R igual a 4, o valor de 25%.

A FIGURA 12 mostra as perdas por escoamento em função de R, para sulcos de 100 m, e vazão constante de 1.45 l/s e redução desta para 1.0 e 0.75 l/s. As perdas, com o uso da vazão constante, crescem com o aumento de R, de forma acentuada, alcançando, para R igual a 4, a marca de 37%. A redução para 1.0 l/s apresenta valores bem menores das perdas, em relação às obtidas com o uso da vazão inicial. Para R entre 1 e 2 estas perdas apresentam-se praticamente constante e crescem, de modo menos acentuado atingindo, para R igual a 4, o valor aproximado de 21%.

A redução da vazão de 1.45 para 0.75 l/s, realizada para R igual a 2, apresenta uma diminuição lenta das perdas por "runoff" com o acréscimo de R. Os valores das perdas para esta redução de vazão, estão compreendidas entre aqueles obtidos com o uso da vazão constante e com redução desta para 1.0 l/s, sendo que, para R igual a 4, as perdas por escoamento para esta redução de vazão apresentam-se praticamente igual as perdas com redução para 1.0 l/s.

A FIGURA 13 mostra as perdas por escoamento em função de R, para sulcos de 125 m e uso de vazão constante de 1.45 l/s e redução, respectivamente, para 1.0 e 0.75 l/s. Para a va-

zão constante estas perdas crescem com o acréscimo de R. A redução para 1.0 l/s apresentou um valor praticamente constante para R entre 1 e 2, a partir de então até R igual a 4, começou a crescer, embora de forma menos acentuada. As perdas com redução para 0.75 l/s, possível somente para um valor de R aproximadamente 2.5, permaneceu praticamente constante, a partir deste valor de R até o valor igual a 4. As perdas com o uso desta vazão reduzida, apresentou valores maiores em relação às obtidas com o uso da vazão reduzida de 1.0 l/s e menores do que aqueles alcançados com o uso da vazão constante de 1.45 l/s.

As FIGURAS 14, 15, 16 e 17 ilustram a eficiência de aplicação de água, para sulcos de 50, 75, 100 e 125 m com uso de vazão constante de 1.45 l/s e redução desta para 1.0 l/s e 0.75 l/s, respectivamente.

Observa-se pela FIGURA 14 que, para sulcos de 50 m, o uso da vazão constante de 1.45 l/s causa uma baixa eficiência de aplicação. Para R entre 1 e 2 permanece praticamente constante e igual a 48% e decresce até 42.59%, para R igual a 4.

A redução para 1.0 l/s indica um acréscimo da eficiência de 55 para 59% quando R varia de 1 para 2, respectivamente e diminui de forma lenta, alcançando 55%, para R igual a 4.

Quando se reduz a vazão inicial de 1.45 para 0.75 l/s, a eficiência aumenta de forma bem visível, no intervalo compreendido entre R igual a 1 e 2, passando de 52 para 61%, respectivamente. Cresce para R igual a 2 e 3, e então perma-

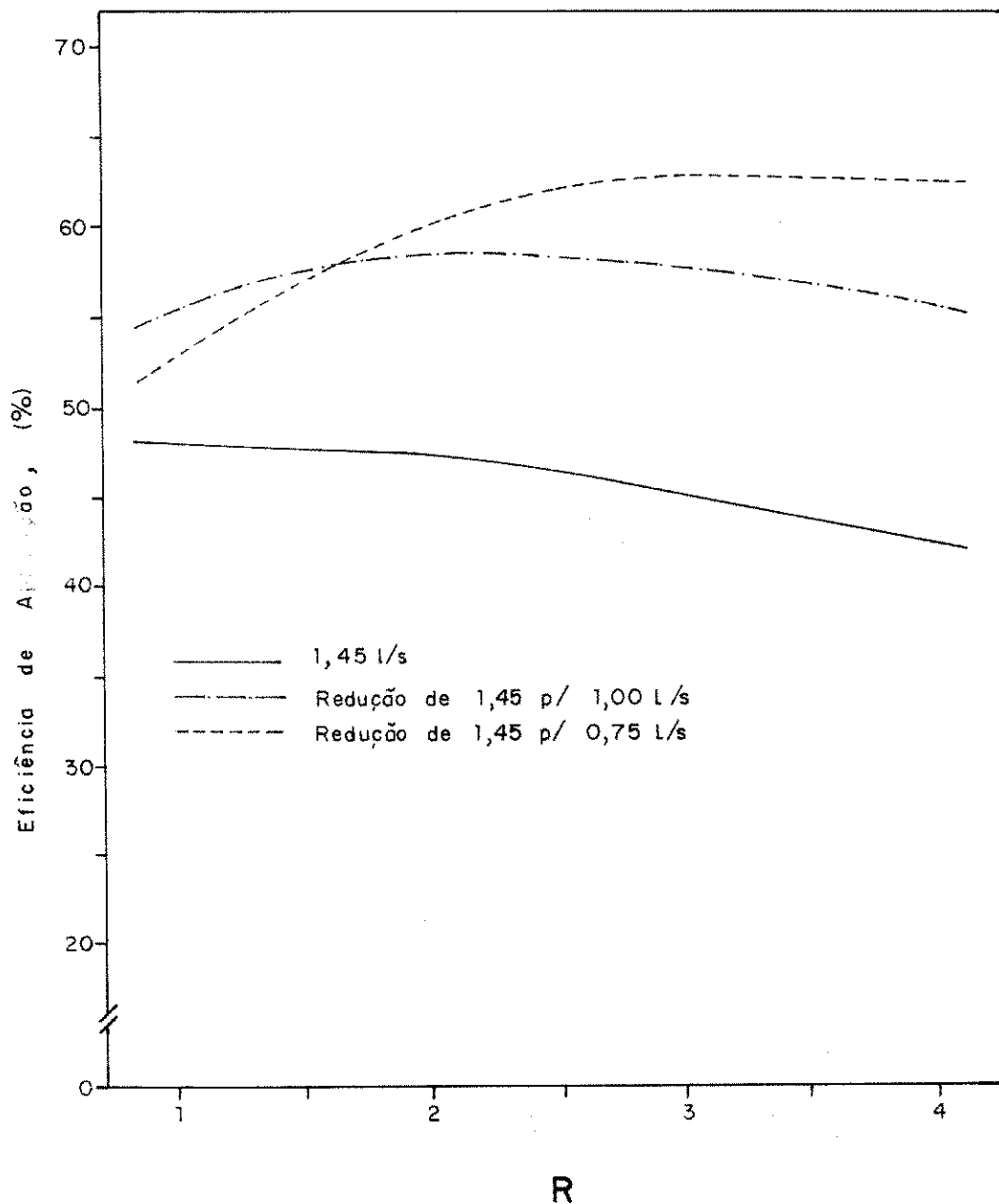


FIG. 14 - Eficiência de aplicação de água para sulcos de 50 m, vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

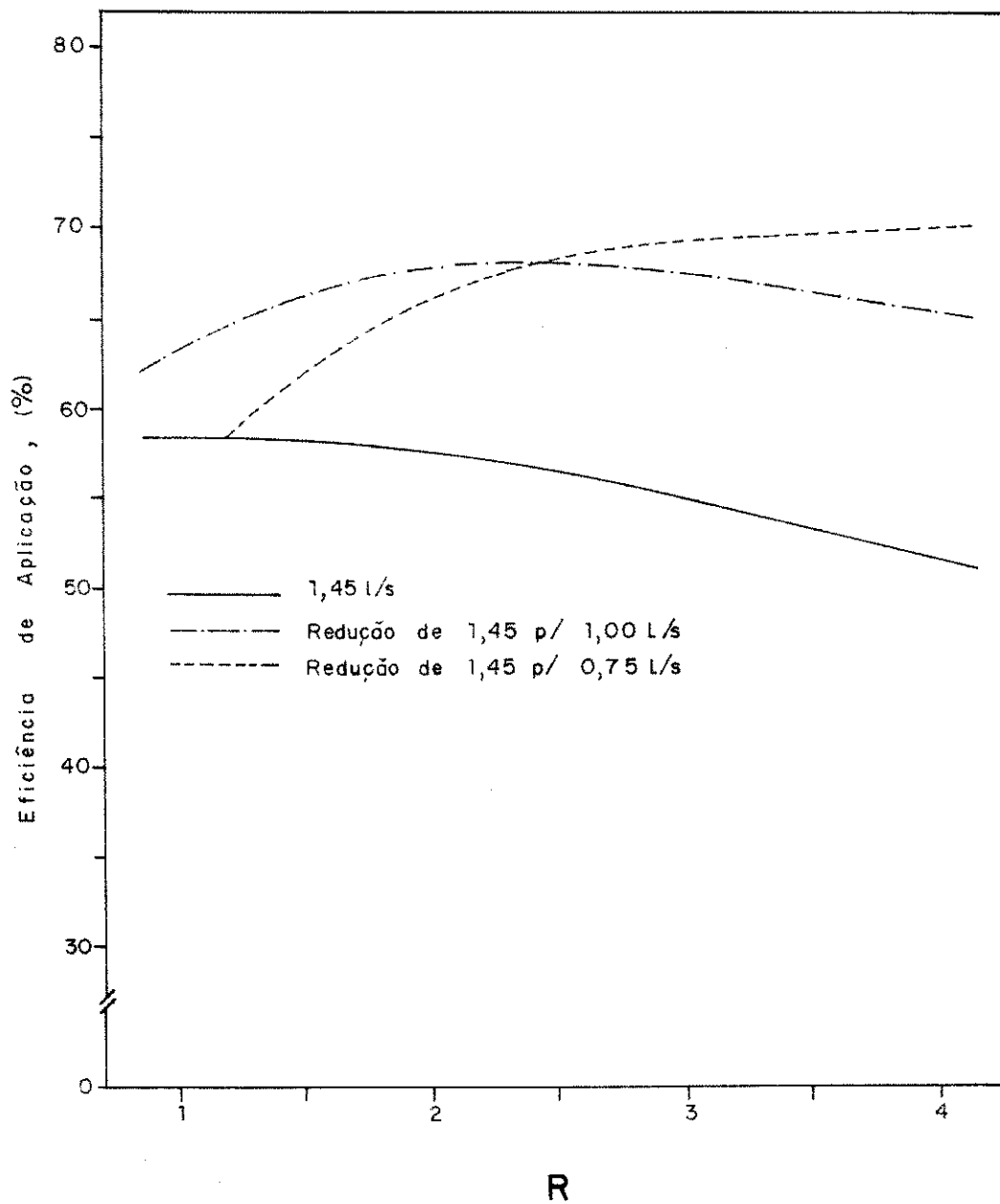


FIG. 15 - Eficiência de aplicação de água para sulcos de 75 m, vazão constante de 1.45 l/s e vazão reduzida para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

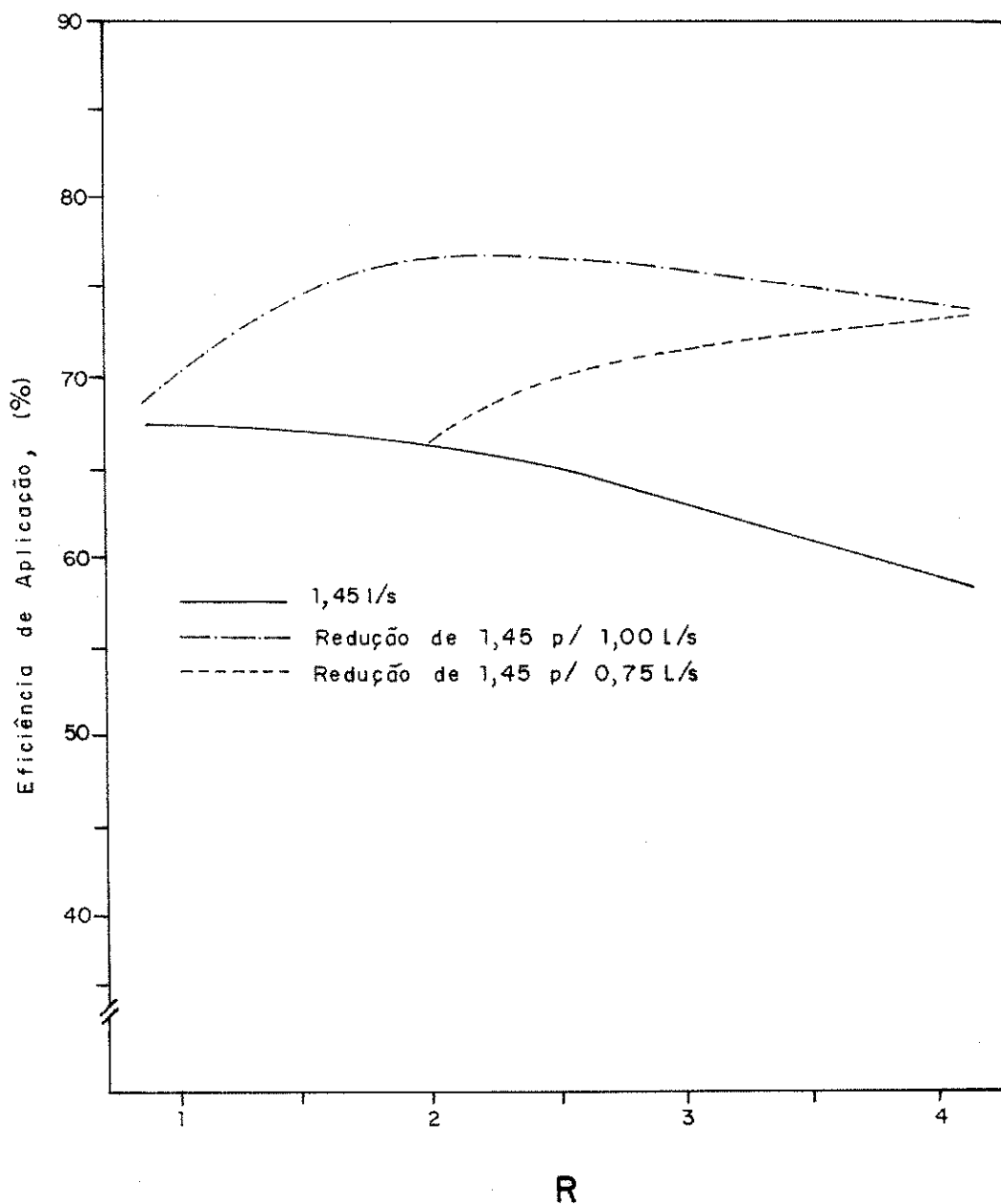


FIG. 16 - Eficiência de aplicação de água para sulcos de 100 m, vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

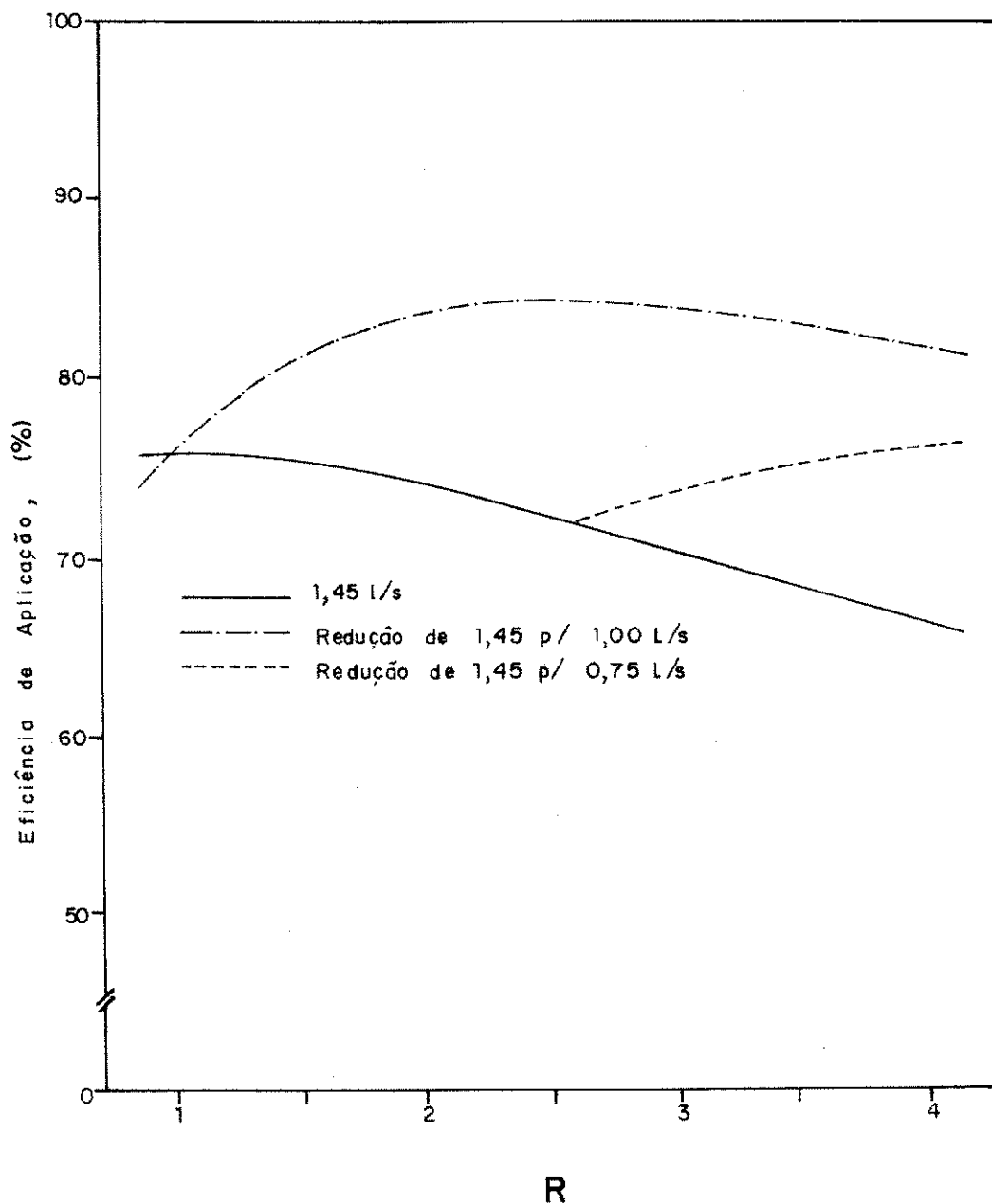


FIG. 17 - Eficiência de aplicação de água para sulcos de 125 m, vazão constante de 1,45 l/s e vazão reduzida para 1,0 e 0,75 l/s, respectivamente.

nece constante e igual a aproximadamente 63%, mostrando tendência de decréscimo. Analisando-se ainda a FIGURA 14, verifica-se, de um modo geral que, para sulcos de 50 m, maiores eficiências de aplicação são obtidas quando se faz a redução da vazão inicial de 1.45 para 0.75 l/s.

A FIGURA 15 representa a eficiência de aplicação para sulcos de 75 m com a utilização da vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

A eficiência de aplicação, com o uso da vazão constante, diminui com o acréscimo de R de 1 para 4, de aproximadamente 58 para 51%, respectivamente.

A redução para 1.0 l/s causa um aumento considerável na eficiência, em relação a vazão constante, variando de 63 para 68%, aproximadamente, quando R aumenta de 1 para 2, respectivamente, e a partir deste valor, até R igual a 4, apresenta uma diminuição lenta para 65%.

A redução para 0.75 l/s, possível após R igual a 1.2, provoca um acréscimo da eficiência de aplicação com o valor de R. Este aumento é bem pronunciado para R até aproximadamente igual a 2.5 e, após este valor, tende a ser praticamente constante. Nota-se que, para esta redução, e para R compreendido entre 1 e 2.4, a eficiência apresenta-se maior e menor do que a eficiência obtida com o uso da vazão constante de 1.45 l/s e redução para 1.0 l/s, respectivamente.

Para sulcos de 75 m a redução da vazão deve obedecer ao seguinte critério: redução para 1.0 l/s caso a lâmina a ser aplicada no final do sulco exija valores de R próximo de 2, (conforme a FIGURA 7, lâminas de 25 mm); redução para 0.75

l/s quando R assume valores consideravelmente maiores do que 2.

A FIGURA 16 mostra a eficiência de aplicação, para sulcos de 100 m e vazão constante de 1,45 l/s e redução desta para 1.0 e 0.75 l/s, respectivamente.

A eficiência de aplicação com o uso da vazão de 1.45 l/s apresenta-se praticamente constante e igual a 67% para valores de R entre 1 e 2 e a partir de então começa a decrescer de forma mais acentuada, alcançando para R igual a 4, a marca de 59%.

A redução para 1.0 l/s causa um acréscimo considerável de 70 para 76% quando R varia de 1 para 2, respectivamente. O aumento de R de 2 para 3 indica um decréscimo muito pequeno da eficiência e para R igual a 4, atinge o mínimo de 74%.

A vazão reduzida para 0.75 l/s, feita para R igual a 2, causa um acréscimo na eficiência de aplicação de 66 para 73%, quando R varia de 2 para 4, respectivamente, porém, apresenta valores maiores e menores do que aqueles obtidos com a vazão de 1.45 l/s e redução para 1.0 l/s, respectivamente.

De um modo geral, para sulcos de 100 m, a redução de vazão mais eficiente é a de 1.45 para 1.0 l/s.

A FIGURA 17 mostra a eficiência de aplicação de água para sulcos de 125 m e vazão constante de 1.45 e redução para 1.0 e para 0.75 l/s, respectivamente.

A eficiência de aplicação para a vazão de 1.45 l/s decresce de 75 para 66% quando R aumenta de 1 para 4, respectivamente, mostrando-se praticamente constante, para valores de R entre 1 e 2.

A redução para 1.0 l/s causa um brusco acréscimo da eficiência de aplicação de 76 para 83%, quando R aumenta de 1 para 2 e mostra-se praticamente constante até R igual a 4, quando apresenta o valor igual a 82%.

A eficiência de aplicação para redução de 0.75 l/s, feita para R aproximadamente igual a 2.6, cresce até R igual a 4, de 70 para 77%, respectivamente.

Conforme observações e análise da FIGURA 17. percebe-se que, para sulcos de (25m, a redução mais eficiente é de 1,45 para 1,0 l/s).

A FIGURA 18 mostra a eficiência de distribuição de água em função de R. A variação de R de 1 para 2 causa um acréscimo na eficiência de distribuição de 80 para 88%, respectivamente. A partir deste valor até R igual a 4, este acréscimo é menos acentuado, alcançando o valor de aproximadamente 94%.

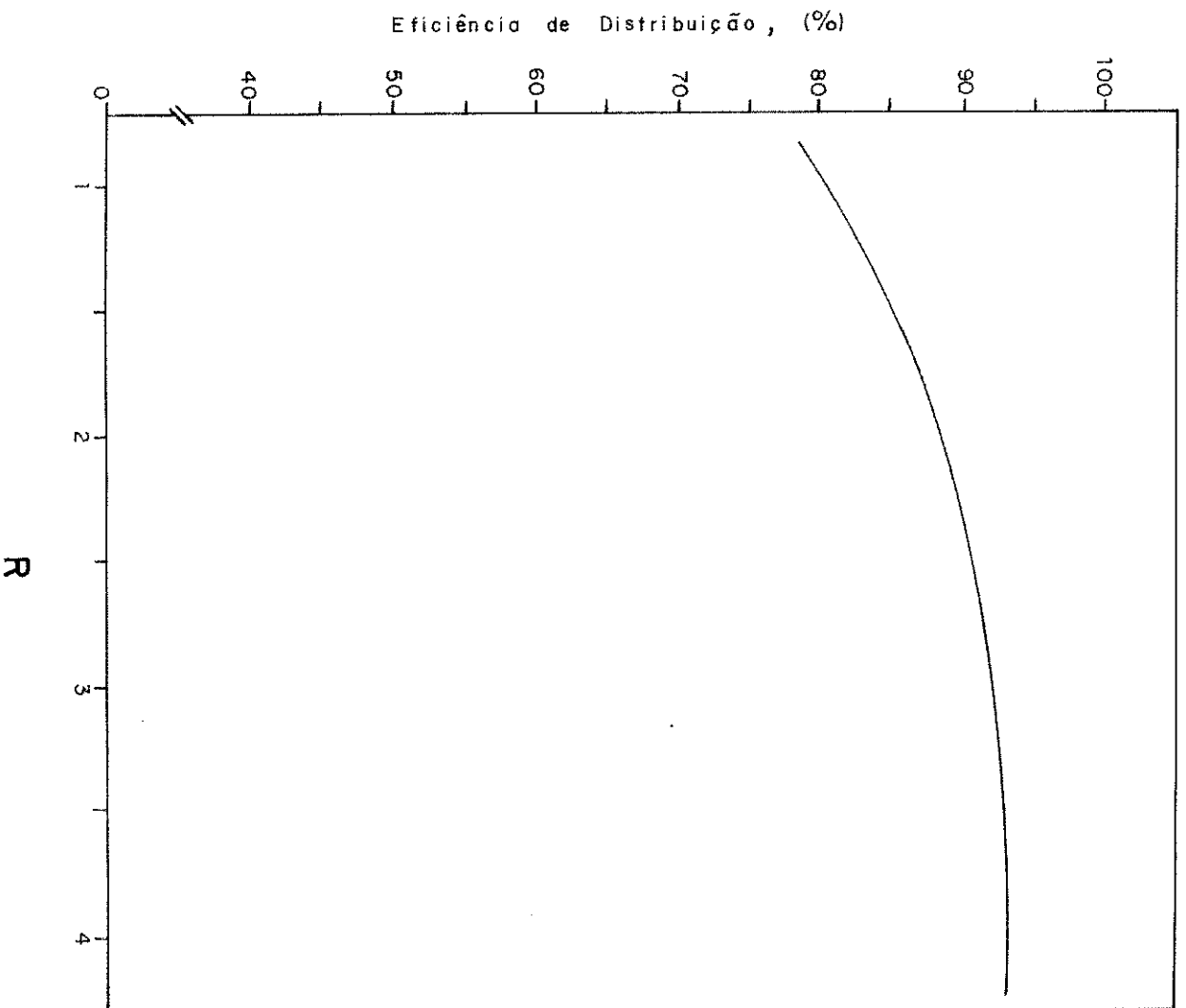


FIG. 18 - Eficiência de distribuição de água em função de R

CAPITULO V

CONCLUSÕES

- . A vazão máxima não erosiva real para a declividade de 0,29% foi de 1,45 l/s.
- . O uso da equação, da forma $q_{\text{máx}} = 0,613 S^{-0,733}$, fornece valores de vazões bem próxima da máxima não erosiva determinada em campo, equação esta que pode ser tomada como base na determinação deste parâmetro.
- . A equação $L = 10,62 T^{0,86}$ descreve o avanço d'água no sulco sem provocar erosão.
- . Na determinação dos parametros de irrigação usou-se a equação da forma $D = 4,78 T^{0,57}$
- . A redução da vazão recomendada, para qualquer valor de R, com aumento da eficiência de aplicação é de 1,45 para 1,0 l/s para sulcos maiores que 75 m. Para sulcos de até 75, redução para 0,75 l/s.
- . Recomenda-se sulcos de 100 e 125 m de comprimento, aplicando-se vazão de 1,45 l/s e reduzindo-se para 1,0 l/s, com uma eficiência de aplicação média de 75%.

- . Recomenda-se a utilização de sulcos com comprimento mínimo de 75 m e redução de vazão inicial de 1,45 para 0,75 l/s, com uma eficiência de aplicação média de 68%.
- . A eficiência de distribuição cresce com o aumento de R de 1 para 4, atingindo, para este último valor, aproximadamente 94%.

BIBLIOGRAFIA

1. AZEVEDO, H. M. 1975. Características de Infiltração em Sulcos Abertos e Fechados. UFPB/CCT. Campina Grande. (Tese M.Sc). 56p.
2. AZEVEDO, H. M; MILLAR, A. A e CARVALLO, H. O. 1975. Implicações Agronômicas do Efeito de Umidade Sobre a Capacidade de Infiltração do Solo. In: Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem, 3º, Fortaleza. MINTER/DNOCS/ABID-4º Vol. p. 51 - 58.
3. BERNARDO, S. 1982. Manual de Irrigação. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 463p.
4. BISHOP, A. A. 1962. The Relation of Intake to Length of Run in Surface Irrigation. ASCE, Proceedings. IR 3(127):282-293.
5. BISHOP, A. A., JENSEN, M. E. and HALL, W. A. 1967. Surface Irrigation Systems. In: "Irrigation of Agricultural Lands". pp 865 - 884. Amer. Soc. Agrn. Madison, Wisconsin, USA.
6. BOERS, M e MILLAR, A. A. 1974. Algumas Culturas Irrigadas por Sulcos em Contorno no Aluvião do Médio São Francisco. IICA. Petrolina, PE. Publicações Miscelâneas nº 122. 89p.
7. BOOHER, L. J. 1974. El Riego Superficial. FAO, Coleccion 3, Cuadernos de Fomento Agropecuario 95. Roma. 162p.

8. BOS, M. G. and NUGTEREN, J. 1978. On Irrigation Efficiencies. International Institute for Land Reclamation and Improvement/IRLI. Publication 19. Wageningen. 139p.
9. BRITO, R. A. L. e OLIVEIRA, C. A. V. 1980. Análise Estatística de Alguns Parâmetros Quanto a Seus Efeitos Sobre a Eficiência de Aplicação em Irrigação por Sulcos. IN: V Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem. 3º Vol. São Paulo.
10. DAKER, A. 1976. Água na Agricultura: Irrigação e Drenagem. R. de Janeiro. F. Bastos. 1º Vol. 453p.
11. DAY, P. R. 1965. Particle Fractionation and Particle Size. In: Black, C.A - Methods of Soil Analysis. Madison, American Society of Agronomy, P. 545 - 567.
12. FOK, Y. S. and BISHOP, A. A. 1965. Analysis of Water Advance in Surface Irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, Proceedings. IR 1(91); 99 - 116.
13. GAVANDE, S. A. 1979. Física de Suelos: Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa. México. 351p.
14. GOMES, F. P. 1978 - Curso de Estatística Experimental, USP, ESCALQ. Liv. Nobel. Piracicaba, 430p.
15. GRANADOS, A. H. 1971. Métodos Modernos de Riego de Superficie. Aguilar S.a. Ediciones. Madrid, Españã. 463p.
16. GRASSI, C. J. 1972. Métodos de Riego. CIDIAT, Documento 72. Mérida, Venezuela. 270p.
17. GRASSI, C. J. 1968. Estimacion de los Usos Consuntivos de Agua y Requerimientos de Riego con Fines de Formulacion y Diseño de Proyectos. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 96p.

18. GUROVICH, L. A. 1979. Infiltração del Agua en Suelo. IICA, EMBRAPA, CPATSA. Petrolina, PE. 204p.
19. HAMAD, S. and STRINGHAM, G. E. 1978. Maximun Nonerosive Furrow Irrigaon Stream Size. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, Proceedings. IR 3(104): 275-281.
20. HILLEL, D. 1971. Soil and Water. New York. Academic Press. 288p.
21. ISRAELSEN, O. E. e HANSEN, V. E. 1965. Principios e Aplicaciones del Regadio. 2a. edicion, Reverté. Barcelona 393p.
22. LEAL, M. V. 1979. Determinação da Eficiência de Irrigação, a Nível de Parcela, no Projeto de Irrigação Bebedouro. Petrolina, PE. UFV, Viçosa 94p. (Tese M.Sc)
23. LOPES, J. E. 1973. Riego por Sulcos. CIDIAT, GEIDA, SUDENE. Petrolina, Pe. 46p.
24. MILLAR, A. A., AZEVEDO, H. M. e POSSÍDIO, E. L. 1978. Metodologia para Adequação de Parâmetros do Método de Irrigação por Sulcos para uso pela Assistência Técnica. In: Resultados Experimentais de Investigaciones de Riego. CODEVASF/FAO. Apêndice VI.
25. MOORE, D. I. 1981. Infiltration Equations Modified por Surface Effects. Journal of the Irrigation and Drainage. ASCE, Proceedings. IR 1(107) 71 - 85.
26. OLITTA, A. F. L. 1978. Os Métodos de Irrigação. Liv. Nobel S.A. São Paulo. 267p.
27. POIREE, M. E. e OLLIER, C. 1970. El Regadio. 2^a edition, Barcelona. E. T. Associados S.a.

28. REICHARDT, K. 1975. Processos de Transferência no Sistema Solo - Planta - Atmosfera. USP/CNEN. Fundação Cargill. 3^a edição. São Paulo
29. RICHARDS, L. A. 1947 - Pressure Membrane Apparatus and Use Agronomy - Engenharia, 28: 451 - 454.
30. RESENDE, M. 1972. Eficiência de Irrigação em Sulco com Variação da Vazão Inicial. UFRGS, Centro de Hidrologia Aplicada, 57p. (Tese M. Sc.)
31. SALINAS, L. H. e BRITO, R. A. L. 1982. Impactos Físicos e Considerações Sobre uma Política de Manejo para o Projeto de Irrigação do Baixo Açú. I Simpósio Brasileiro Sobre o Trópico Semi-Árido. Olinda, PE.
32. SKAGGS, R. W., MILLER, D. E. and BROOKS, R. H. Soil and Water. Part I - Properties. In: Design and Operation of Farm Irrigation. pp. 77 - 124. Edited by M. E. JENSEN. ASAE, Monograph Number 3. Michigan, USA.
33. SOARES, J. M., BERNARDO, S., BRITO, R. A. L. e FERREIRA, P. A. 1981. Análise Comparativa Entre o Uso da Vazão Constante e Redução da Vazão Inicial e Seu Efeito na Eficiência de Irrigação por Sulco.
34. SOARES, J. M., BERNARDO, S., BRITO, R. A. L. e FERREIRA, P. A. 1984. Irrigação por Sulco com e sem Utilização da Água de Escoamento. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19 (1): 59 - 66.
35. SOARES, J. M. 1980. Eficiência de Irrigação por Sulco com Redução de Vazão e/ou Reuso de "Runoff". UFV, Viçosa. 131p. (Tese M.Sc).

36. SILVA, A. T. & DUARTE, E. F. Irrigação: Fundamentos e Métodos. UFRJ, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, 1980.
37. WITHERS, B. & VIPOND, S. 1978. Irrigation Design and a Practice. B. T. Bastiford Limited. London. 306p.
38. WILLARDSON, L. S. and BISHOP, A. A. 1967. Analysis of Surface Irrigation Application Efficiency. Journal of the Irrigation and Drainage Divison. ASCE, Proceedings. IR 2(93): 21 - 36.
39. ZIMMERMAN, J. D. 1966. El Riego. C. E. Continental S.A. México.