

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS PARA  
ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM  
IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

**GLEIDSON MARQUES PEREIRA**

**FORTALEZA - CE  
2007**

# **ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS PARA ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

**GLEIDSON MARQUES PEREIRA**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências para a obtenção do grau de Mestre.

**MAIO - 2007  
FORTALEZA - CEARÁ  
BRASIL**

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, outorgado pela Universidade Federal do Ceará. Uma via do presente estudo encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Tecnologia da referida Universidade.

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

---

Gleidson Marques Pereira

Dissertação aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

---

Prof. Raimundo Nonato Távora Costa – D.Sc.  
(Orientador)

---

Prof. Raimundo Nonato Assis Júnior – D.Sc.  
(Co-Orientador)

---

Prof. Tarcísio Ewerton Rodrigues – D.Sc.  
(Conselheiro)

## ÍNDICE

LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
RESUMO .....	vii
SUMMARY .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	02
2.1. Infiltração da água no solo.....	02
2.2. Fatores que afetam o processo de infiltração .....	05
2.3. Técnicas de determinação das características de infiltração .....	07
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. Caracterização da área do experimento .....	11
3.2. Procedimento de calibração dos medidores Parshall.....	11
3.3. Delineamento experimental.....	12
3.4. Equipamento utilizado, procedimento dos testes e análise de dados .....	13
3.4.1. Cilindro Infiltrômetro .....	13
3.4.2. Sulco infiltrômetro.....	14
3.4.3. Entrada e Saída.....	15
3.4.4. Balanço de volume I .....	16
3.4.5. Balanço de volume II .....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
4.1. Análise dos parâmetros empíricos da equação de infiltração.....	23

5. CONCLUSÕES .....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
ANEXOS .....	40

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1</b> Atributos físicos e químicos do solo da área do experimento.....	11
<b>Tabela 2</b> Conteúdo de água no solo antes da realização dos testes .....	23
<b>Tabela 3</b> Constantes numéricas $k$ (mm) e $a$ da equação de infiltração acumulada de Kostiakov para os tratamentos analisados	24
<b>Tabela 4</b> Equações de velocidade de infiltração em cada tratamento e repetição .....	31
<b>Tabela 5</b> Análise de Variância para os valores médios da constante numérica $k$ .....	33
<b>Tabela 6</b> Análise de Variância para os valores médios da constante numérica $a$ .....	33
<b>Tabela 7</b> Teste de Tukey para médias dos tratamentos da constante numérica $k$ .....	33
<b>Tabela 8</b> Teste de Tukey para médias dos tratamentos da constante numérica $a$ .....	33

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> Área do experimento na Fazenda Experimental Vale do Curu .....	12
<b>Figura 2</b> Teste de campo com cilindro infiltrômetro .....	14
<b>Figura 3</b> Teste de campo com sulco infiltrômetro .....	15
<b>Figura 4</b> Teste de campo pelo método de entrada e saída .....	16
<b>Figura 5</b> Infiltração acumulada em função tempo acumulado – técnica cilindro infiltrômetro	25
<b>Figura 6</b> Infiltração acumulada em função tempo acumulado – técnica sulco infiltrômetro	26
<b>Figura 7</b> Infiltração acumulada em função tempo acumulado – técnica de entrada e saída	26
<b>Figura 8</b> Infiltração acumulada em função tempo acumulado – técnica balanço de volume I	27
<b>Figura 9</b> Infiltração acumulada em função tempo acumulado – técnica balanço de volume II	27
<b>Figura 10</b> Infiltração acumulada em função do tempo acumulado – Teste nº 1 .....	29
<b>Figura 11</b> Infiltração acumulada em função do tempo acumulado – Teste nº 2 .....	29
<b>Figura 12</b> Infiltração acumulada em função do tempo acumulado – Teste nº 3 .....	30
<b>Figura 13</b> Infiltração acumulada em função do tempo acumulado – Teste nº 4 .....	30

## **RESUMO**

### **ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS PARA ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO**

O estudo teve como objetivo proceder a uma análise comparativa de técnicas para estimativa da infiltração de água no solo, com vistas ao dimensionamento, manejo e avaliação de sistemas de irrigação por sulcos. O estudo foi conduzido no período de janeiro a fevereiro de 2006 na área AT<sub>1</sub> da Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, Estado do Ceará, em um Neossolo Flúvico de textura franco-arenosa. O delineamento experimental adotado foi o de blocos completamente casualizados, constando de cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos constaram das seguintes técnicas de infiltração de água no solo: cilindro-infiltrômetro, sulco-infiltrômetro, entrada-saída, balanço de volume I e balanço de volume II. A análise dos resultados permitiu as seguintes conclusões: - A lâmina de água infiltrada no solo apresentou um maior grau de dependência à variável preparo de solo se comparada à variável teor de água no solo; - As técnicas de balanço volumétrico apresentaram resultados semelhantes tanto no que diz respeito à lâmina infiltrada acumulada quanto ao regime assintótico; - As técnicas de entrada-saída e cilindro-infiltrômetro apresentaram valores de infiltração acumulada superestimados se comparados aos demais tratamentos analisados; - As técnicas de balanço volumétrico apresentaram um menor tempo de resposta à obtenção do regime assintótico, característica inerente ao processo físico da infiltração de água no solo.

Palavras-chave: infiltrômetro, fluxo de água, constantes de Kostiakov, manejo da irrigação.

## **SUMMARY**

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR ESTIMATE OF THE WATER INFILTRATION IN THE SOIL**

The study it had as objective to proceed to a comparative analysis of techniques for estimate of the water infiltration in the soil, with sights to the sizing, handling and evaluation of systems of irrigation for furrow. The study was lead in the period of January the February of 2006 in area AT1 of the Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, Ceará State, in one Neossolo Flúvico of sand loam texture. The adopted experimental delineation was randomized blocks design, consisting of five treatments and four replications. The treatments had consisted of the following techniques of water infiltration in the ground: cylinder infiltrometer, furrow infiltrometer, inflow-outflow, volume balance I and volume balance II. The analysis of the results allowed the following conclusions: - The water infiltrated in the soil presented a bigger degree of dependence to the variable soil tillage if compared with the variable text of water content. - The techniques of volumetric balance had presented resulted similar in what it says respect to the water infiltrated accumulated how much to the asymptotic regime, allowing to recommends the methodology preconized for Christiansen (1966) in situations where the use of the methodology of Walker and Skogerboe (1987) that if present limitation. - The techniques of inflow-outflow and cylinder infiltrometer had presented values of accumulated infiltration overestimated if compared with the too much analyzed treatments, above all to the methodologies of volumetric balance. - The techniques of volumetric balance had presented a lesser time of reply to the attainment of the asymptotic regime, characteristic inherent to the physical process of the water infiltration in the soil.

Keywords: infiltrometer, water flow, Kostiakov, water handling for irrigation.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, por ser um país muito extenso, apresenta ecossistemas com grande diversidade de climas, solos e sistemas agrícolas. Os ecossistemas de várzeas, com cerca de 30 milhões de hectares irrigáveis, dos quais, 10 milhões de hectares estão próximos aos grandes centros, constituem um comprovado potencial para exploração agrícola. Dos cerca de 2,87 milhões de hectares irrigados, a irrigação por superfície continua a ser a mais utilizada, abrangendo 59% e sendo predominante nas Regiões Nordeste e Sul (Christofidis, 1999).

O manejo eficiente de um sistema de irrigação depende em grande parte do conhecimento de características físico-hídricas do solo, sendo que para os sistemas de irrigação por superfície, as características de infiltração de água no solo, é um dos principais parâmetros requeridos para dimensionamento, operação, manejo e avaliação desses sistemas de irrigação.

A infiltração é de grande importância prática, sendo definida como o processo pelo qual a água penetra no solo, através da superfície. Considerado um fenômeno complexo, com inúmeras variáveis dependentes, dentre elas a porosidade, a umidade, as atividades biológicas, a cobertura vegetal, a rugosidade superficial e a declividade do terreno.

Muito embora existam várias técnicas de determinação das características de infiltração como o cilindro-infiltrômetro, sulco-infiltrômetro, entrada e saída, balanço de volume I (Christiansen, 1966) e balanço de volume II (Walker & Skogerboe, 1987), esta propriedade ainda é muitas vezes estimada de forma imprecisa.

A hipótese assumida neste estudo é a de que o dimensionamento, o manejo e a avaliação de sistemas de irrigação por sulcos só devem ser realizados a partir de valores de características de infiltração obtidos pela técnica do balanço de volume II.

Assim, o estudo tem como objetivo proceder a uma análise comparativa de técnicas para estimativa da infiltração de água no solo, com vistas ao dimensionamento, manejo e avaliação de sistemas de irrigação por sulcos.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Infiltração da água no solo

Infiltração é o nome dado ao processo pelo qual a água penetra no solo, através de sua superfície. A velocidade de infiltração é um fator muito importante, pois determina o tempo em que se deve manter a água na superfície do solo de modo a se aplicar a quantidade de água desejada (Bernardo, 1995). A infiltração é um fenômeno complexo, que depende de inúmeras variáveis relacionadas às características físicas e morfológicas do solo (Rezende & Scaloppi, 1985 e Walker & Skogerboe, 1987). Walker (1993) comenta que as principais características físicas do solo que afetam a taxa de infiltração são: textura, estrutura e declive. Comenta, ainda, que as práticas culturais podem interferir no aumento ou no decréscimo da infiltração, dependendo do equipamento utilizado e da umidade do solo.

As características de infiltração da água no solo constituem um dos principais parâmetros requeridos para dimensionamento, operação, manejo e avaliação dos sistemas de irrigação por superfície (Bondurant, 1957; Rezende & Scaloppi, 1985; Bautista & Wallander, 1993; Esfandiari & Maheshwari, 1997). Segundo Collins & Campbell (1967), uma função expressando a infiltração em função do tempo é essencial na determinação da quantidade de água absorvida a qualquer distância ao longo do sulco, o que auxilia a determinação do tempo de oportunidade para infiltrar a lâmina necessária de irrigação.

Elliott & Walker (1982); Camacho *et al.* (1997) e Austin & Prendergast (1997) entendem que a infiltração da água no solo é uma das características mais difíceis de se quantificar, por apresentar grande variabilidade espacial e temporal. Carvalho *et al.* (1999) consideram que a variabilidade espacial e temporal, sobretudo das características de infiltração, resulta em variações no tempo de aplicação de água.

A importância de caracterizar a infiltração reside especialmente no fato desta influenciar no valor da vazão de entrada e tempo de irrigação (Walker, 1993 e Childs *et al.*, 1993). Childs *et al.* (1993) ao trabalharem com solos de diferentes texturas, submetidos à diferentes tempos de irrigação, verificaram o efeito significativo da textura do solo no desempenho dos sistemas irrigados.

Segundo Walker & Skogerboe (1987) e Frizzone (1993), a infiltração é o fator mais importante na irrigação por superfície, pois controla essencialmente a quantidade de água que entra no solo, como também o avanço da água e a sua recessão. Pereira (1995) informa que diversos modelos podem ser utilizados para descrever a penetração da água e sua distribuição no perfil do solo.

Para Frizzone (1993), a infiltração é um processo complexo, que depende das propriedades físicas do solo, do seu conteúdo inicial de água, da forma de umedecimento, das variações de permeabilidade devido ao movimento da água na superfície e ao ar retido nos poros. Walker (1993) afirma que em irrigação por superfície a infiltração varia drasticamente para cada irrigação, e segundo Frizzone (1993), isto é devido às variações na rugosidade e na geometria da superfície de escoamento.

Booher (1974), Walker & Skogerboe (1987), Bautista & Wallander (1993) indicam que um ótimo dimensionamento e manejo dos sistemas irrigados por superfície requerem o conhecimento detalhado das características de infiltração do campo. Porém, a complexidade do fenômeno dificulta a obtenção de uma função de infiltração representativa durante o período de cultivo.

Walker (1993) sugere que a interpretação dos dados de campo relativo às características de infiltração seja descrita por uma equação estatística. Diversas equações têm sido descritas, mas, a mais comum e mais usada é a equação de Kostiakov, na forma:

$$Z = k.t^a$$

sendo:

$Z$  : Infiltração acumulada,  $m^3.m^{-1}$ .

$t$  : Tempo de oportunidade, minutos

$k$  e  $a$  : Constantes empíricas.

Esta equação tem grande limitação, por não descrever bem o processo de infiltração para longos períodos de tempo. Foi desenvolvida a equação de Kostiakov-Lewis modificada, a qual contém um termo que considera a velocidade de infiltração básica da água no solo, descrita na forma:

$$Z = k.t^a + f_0.t$$

sendo:

$f_0$  : Velocidade de infiltração básica de água no solo em  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .

A equação de Kostiakov-Lewis reduz-se à equação Kostiakov se  $f_0$  se aproxima de zero ou se o tempo de irrigação é curto, comparado ao tempo requerido para que a infiltração alcance a velocidade de infiltração básica; no entanto a equação de Kostiakov-Lewis aproxima-se melhor da condição real de infiltração em muitos tipos de solo.

Souza (1983) verificou que o maior efeito da constante  $a$  está na forma da curva de infiltração acumulada. Verificou, ainda, que as variações nos valores de  $k$  e  $a$  não foram significativas nos valores de lâmina infiltrada acumulada.

Segundo Reichardt (1996), o conhecimento da variável infiltração é imprescindível para a elaboração de um projeto de irrigação. A determinação da infiltração tem sido amplamente estudada e ainda não existe um parecer geral sobre qual é o melhor método para sua determinação. Entre as características físicas do solo, a infiltração é uma das mais importantes quando se estudam fenômenos que estão ligados ao movimento da água no solo (Carvalho, 2000).

Para Pruski *et al.* (1997), a infiltração de água no solo deve ser quantificada por meio de métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições naturais em que se encontra o solo. Os autores afirmam que a taxa de infiltração é afetada pelos seguintes fatores: conteúdo inicial de água no solo, condições da superfície do solo, condutividade hidráulica do solo saturado, distribuição de tamanho e volume de poros, presença de horizontes estratificados, distância entre a frente de suprimento de água e frente de umedecimento, textura e tipo de argila. Os resultados obtidos são ainda grandemente dependentes do método utilizado para sua determinação. Sendo assim, o conhecimento dessas condições é de fundamental importância para a interpretação dos resultados.

Muitos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para descrever o fluxo de água nos solos, particularmente a infiltração vertical. As equações de infiltração podem ser classificadas em três categorias:

(a) modelos baseados em relações gerais para fluxo em meios porosos – são equações baseadas em uma solução da equação unidimensional de Darcy, conhecida como equação de Richards.

(b) modelos físicos – fundamentam-se na suposição de um modelo de solo simplificado, isto é, o solo pode ser representado por um feixe de tubos capilares. As equações dessa categoria são similares ou podem ser derivadas da equação de Green-Ampt.

(c) equações empíricas – são baseadas no ajuste estatístico de dados experimentais de infiltração a funções explícitas dependentes do tempo.

## **2.2. Fatores que afetam o processo de infiltração**

São vários os fatores que afetam o processo de infiltração, dentre os quais se destacam: as condições da superfície do solo, o conteúdo inicial de água no perfil do solo, o tempo de infiltração, a existência de camadas menos permeáveis ao longo do perfil, a topografia do terreno e as propriedades físicas do solo (Bernardo, 1995; Daker, 1988; Hillel, 1982; Rezende & Scaloppi (1985). Segundo Moore & Larson (1980) o encrostamento, ou selamento superficial, é um processo causado principalmente pelo impacto das gotas de chuva na superfície do solo. A crosta superficial, embora sendo de pequena espessura, reduz significativamente a infiltração, aumentando o escoamento superficial.

Segundo Corrêa (1986), no Brasil, ainda são poucos os estudos que dimensionam a variabilidade espacial dentro de uma unidade de solo e entre unidades taxonômicas, com os principais parâmetros do solo. Segundo Nielsen *et al.* (1973), áreas aparentemente uniformes podem apresentar grande variação, seja qual for o parâmetro analisado. Conforme Machado (1994), se essa variação não for corretamente observada, o planejamento do manejo do solo, bem como, a eficiência de projetos de irrigação, de drenagem e de conservação do solo, além dos resultados de pesquisa, podem ser comprometidos.

Pelo fato da infiltração constituir o processo pelo qual a água penetra no solo através de sua superfície, sua magnitude é severamente reduzida pela formação ou presença do selamento superficial, fenômeno causado devido à pequena porosidade desta camada e à dominância de poros de pequeno diâmetro (Chaves *et al.*, 1993).

De acordo com Derpsch *et al.* (1991), Tavares Filho & Tessier (1998) e De Maria *et al.*, (1999), os diferentes sistemas de manejo de solos têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Todavia, o desrespeito às condições mais

favoráveis (solo úmido - consistência friável) para o preparo do solo e o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações pode levar a modificações na estrutura do solo, causando-lhe maior ou menor compactação, que poderá interferir na infiltração de água no solo, na condutividade hidráulica do solo saturado e no desenvolvimento radicular das culturas.

Quando um solo começa a ser cultivado há alterações na sua estrutura natural. Lal (1979) verificou no período de um ano, redução de 40 a 73% na infiltração acumulada, em área cultivada com milho. E em outra preparada e sem cobertura, no mesmo período, respectivamente, comparadas com uma área sob floresta. Segundo o autor, as diferenças foram devidas às alterações na estrutura, sobretudo na superfície. A energia cinética das gotas de chuva é responsável por essas alterações, causando o selamento, que reduz a infiltração acumulada e a taxa de infiltração.

Segundo Basset *et al.* (1983) em virtude da taxa de infiltração ser uma função decrescente com o tempo de oportunidade, implica em maiores valores imediatamente após a frente de molhamento, diminuindo progressivamente à medida que se afasta do ponto de derivação de água, pois, a ocorrência da infiltração reduz o fluxo superficial, tornando-o variável com a distância e com o tempo.

Segundo Reichert *et al.* (1992), a textura do solo afeta o salpico de partículas provocado pelo impacto das gotas de chuva, contribuindo para uma redução da porosidade da camada superficial do solo. Além do impacto da gota, Morin & Van Winkel (1996) citam a dispersão físico-química das argilas do solo como causa da formação do selamento superficial e, conseqüentemente, da redução da taxa de infiltração.

Cuenca (1989) afirma que a quantificação da velocidade de infiltração da água no solo, em projetos de irrigação por aspersão, tem como objetivo estabelecer a taxa máxima de aplicação de água dos aspersores que serão instalados no campo, para que não ocorram perdas por escoamento superficial. Sugere que para solos de textura argilosa com declividade entre 5 e 8%, a taxa de aplicação máxima de sistemas de irrigação por aspersão esteja entre 3,0 e 6,0 mm.h<sup>-1</sup>.

Pesquisas têm demonstrado claramente o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo. A compactação aumenta a densidade e sua resistência mecânica (Hillel,

1982; Moraes, 1984), mas, diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (Hillel, 1982; Moraes, 1984; Smucker & Erickson, 1989). A compactação do solo pode ter efeitos benéficos, atribuídos à melhoria do contato solo-semente (Smucker & Erickson, 1989) e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (Raghavan & Micky, 1983). Entretanto, a compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (Smucker & Erickson, 1989) resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (Soane, 1990).

### **2.3. Técnicas de determinação das características de infiltração**

Uma das principais preocupações na avaliação da infiltração da água no solo é a escolha de um método adequado ao tipo de irrigação. A utilidade de cada método está relacionada à finalidade dos dados, à precisão desejada, à facilidade de manejo e ao custo operacional. Os métodos mais utilizados são: entrada e saída de água no sulco, infiltrômetro de anéis concêntricos, sulco infiltrômetro, balanço de volume (proposto por Christiansen, 1966) e (proposto por Walker & Skogerboe, 1987).

A infiltração de água no solo pode ser determinada por diversas metodologias, dentre as quais se destacam: o infiltrômetro de anéis concêntricos (IANC) e o infiltrômetro de aspersores (IAS). A escolha da metodologia depende do sistema de irrigação a ser utilizado e, segundo Bower (1986) o infiltrômetro de anéis concêntricos não deve ser utilizado em sistemas de irrigação por aspersão, sendo mais recomendado, neste caso, o infiltrômetro de aspersores. Coelho *et al.* (1992), estudando a variabilidade espacial das equações de infiltração de água no solo pelo método do IANC, concluíram que esta metodologia, apesar de sua praticidade e portabilidade, poderia comprometer a operação de um sistema de irrigação que viesse a ser dimensionado, levando-se em consideração a elevada velocidade de infiltração básica obtida em alguns ensaios.

Bernardo (1995) recomenda a utilização de dois cilindros, sendo o menor com diâmetro de 25 centímetros e o maior 50 centímetros, ambos com 30 centímetros de altura. Instalados de modo concêntricos na vertical e enterrado a 15 cm.

Espínola (1977), comparando métodos de determinação da infiltração concluiu que o cilindro infiltrômetro produziu valores de laminas infiltradas mais elevadas e atribuiu este resultado ao método de instalação do equipamento, pois constatou deformação na estrutura, quebrando ou compactando o solo pelo cilindro medidor. Já Bertrand (1965) concluiu que no contato solo-parede do cilindro infiltrômetro, em conjunto com outros fatores (umidade e quebra ou compactação do solo), poderiam proporcionar alto grau de variação nos valores obtidos por este método, recomendando a instalação dos cilindros com um certo período de antecedência às diversas determinações, para observar o comportamento das variações ocorridas.

Já para Bondurant (1957), o sulco infiltrômetro foi projetado para aproximar as condições existentes durante uma irrigação e medir diretamente a taxa de infiltração de água no sulco. Bernardo (1995) recomenda uma seção transversal do sulco de 1.0 metro de comprimento para isolamento com duas placas de metal. O nível de água a ser mantido constante na seção transversal, deve permitir uma oscilação máxima de 2.0 centímetros, por um mecanismo de válvula.

Segundo Erie (1962), o uso do sulco infiltrômetro para medições da taxa de infiltração apresenta a mesma desvantagem do cilindro infiltrômetro, pois, somente uma pequena porção de área é levada em consideração.

Augusto (1984) obteve constantes numéricas da equação de infiltração ligeiramente elevadas com o sulco infiltrômetro, e atribuiu estes resultados à influência marcante do perímetro molhado na infiltração em sulcos, e ao confinamento da água que não leva em consideração o movimento da mesma sobre a superfície.

Espínola (1977) recomendaram o uso de dados de infiltração do sulco infiltrômetro para fins de parametrização de sistemas por sulcos, por que considera de fácil manejo, equipamento barato, fácil construção e utiliza uma área maior do que o cilindro infiltrômetro, dando maior representatividade à informação de campo.

A técnica de entrada e saída (Criddle *et al.* 1956) permite determinar a taxa de infiltração em sulcos, nas condições normais de irrigação, pela determinação de vazão de entrada e saída do fluxo d'água que passa pelos mesmos.

Para Bernardo (1995), o método da entrada e saída d'água no sulco, consiste em colocar dois medidores de vazão, um na extremidade superior do sulco e outro afastado deste, em função do tipo de solo. A vazão de entrada no sulco subtraído da vazão de saída, num dado intervalo de tempo, é igual a taxa de infiltração mais a variação de armazenamento superficial. Desta maneira, a diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída em um dado tempo pode ser assumida como representante da taxa de infiltração do solo (Shockley *et al.*, 1959).

Merriam (1968) recomenda a técnica de entrada e saída do fluxo d'água para determinação da taxa de infiltração, para fins de avaliação da irrigação por sulcos. E, com relação ao comprimento dos sulcos para realização do teste, recomenda para solos de rápida à moderada taxa de infiltração segmentos de sulcos de 30 metros, e para sulcos com taxa de infiltração lenta, 60 metros. Uma variação de 30 a 75 metros é recomendada por Karmeli *et al.* (1978). Em solos argilosos, o segmento do sulco deve ser no máximo de 40 m e em solos arenosos, de 20 m (Bernardo, 1995). Augusto (1984), trabalhando em solo franco, usou o comprimento total do sulco de 80 metros.

Augusto (1984) recomenda o método de entrada e saída do fluxo d'água para se determinar às características de infiltração do solo, para estudos de avaliação de irrigação por sulcos, uma vez que elas podem ser obtidas no momento da irrigação.

Christiansen *et al.* (1966) apresentaram um método para calcular a taxa de infiltração a partir do seu estudo da técnica de balanço de volume, comprovando que a taxa de avanço em sulcos proporciona uma base para o cálculo da função de infiltração sem quaisquer distúrbios das condições naturais.

Costa *et al.* (1999) compararam os resultados obtidos na determinação da capacidade de infiltração de água de um solo Latossolo-Roxo distrófico, na região de Lavras, MG, pelas metodologias do infiltrômetro de anéis concêntricos e simulador de chuva. A velocidade básica de infiltração na média de três repetições de cada metodologia indicou valores de  $21,90 \text{ mm.h}^{-1}$  para o simulador de chuvas e de  $47,22 \text{ mm.h}^{-1}$  para os anéis de infiltração, concluindo-se que o valor da capacidade de infiltração determinada pelo simulador de chuvas é menor que o obtido com os anéis de infiltração, devido à ação

combinada da chuva e do escoamento superficial, sugerindo o emprego do simulador de chuvas para projetos de irrigação por aspersão.

A avaliação da infiltração d'água no solo depende da escolha de um infiltrômetro adequado ao tipo de estudo que, por sua vez, irá depender do método de irrigação a ser usado e da necessidade de serem obtidos dados condizentes com o sistema de irrigação escolhido. O método de entrada e saída é de uso específico para o sistema de irrigação por sulcos. Segundo Vieira (1977), o infiltrômetro de anéis concêntricos é o mais usado, porém, tem suas limitações, quando usado para fins de elaboração de projetos de irrigação por aspersão ou para trabalhos em que os dados gerados sejam oriundos de precipitações naturais.

Castro (1998) realizou uma análise comparativa das metodologias sugeridas por Walker e Skogerboe (1987) com a de Criddle (1956) e verificou que esta última apresenta tempo de irrigação bastante elevado em relação à primeira, causando conseqüentemente uma redução na eficiência de aplicação. Neste estudo, a eficiência de aplicação obtida através da metodologia de Walker e Skogerboe em uma determinada irrigação foi de 75%, ao passo que através da metodologia de Criddle, esta eficiência de aplicação seria de apenas 49%.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da área do experimento

O estudo foi conduzido no período de janeiro a fevereiro de 2006 na área AT<sub>1</sub> da Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC), localizada no município de Pentecoste, Estado do Ceará.

O solo da área do experimento (Figura 1) é classificado como Neossolo Flúvico, apresentando relevo tipicamente plano, constituído de camadas estratificadas e sem relação pedogenética entre si, segundo classificação da Embrapa (2006). A camada de 0,0 a 0,30 m revela predominância da fração areia, com textura franco-arenosa. Na Tabela 1 são apresentados alguns atributos físicos e químicos do solo.

**Tabela 1.** Atributos físicos e químicos do solo da área do experimento.

Composição Granulométrica (g kg <sup>-1</sup> de solo)				Classe textural	Densidade do solo (kg m <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )
Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila				
180	550	210	60	Franco arenosa	1400	6,8	0,72

#### 3.2. Procedimento de calibração dos medidores Parshall

Utilizaram-se calhas Parshall como instrumentos para medição de água derivada aos sulcos de irrigação. Os testes de calibração das calhas Parshall foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC. As calhas Parshall foram encaixadas e vedadas dentro de uma calha de zinco simulando um canal. As vazões (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) foram controladas de modo a proporcionar diversas cargas hidráulicas (m), sendo medidas pelo método direto, em três repetições.

Um ajuste estatístico foi realizado com os pares de valores (vazão x carga hidráulica), cujo modelo de regressão potencial se mostrou significativo em nível de 1% de probabilidade com elevados valores de coeficientes de determinação.



**Figura 1.** Área do experimento na Fazenda Experimental Vale do Curu.

### 3.3. Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos completamente casualizados, constando de cinco tratamentos e quatro blocos ou repetições. De acordo com Gomes (1990), o modelo matemático associado ao delineamento é:

$$X_{ij} = m + t_i + b_j + e_{ij}$$

sendo:

$X_{ij}$ : observação do tratamento  $i$  na repetição  $j$ ;

$m$ : média geral;

$t_i$ : efeito do  $i$ -ésimo tratamento na variável dependente;

$b_j$ : efeito do  $j$ -ésimo bloco na variável dependente, e

$e_{ij}$ : erro aleatório atribuído à observação  $X_{ij}$ .

Os tratamentos referem-se às metodologias para estimativa da infiltração de água no solo, conforme discriminação a seguir:

Tratamento 1: Cilindro Infiltrômetro

Tratamento 2: Sulco Infiltrômetro

Tratamento 3: Entrada e Saída

Tratamento 4: Balanço de Volume I (proposta por Christiansen)

Tratamento 5: Balanço de Volume II (proposta por Walker & Skogerboe)

As análises estatísticas foram realizadas segundo o esquema de blocos completos casualizados, de acordo com os critérios estabelecidos pela estatística experimental (Gomes, 1990).

### **3.4. Equipamento utilizado, procedimento dos testes e análise de dados**

#### **3.4.1. Cilindro Infiltrômetro**

##### a. Equipamento utilizado

Dois cilindros de chapas com 50 e 25 cm de diâmetro, respectivamente, ambos com 30 cm de altura (Figura 2).

Régua graduada para medição do nível d'água no cilindro.

Plástico fino para impedir a infiltração quando a água foi introduzida no cilindro.

Vara de cano de duas polegadas e uma prancha de madeira para introdução dos cilindros no solo.

##### b. Procedimento:

Instalaram-se os cilindros no solo até uma profundidade de 0,10 m, por intermédio de golpes sucessivos com a vara de cano de duas polegadas, aplicados sobre a prancha de madeira apoiada sobre os cilindros de maneira que sua penetração fosse a melhor possível, na vertical, com o propósito de promover um perfeito contato do solo com suas paredes.

Cobriu-se o fundo do cilindro central com o plástico fino. Introduziu-se água no cilindro interno e externo até próximo do bordo superior. Retirou-se o plástico e, imediatamente, fez-se à primeira leitura de lâmina infiltrada, utilizando a régua graduada. As leituras de nível d'água e o tempo em que se fizeram às referidas medições foram anotadas e repetidas em intervalos de 1,2,5,5,10,10,15,15,30,30,30,30 min. Estes intervalos de tempo foram escolhidos arbitrariamente, porém, os intervalos de tempo de medições no início foram pequenos, em função do processo de infiltração ser mais rápido no início.

Obs.: O nível d'água nos dois cilindros foram mantidos aproximadamente iguais e, sempre que este descendesse em torno de 5,0 cm, reabasteciam-se ambos os cilindros.

##### c. Análise dos dados:

Os valores de tempo acumulado e lâminas infiltradas acumuladas foram analisados através de regressão.



**Figura 2.** Teste de campo com cilindro infiltrômetro.

### 3.4.2. Sulco infiltrômetro

#### a. Equipamento utilizado

Duas chapas semicirculares com raio de 0,30 m. Um reservatório com dispositivo externo transparente para a leitura do nível d'água e aplicação do princípio dos vasos comunicantes, conectado a uma mangueira na sua parte superior com o objetivo de manter o nível d'água constante no sulco infiltrômetro (Figura 3).

Uma lona plástica para inicialmente estabilizar e manter o nível d'água constante no sulco infiltrômetro e permitir uma maior precisão da infiltração no princípio do teste.

#### b. Procedimento:

Assentaram-se as duas chapas metálicas perpendiculares à secção transversal do sulco, a uma distância de 1,0 m uma da outra. O reservatório foi instalado próximo ao sulco infiltrômetro.

Cobriu-se a secção do sulco infiltrômetro com a lona plástica e adicionou-se água. Introduziu-se a ponta da mangueira de entrada de ar no nível d'água desejado, de forma a funcionar como um sistema de Mariotte. Retirou-se a lona plástica rápida e cuidadosamente sendo que o primeiro registro do nível d'água no tambor (reservatório), foi efetuado com dois minutos de teste, tendo em vista a oscilação da água no reservatório. Os tempos de registros de lâminas infiltradas seguiram os intervalos de 2,5,5,10,10,15,15,30,30,30,30, até estabilizar.

#### c. Análise dos dados:

Procedeu-se à análise dos valores de lâminas infiltradas e tempo da mesma forma que a descrita para o método do cilindro infiltrômetro.



**Figura 3.** Teste de campo com sulco infiltrômetro.

### 3.4.3. Entrada e Saída

#### a. Equipamento utilizado

Dois medidores Parshall de uma polegada e previamente calibrados, contendo régua graduada (Figura 4).

#### b. Procedimento:

Esta técnica requer somente as medições de vazão de entrada e de saída em uma secção do sulco, para estimar a infiltração.

Assentaram-se os dois medidores Parshall em um comprimento de sulco de 80 m. Deixou-se normalizar o fluxo d'água nos medidores Parshall para então serem tomadas as leituras de lâminas d'água, as quais foram posteriormente transformadas em vazões. Estes registros foram anotados com seus respectivos tempos, até estabilizar. A diferença entre a vazão de entrada e a de saída permitiu calcular a taxa de infiltração.

#### c. Análise dos dados:

Procedeu-se à análise de regressão linear para obtenção das equações de infiltração.



**Figura 4.** Teste de campo pelo método de entrada e saída

#### 3.4.4. Balanço de volume I

##### a. Equipamento utilizado:

Um medidor Parshall de uma polegada previamente calibrado contendo uma régua graduada.

##### b. Procedimento de campo:

Assentou-se o medidor Parshall no início do sulco para as medições das vazões de entrada. Estas medições foram realizadas de maneira semelhante à citada para a técnica de entrada e saída. Mediu-se a razão de avanço da água em cada estação.

##### c. Procedimento de escritório:

No desenvolvimento de sua metodologia Christiansen *et al.*(1966) fizeram duas suposições:

1. A lâmina infiltrada pode ser expressa por uma equação simples do tipo proposta por Kostiakov ( $Z = k t^a$ );

2. A distância de avanço da água no sulco é uma função potencial do tempo, ou seja;  $s = f t^h$ ;

sendo:

s: distância de avanço;

t: tempo correspondente;

f e h: parâmetros empíricos do modelo.

A equação geral de balanço de volume pode ser escrita na seguinte forma:

$$Qt_1 = \bar{y}.E.L. + \bar{z}.E.L;$$

sendo:

Q: vazão de entrada da água no sulco;

$t_1$ : um valor de tempo correspondente ao avanço da água a uma distância;

$Qt_1$ : volume de água que entra no sulco no tempo  $t_1$ ;

$\bar{y}.E.L.$ : volume de água superficial remanescente;

$\bar{z}.E.L.$ : volume de água infiltrado no solo;

E: espaçamento entre sulcos;

L: comprimento do sulco;

$\bar{y}$ : lâmina d'água média na superfície;

$\bar{z}$ : lâmina d'água média que infiltrou no sulco no tempo  $t_1$ ;

Dividindo a equação (2) pelo espaçamento entre sulcos (E),

temos:

$$q.t_1 = \bar{y}.L + \bar{z}.L$$

sendo:

q: vazão por unidade de largura. A equação acima pode ainda ser escrita na seguinte forma:  $(q.t_1)/L = \bar{y} + \bar{z}$ , onde o termo à esquerda representa a lâmina d'água que entra no sulco, para cada comprimento unitário.

A lâmina média superficial ( $\bar{y}$ ) é melhor determinada por regressão de  $(q.t)/L$  versus o tempo ( $t_1$ ). O coeficiente da equação obtida é considerado o valor de  $\bar{y}$ . De posse desse valor, pôde-se então determinar a lâmina que infiltrou no solo em cada estação ( $\bar{z}$ ), pela subtração de  $\bar{y}$  dos valores de  $(q.t)/L$ .

As constantes numéricas  $k$  e  $a$  da equação de infiltração acumulada de Kostiakov, foram obtidas através de regressão linear dos valores de  $\bar{z}$  com seus respectivos tempos ( $t_1$ ). A inclinação da reta é o valor de  $a$ , enquanto a ordenada a origem para  $t_1 = 1$  representa a expressão  $(FK)/(a+1)$ , sendo  $k$  o coeficiente da equação de infiltração instantânea; F é uma função beta que torna a expressão mais precisa, podendo ser obtida da seguinte forma:

$$F = \frac{(a-1) - h(a-1) + 2}{h+1}.$$

### 3.4.5. Balanço de volume II

01. Medição das variáveis de avaliação:

O principal objetivo da avaliação em sistemas de irrigação por superfície, segundo Walker (1993) é identificar práticas de manejo que possam melhorar a eficiência de irrigação. Para isso alguns dados de campo foram coletados, tais como:

- a) hidrógrafa de entrada;
- b) hidrógrafa de saída;
- c) curva de avanço e recessão;
- d) umidade do solo antes da irrigação;
- e) infiltração e capacidade de retenção de água no solo;
- f) geometria da seção transversal da área de fluxo.

1.1. Hidrógrafas:

As vazões de entrada e de saída nos sulcos foram medidas através de calhas Parshall de uma polegada, previamente calibradas, de forma a produzir uma hidrógrafa de entrada e uma hidrógrafa de saída. Teve-se o cuidado em manter o fluxo na calha de entrada constante. De posse dos resultados, confeccionaram-se as duas hidrógrafas, e após isso, integraram-se para se obter os volumes aplicados e os volumes escoados superficialmente.

Duas variáveis foram obtidas da comparação das hidrógrafas. Primeiro, o volume infiltrado no solo, obtido pela diferença entre o valor integrado das duas hidrógrafas.

Deste modo:

$$V_z = V_{en} - V_{saída} \quad (1)$$

em que  $V_z$ ,  $V_{en}$  e  $V_{saída}$  são o volume total infiltrado, o volume introduzido na parcela e o volume de escoamento superficial, respectivamente. A segunda variável definida pelas hidrógrafas de entrada e saída é a taxa de infiltração básica,  $f_0$  (em  $m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$ ), calculada conforme a seguinte equação:

$$f_0 = \frac{(Q_{en} - Q_{saída})}{L} \quad (2)$$

onde  $Q_{en}$  e  $Q_{saída}$  são as vazões em  $m^3 \cdot min^{-1}$  quando o fluxo atinge uma estabilidade nas calhas de entrada e saída, respectivamente e  $L$  é o comprimento do sulco em metros.

### 1.2. Avanço e recessão:

Para a confecção das curvas de avanço e de recessão, instalaram-se estacas, em espaços regulares de 10 em 10 m até os 80 m. Durante a fase de avanço, registraram-se o tempo em que a água atingia cada estação e para o registro da fase de recessão, o momento em que a lâmina de água decrescia a mais ou menos a metade da lâmina original. Este procedimento é utilizado para não superestimar o tempo de recessão. Quando for o caso, deve-se instalar uma estaca intermediária para registrar o tempo de avanço.

A trajetória do avanço foi descrita por uma função potencial do tipo:

$$x = pt_x^r \quad (3)$$

onde  $x$  é a distância do avanço em metros, atingida em  $t_x$  minutos e  $p$  e  $r$  são parâmetros de ajuste. Após a coleta dos dados no campo, utilizou-se a metodologia dos dois pontos proposta por Elliot e Walker (1982), a qual se baseia no princípio da conservação da massa. Neste método, mediu-se o tempo de avanço à metade do campo ( $t_{0,5L}$ ) e ao final ( $t_L$ ) e resolveu-se simultaneamente para definir os parâmetros da equação 3:

$$r = \frac{\log(L/0,5L)}{\log(t_L/t_{0,5L})} \quad (4)$$

e

$$p = \frac{L}{t_L^r} \quad (5)$$

### 1.3. Geometria do fluxo:

Para se descrever a geometria do sulco obtiveram-se durante a fase de avanço e reposição, a largura da água na superfície e respectiva lâmina de água superficial no ponto médio da largura do sulco. Tal procedimento foi realizado a intervalos de 1 cm na altura de água, até estabilizar.

Assim fez-se uma relação entre a largura e a profundidade da seguinte forma:

$$L_2 = \frac{\log(X_{total} / X_{média})}{\log(Y_{total} / Y_{média})} \quad (6)$$

e

$$L_1 = \frac{X_{total}}{(Y_{total})^{L_2}} \quad (7)$$

Fez-se uma relação entre a área e a lâmina de água no sulco, na qual:

$$A = a_1 \cdot Y^{a_2} \quad (8)$$

sendo que:

$$a_1 = \frac{L_1}{L_2 + 1} \quad (9)$$

$$a_2 = L_2 + 1 \quad (10)$$

O cálculo do perímetro molhado de forma mais rigorosa foi obtido por integração numérica utilizando-se a seguinte equação:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ [y_i - y_{(i-1)}]^2 + [0,5 \cdot [B_i - B_{(i-1)}]^2] \right\}^{0,5} \quad (11)$$

sendo:

Pm: perímetro molhado em metros

$y_i$ : lâmina no sulco em metros

$B_i$ : largura da superfície livre da água no sulco em metros.

Com esta equação podem-se obter os perímetros molhados total e médio e relacioná-los com a lâmina de água da seguinte maneira:

$$PM = b_1 \cdot Y^{b_2} \quad (12)$$

sendo que:

$$b_2 = \frac{\log(PM_{total} / PM_{médio})}{\log(Y_{total} / Y_{médio})} \quad (13)$$

E

$$b_1 = \frac{PMtotal}{(Ytotal)^{b_2}} \quad (14)$$

Para o cálculo da área de fluxo na entrada do sulco, utilizou-se a equação de Manning para fluxo uniforme:

$$A_0 = C_1 \left( \frac{Q_o \cdot n}{60 \cdot S_0^{1/2}} \right)^{C_2} \quad (15)$$

sendo:

$$C_2 = \frac{3a_2}{5a_2 - 2b_2} \quad (16)$$

e

$$C_1 = a_1 \left( \frac{b_1^{0,67}}{a_1^{1,67}} \right)^{C_2} \quad (17)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes geométricas do sulco.

#### 1.4. Infiltração:

Para o cálculo das constantes de infiltração de Kostiakov-Lewis ( $a$  e  $K$ ), utilizou-se a equação do balanço de volume para qualquer tempo da seguinte forma:

$$Q_o t = S_y \cdot A_0 \cdot X + S_z \cdot K \cdot t^a \cdot X + \frac{fo \cdot t \cdot X}{1+r} \quad (18)$$

Onde  $Q_o$  é a vazão de entrada, em  $m^3 \cdot min^{-1}$  e  $t$  é o tempo transcorrido desde o início da irrigação, em min,  $A_0$  é a área da seção transversal de fluxo na entrada em  $m^2$ ,  $S_z$  é o fator de forma definido como:

$$S_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+r) \cdot (1+a)} \quad (19)$$

A área da seção transversal do fluxo na entrada  $A_o$ , foi calculada como descrito na equação 15.

A equação 18 é escrita para dois pontos do avanço de forma a definir os parâmetros de infiltração  $a$  e  $K$ . Os dois pontos do avanço medidos foram, à metade do sulco ( $L/2$ ) e ao final do sulco ( $L$ ). Assim, para a metade do campo, o avanço é:

$$Q_o \cdot t_{0,5L} = \frac{S_y \cdot A_0 \cdot L}{2} + \frac{S_z \cdot K \cdot t_{0,5L}^a}{2} + \frac{fo \cdot t_{0,5L} \cdot L}{2(1+r)} \quad (20)$$

e para o final do sulco:

$$Q_o \cdot t_L = S_y \cdot A_0 \cdot L + S_z \cdot K \cdot t_L^a \cdot L + \frac{fo \cdot t_L \cdot L}{(1+r)} \quad (21)$$

onde  $t_{0,5L}$  é o tempo de avanço à metade do campo em minutos,  $t_L$  é o tempo de avanço medido ao final do sulco em minutos e  $L$  é o comprimento total do sulco.

Observando-se as equações 20 e 21, somente os parâmetros  $K$  e  $a$  são desconhecidos. Resolvendo-se simultaneamente usando uma transformação logarítmica se obtém:

$$a = \frac{\log(V_L / V_{0,5L})}{\log(t_L / t_{0,5L})} \quad (22)$$

sendo:

$$V_L = \frac{Q_o \cdot t_L}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{fo \cdot t_L}{(1+r)} \quad (23)$$

e

$$V_{0,5L} = \frac{2Q_o \cdot t_{0,5L}}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{fo \cdot t_{0,5L}}{(1+r)} \quad (24)$$

então  $S_z$  é obtido diretamente da equação 19 e o parâmetro  $K$  pode ser obtido por:

$$K = \frac{V_L}{S_z \cdot t_L^a} \quad (25)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise dos parâmetros empíricos da equação de infiltração

Na Tabela 2 são apresentados os conteúdos de água no solo para cada dia no momento da realização dos testes de infiltração de água no solo. Cabe destacar que estes valores representam as médias dos conteúdos de água no solo até a profundidade de 0,30m ao longo do sulco de irrigação. Conforme Araújo Filho (2001), o conhecimento do regime de umidade no solo se reveste de grande importância no fornecimento de informações destinadas a resolver problemas, como manejo de irrigação.

**Tabela 2.** Conteúdo de água no solo antes da realização dos testes

<b>Data dos testes</b>	<b><math>\theta(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})</math></b>
1º - 13.01.06	0,072
2º - 27.01.06	0,070
3º - 02.02.06	0,043
4º - 10.02.06	0,116

Na Tabela 3 apresentam-se as constantes  $k$  e  $a$  da equação de infiltração acumulada de Kostiakov, referentes aos tratamentos (técnicas de infiltração), objetos deste estudo. Os dados referentes à coleta de campo são apresentados nos ANEXOS.

Dentre as técnicas de infiltração analisadas, a técnica do balanço de volume permitiu calcular em cada incremento do avanço, e de forma simultânea, o volume de água que entrou no sulco, além do volume de água armazenado na superfície e, portanto, o volume infiltrado em cada estação. Considerando o maior controle das condições de contorno da metodologia preconizada por Walker e Skogerboe (1987), a mesma servir como referência para fins de análise comparativa com as demais técnicas utilizadas no presente estudo.

A técnica do balanço de volume, na qual ocorre em regime de fluxo livre ao final do sulco, permite caracterizar bem as condições da irrigação em um sistema de irrigação por sulcos com drenagem livre.

Nas Figuras 5 a 9 visualizam-se os gráficos de infiltração acumulada em função do tempo acumulado em cada uma das repetições, das técnicas de infiltração analisados no estudo.

**Tabela 3.** Constantes numéricas  $k$  (mm) e  $a$  da equação de infiltração acumulada de Kostiaikov para os tratamentos analisados.

Repetições	Cilindro		Sulco		Entrada e Saída		Balanço de Volume I		Balanço de Volume II	
	k	e a	k	e a	k	e a	k	e a	k	e a
1	8,14	0,60	1,34	0,60	2,93	0,84	4,2	0,34	2,8	0,41
2	5,13	0,47	0,76	0,58	1,87	0,88	1,4	0,35	1,2	0,38
3	13,90	0,45	0,81	0,56	5,99	0,64	0,7	0,53	0,8	0,59
4	4,37	0,54	2,48	0,37	3,45	0,75	1,0	0,32	0,24	0,35
<b>Média</b>	7,88	0,51	1,35	0,53	3,56	0,78	1,82	0,38	1,26	0,43

A exceção do método de entrada-saída verificou-se grandes variabilidades entre testes das demais metodologias analisadas. Observa-se, ainda, que em todos os testes realizados, as maiores lâminas infiltradas ocorreram no primeiro dia, fato este que pode ser atribuído às condições de revolvimento do solo, demonstrando assim que de forma ponderada, apresentou-se com maior influência se comparado ao teor de água no solo antes da realização dos testes. O mesmo foi constatado por Lal (1979) num preparo convencional, afirmando que o aumento da infiltração de água nos solos ocorre através de meios mecânicos (revolvimento), sendo também afetada pelo conteúdo de água inicial no solo.

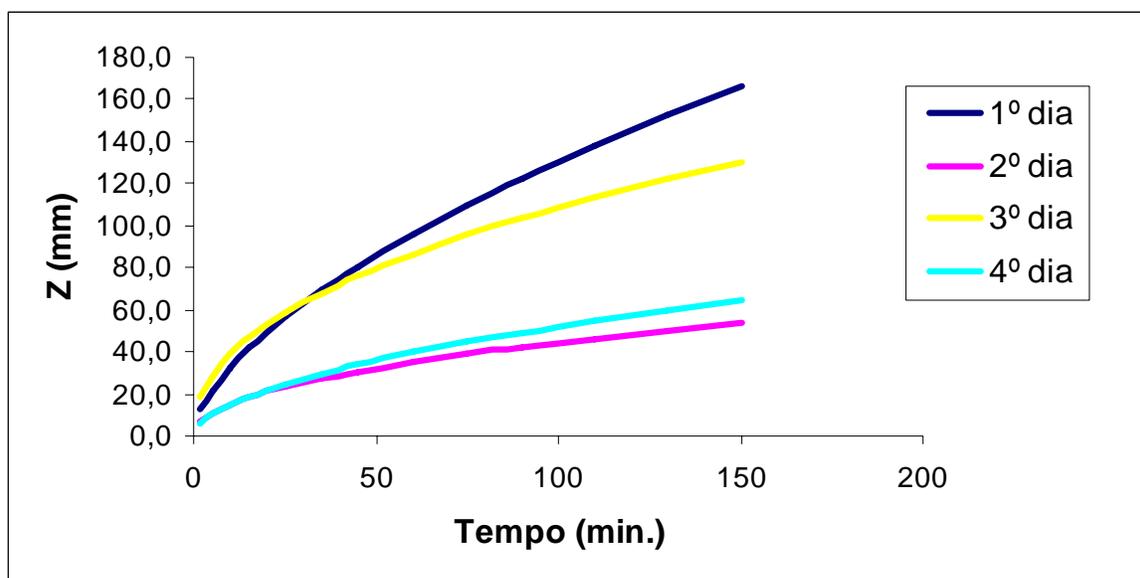
Com exceção das metodologias do cilindro e do sulco-infiltrômetro, verifica-se para os demais dias analisados, a importância dos gradientes hidráulicos no processo de infiltração de água no solo. Algumas alterações nos formatos destas curvas, analisadas sob a ótica dos gradientes hidráulicos, podem ser explicados pelo fato do teor de água no solo não se constituir numa característica isotrópica. Ainda conforme Walker e Skogerboe (1987), o principal objetivo de se avaliar um campo irrigado por superfície é identificar alternativas viáveis para melhorar o desempenho do sistema. Assim, as avaliações podem ser capazes de fornecer informações para derivar os parâmetros de infiltração utilizados para a simulação de modelos (Pereira, 1995).

Considerando pela análise dos resultados que os gradientes hidráulicos apresentaram maior influência a partir dos segundo dia de testes, a técnica do balanço de

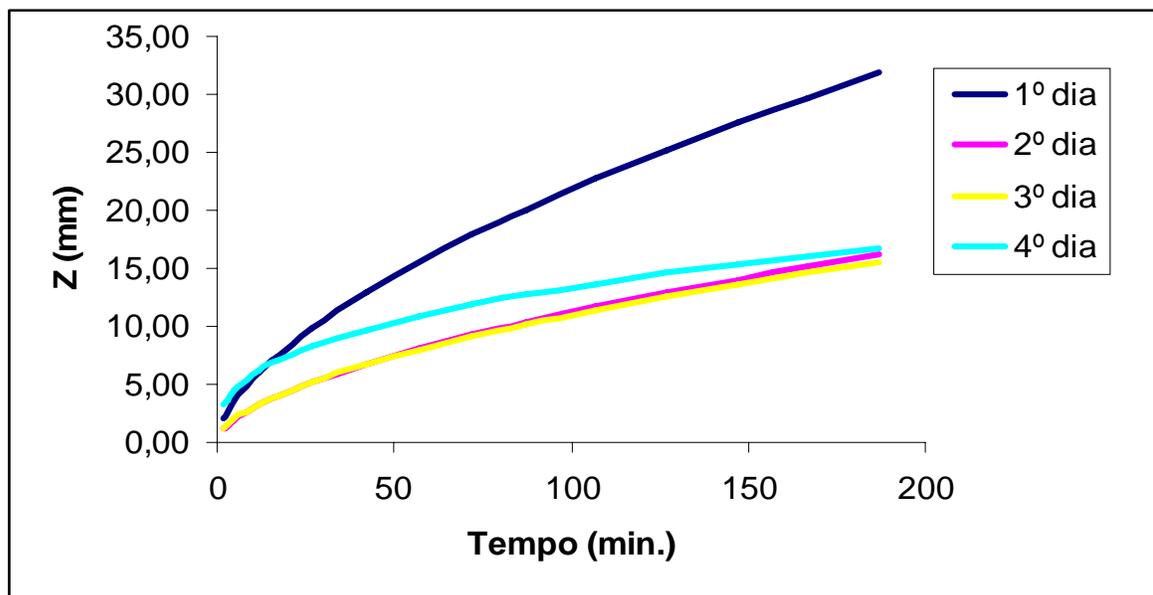
volume de Walker e Skogerboe (1987) se apresentou comparativamente às demais, como a que melhor incorporou no processo de infiltração, a influência desta variável.

Santana *et al.* (1997), entendem que as desuniformidades nos parâmetros  $k$  e  $a$  ocorram em função de alterações tanto na estrutura do solo como em seu conteúdo de umidade inicial, isto é, antes de cada evento de irrigação. Em aditamento ao que os autores afirmam, a exceção da técnica do sulco-infiltrômetro, para os demais tratamentos, o maior valor do parâmetro empírico  $k$ , ou está relacionado ao conteúdo de umidade inicial no solo, caso das técnicas do cilindro-infiltrômetro e entrada-saída, ou relacionado aos aspectos de estrutura do solo (revolvimento), caso das duas técnicas de balanço de volume.

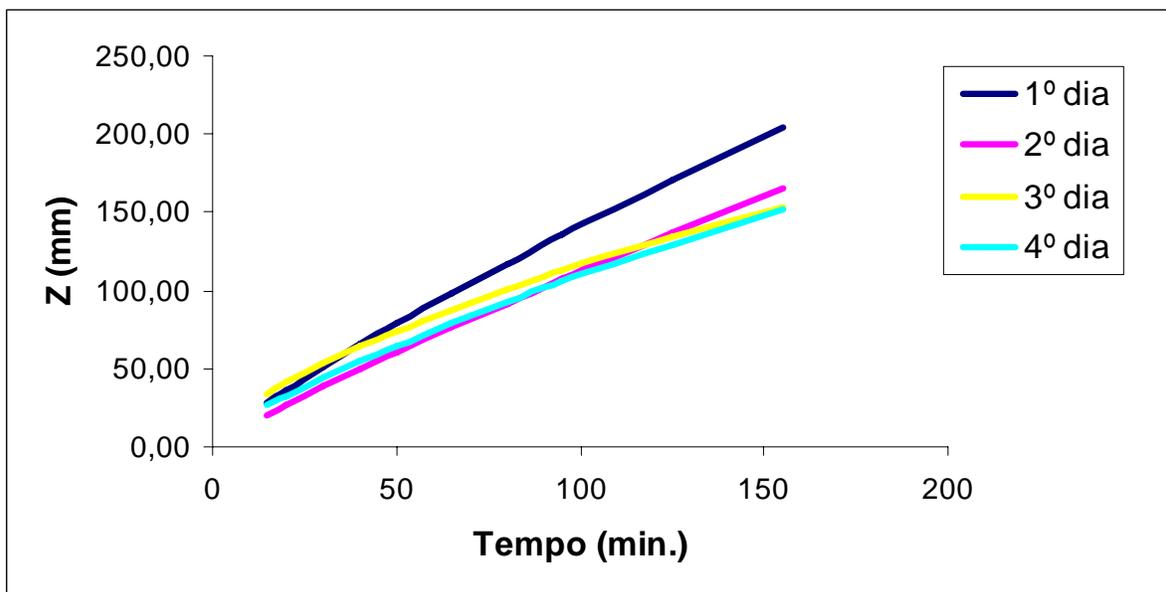
O parâmetro empírico  $a$ , que descreve conforme Carvalho (1999), como a infiltração acumulada varia com o tempo, apresentou, sobretudo para os testes do cilindro-infiltrômetro e sulco-infiltrômetro, uma tendência de redução, demonstrando portanto uma dependência do rearranjo estrutural, se comparado ao teor de umidade no solo antes de iniciado o processo de infiltração.



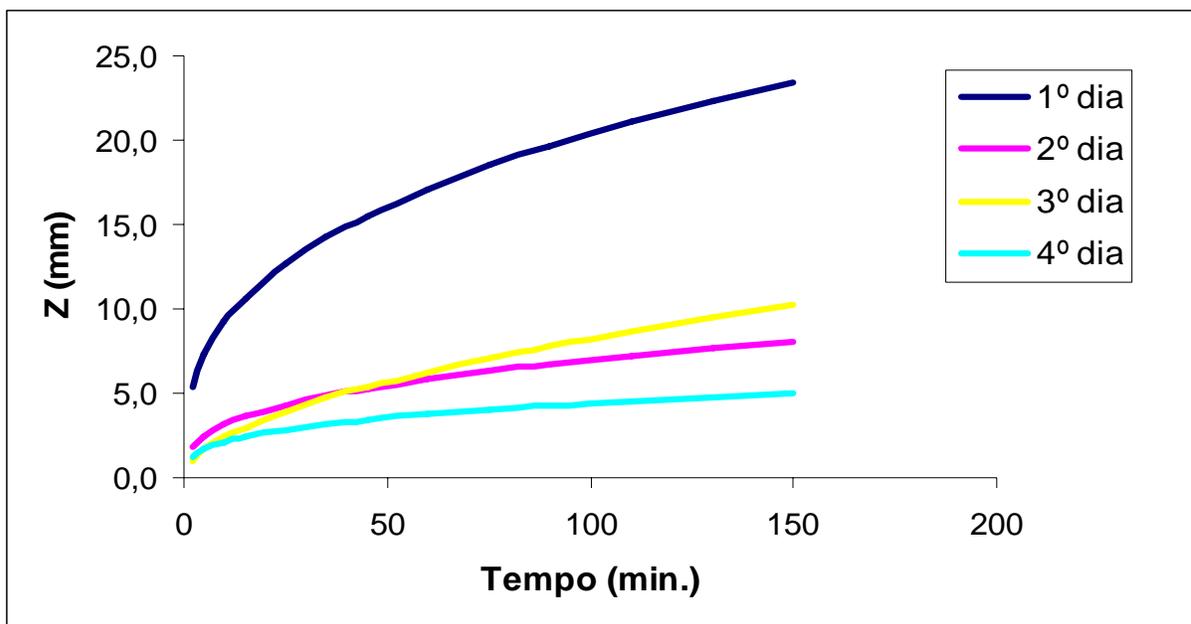
**Figura 5.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - técnica do cilindro infiltrômetro.



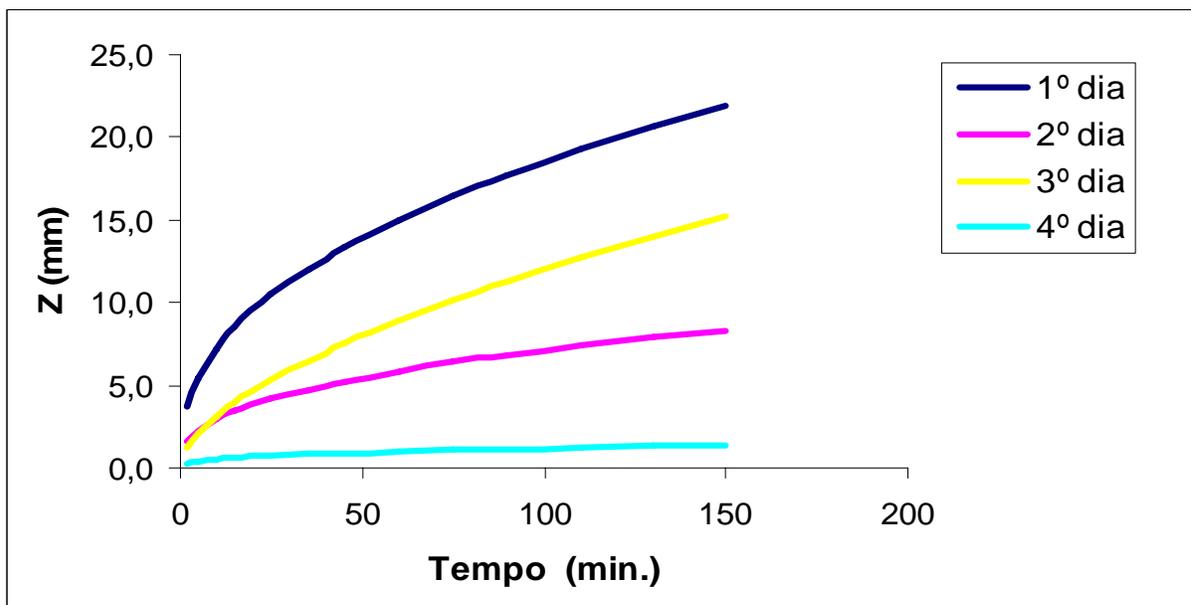
**Figura 6.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - técnica do sulco infiltrômetro.



**Figura 7.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - técnica de entrada e saída.



**Figura 8.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - técnica do balanço de volume I.



**Figura 9.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - técnica do balanço de volume II.

Um comprimento de sulcos em torno de 100 m é um valor representativo para a grande maioria destes sistemas de irrigação. Para este comprimento e mesmo considerando

um teor de água no solo baixo antes da irrigação e um declive do terreno adequado, estima-se que um tempo de corte de 150 minutos seja bastante razoável.

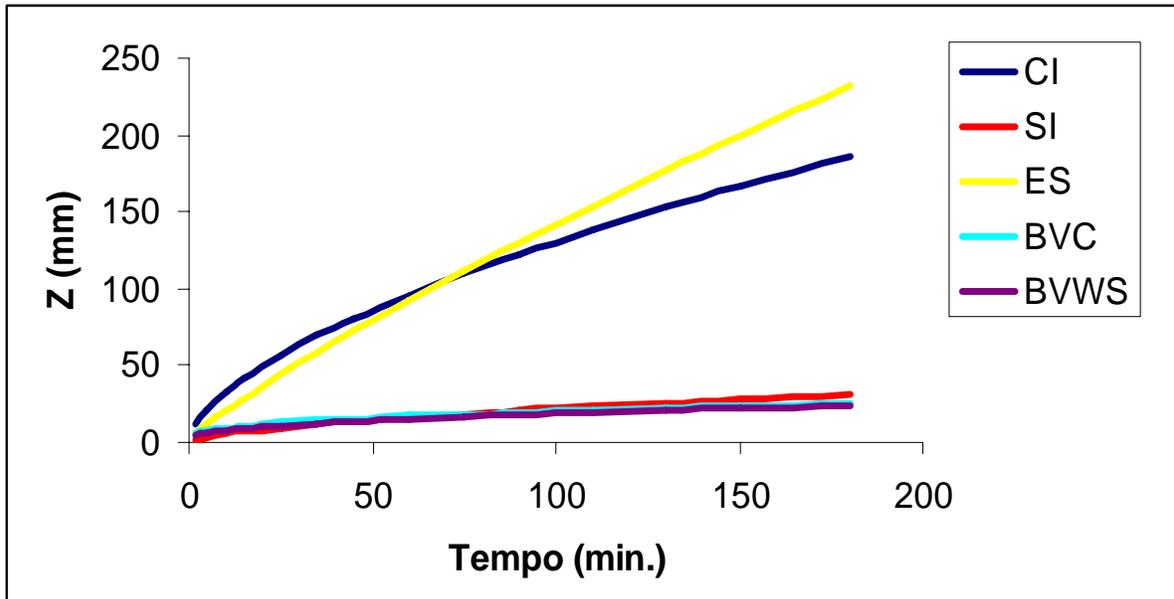
Considerando, ainda, que no processo de infiltração, as curvas de infiltração acumulada tendem a se tornar assintóticas ao eixo do tempo acumulado, verifica-se para este estudo e para o tempo de infiltração anteriormente comentado, que referido processo não ocorre ao se analisar a técnica de entrada-saída. Tal fato pode estar associado à distância entre os medidores Parshall, conforme relatam Karmeli *et al.* (1978).

O tempo de estabilização do regime assintótico da curva de infiltração acumulada tem uma correlação com o gradiente hidráulico no solo antes do processo de infiltração. Assim é que para menores valores de gradiente hidráulico espera-se a obtenção mais rápida do regime assintótico. Neste sentido verificam-se em base as configurações dos gráficos contidos nas Figuras 5 a 9, que as duas técnicas do balanço de volume, sobretudo a preconizada por Walker e Skogerboe (1987), apresentam a partir do segundo dia de testes, uma relação de dependência, tanto no que tange à lâmina infiltrada acumulada, quanto ao regime assintótico. Contudo, nota-se que a estabilização não é total em face da própria natureza da equação utilizada, que para Fok (1986) sua utilização na engenharia da irrigação por ser mais simples e representar melhor a infiltração no solo.

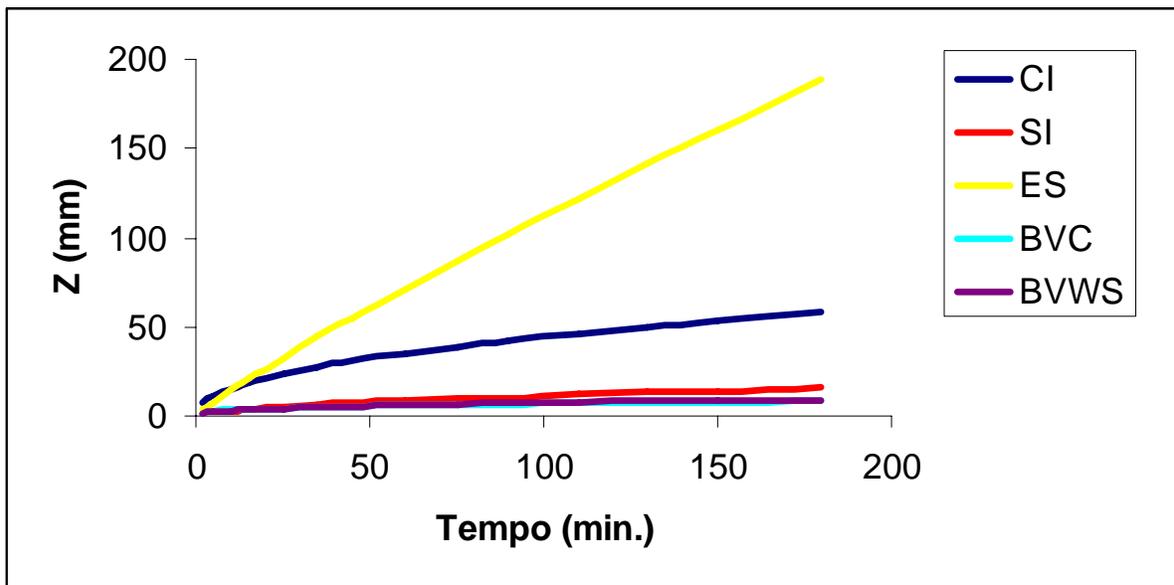
No sentido de comparar mais detalhadamente entre si as técnicas de obtenção das constantes da equação de infiltração acumulada, elaboraram-se as Figuras 10 a 13, que são representações gráficas dos dados apresentados na Tabela 3.

O coeficiente  $k$  corresponde ao valor de infiltração decorrido o primeiro minuto de teste, traduzindo o processo de infiltração na sua fase inicial. Evidencia-se nestas figuras, que a técnica do cilindro infiltrômetro proporcionou os maiores valores da constante numérica  $k$ , uma vez que as curvas para o cilindro infiltrômetro estão acima das demais nos primeiros momentos do processo. Isto se deve ao método de instalação do equipamento, que por mais cuidadoso, não permite uma penetração regular do cilindro medidor. Neste tipo de técnica é comum ocorrer o que se denomina “efeito parede”, ou seja; o surgimento de um fluxo preferencial junto à parede entre o cilindro e o solo. Castro & Souza (1998) afirmam que a taxa de infiltração é afetada provavelmente, pelo rearranjo estrutural das partículas do solo, causando uma deformação, compactando e proporcionando o

aparecimento de espaços vazios entre a parede do cilindro e o solo. Costa *et al.* (1999) entendem que o maior valor de lâmina infiltrada pelo método do cilindro se deve à forma de aplicação da água sobre a superfície.



**Figura 10.** Infiltração acumulada em função do tempo acumulado - Teste nº 1.



**Figura 11.** Infiltração acumulada em função tempo acumulado - Teste nº 2.

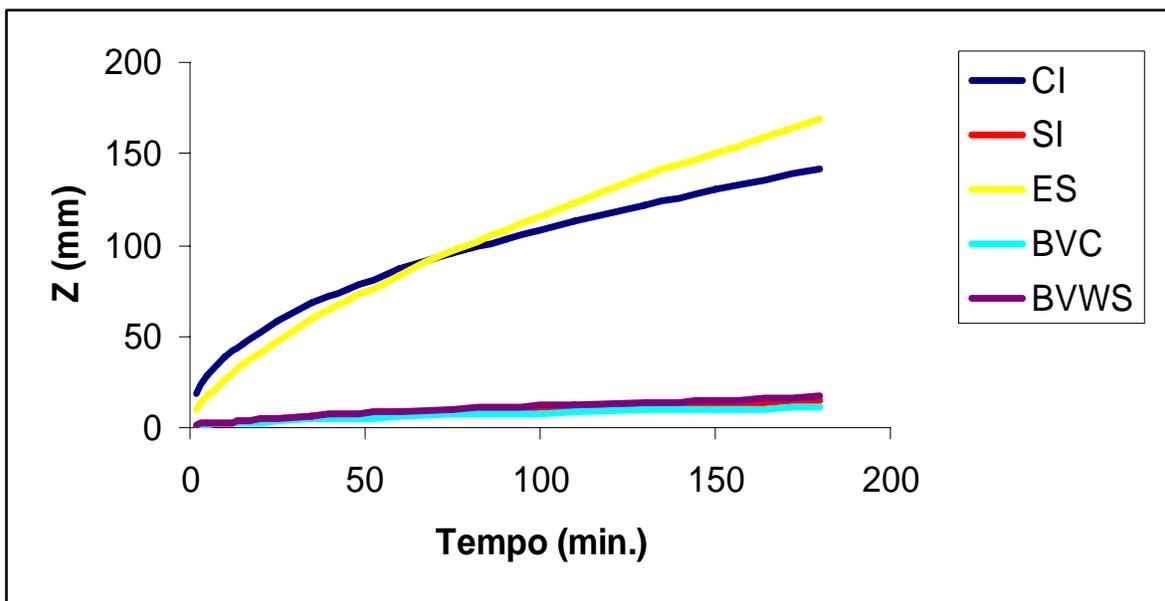


Figura 12. Infiltração acumulada em função tempo acumulado - Teste n° 3.

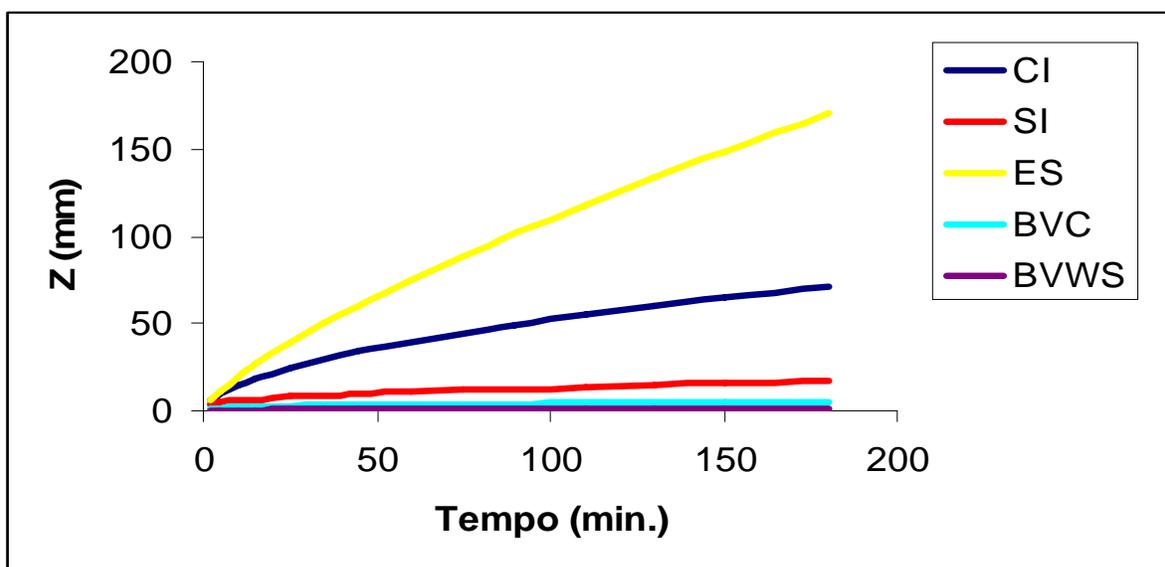


Figura 13. Infiltração acumulada em função tempo acumulado - Teste n° 4.

Verifica-se em todos os quatro testes uma superestimativa ou tendência de uma maior lâmina infiltrada na técnica de entrada-saída, comparativamente às demais técnicas. Tal fato pode estar associado ao comprimento do sulco utilizado nos testes.

A técnica do cilindro-infiltrômetro, embora em magnitude menor que a técnica de entrada-saída, demonstrou estimativas de lâmina infiltrada bem superiores, se comparada às técnicas do sulco-infiltrômetro e às duas técnicas do balanço volumétrico. As duas técnicas de balanço volumétrico apresentaram resultados semelhantes.

Na Tabela 4 apresentam-se as equações de velocidade de infiltração derivadas da equação de infiltração acumulada para cada teste aplicado.

**Tabela 4.** Equações de velocidade de infiltração em cada tratamento e repetição.

<b>Trat.</b>	<b>1º dia (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>2º dia (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>3º dia (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>4º dia (mm h<sup>-1</sup>)</b>
<b>CI</b>	$i = 294,24 \cdot t^{-0,3979}$	$i = 144,23 \cdot t^{-0,5317}$	$i = 372,29 \cdot t^{-0,5537}$	$i = 141,32 \cdot t^{-0,4619}$
<b>SI</b>	$i = 48,73 \cdot t^{-0,3948}$	$i = 26,65 \cdot t^{-0,4155}$	$i = 27,59 \cdot t^{-0,4357}$	$i = 54,41 \cdot t^{-0,6343}$
<b>ES</b>	$i = 148,15 \cdot t^{-0,158}$	$i = 99,97 \cdot t^{-0,1116}$	$i = 231,31 \cdot t^{-0,3564}$	$i = 155,67 \cdot t^{-0,2492}$
<b>BVI</b>	$i = 86,49 \cdot t^{-0,6568}$	$i = 29,31 \cdot t^{-0,6511}$	$i = 22,49 \cdot t^{-0,4645}$	$i = 19,32 \cdot t^{-0,678}$
<b>BVII</b>	$i = 70,03 \cdot t^{-0,5898}$	$i = 28,62 \cdot t^{-0,6129}$	$i = 28,25 \cdot t^{-0,4115}$	$i = 4,86 \cdot t^{-0,6506}$

Os dados demonstram que a técnica do cilindro-infiltrômetro apresentou para o tempo de um minuto, os maiores valores de velocidade de infiltração comparativamente aos demais tratamentos. Observa-se, ainda, que o maior valor ocorreu para a condição de maior gradiente hidráulico, demonstrando assim a importância do conteúdo de umidade no solo no início do processo de infiltração.

Os maiores valores médios de velocidade de infiltração básica estão associados às técnicas de entrada e saída e cilindro-infiltrômetro, verificando-se ainda a influência do preparo de solo sobre este valor, para todos os tratamentos analisados. Se considerarmos um tempo acumulado de infiltração correspondente a três horas, têm-se os valores médios de 50,1 e 20,1 mm.h<sup>-1</sup> para as técnicas de entrada-saída e cilindro-infiltrômetro, respectivamente. Para as técnicas do balanço de volume, os valores médios de infiltração básica foram praticamente os mesmos (1,6 e 1,8 mm.h<sup>-1</sup>).

Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se, respectivamente, as análises de variância dos valores das constantes numéricas  $k$  e  $a$ , e nas Tabelas 7 e 8, os testes de Tukey para médias de tratamentos destas constantes numéricas.

Observa-se, com base nos resultados das análises estatísticas que as duas variáveis-resposta analisadas, ou seja; os parâmetros empíricos da equação de Kostiakov, foram significativos em nível de 1% de probabilidade, em base aos valores de Prob. > F.

O valor médio de  $k$  para a técnica do cilindro infiltrômetro foi bem superior aos valores obtidos para os demais tratamentos analisados, só não diferindo estatisticamente em nível de 5% de probabilidade para o valor obtido pela técnica de entrada-saída.

Os valores médios de  $k$  dos tratamentos cilindro-infiltrômetro e entrada-saída não diferem estatisticamente em nível de 5% e apresentam os maiores valores, se comparados aos demais tratamentos, fato este que pode estar associado às condições de instalação do cilindro e da calha de saída. Já os demais tratamentos, além de não diferirem estatisticamente entre si em nível de 5%, apresentam os menores valores médios da constante  $k$ .

Autores como m *et al.* (1956) criticam o uso de dados obtidos através da técnica do cilindro-infiltrômetro para fins de irrigação por sulcos, por entenderem que referida técnica não expressa o fenômeno da infiltração neste tipo de sistema de irrigação.

Os menores valores para a constante  $a$  associam-se às metodologias de balanço volumétrico I e II, se comparados aos valores médios dos demais tratamentos. Este fato demonstra que as metodologias de balanço volumétrico apresentam um tempo de resposta menor ao processo físico da infiltração de água no solo, porquanto para as condições do experimento, num tempo de irrigação de 90 minutos, as curvas de infiltração do balanço de volume atingiram o regime assintótico.

Os maiores valores para a constante numérica  $a$  estão associados às técnicas de entrada-saída, sulco e cilindro-infiltrômetro, demonstrando assim uma superestimativa da infiltração acumulada, se comparada às técnicas do balanço de volume.

**Tabela 5.** Análise de variância para os valores da constante numérica *k*.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Prob.&gt;F</b>
Blocos	3				
Tratamento	4	124,7912	31,1978	5,951	0,00449
Resíduo	12	78,63940	5,2426		
Total	19				

**Tabela 6.** Análise de variância para os valores da constante numérica *a*.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Prob.&gt;F</b>
Blocos	3				
Tratamento	4	0,37183	0,92957	9,277	0,00056
Resíduo	12	0,15030	0,10020		
Total	19				

**Tabela 7.** Teste de Tukey para médias de tratamentos da constante numérica *k*.

<b>Tratamentos</b>	<b>Nome</b>	<b>Nº Repetição</b>	<b>Médias</b>	<b>5%</b>
1	Cilindro infiltrômetro	4	7,8895	A
3	Entrada e saída	4	3,5600	AB
4	Balanço de volume I	4	1,8250	B
2	Sulco infiltrômetro	4	1,3492	B
5	Balanço de volume II	4	1,2600	B

**Tabela 8.** Teste de Tukey para médias de tratamentos da constante numérica *a*.

<b>Tratamentos</b>	<b>Nome</b>	<b>Nº Repetição</b>	<b>Médias</b>	<b>5%</b>
3	Entrada e saída	4	0,7812	A
2	Sulco infiltrômetro	4	0,5299	B
1	Cilindro infiltrômetro	4	0,5137	B
5	Balanço de volume I	4	0,4337	B
4	Balanço de volume I I	4	0,3874	B

## 5. CONCLUSÕES

1. A lâmina de água infiltrada no solo apresentou um maior grau de dependência à variável preparo de solo se comparada à variável teor de umidade no solo.
2. As técnicas de balanço volumétrico I e II apresentaram resultados semelhantes tanto no que diz respeito à lâmina infiltrada acumulada quanto ao regime assintótico.
3. As técnicas de entrada-saída e cilindro-infiltrômetro apresentaram valores de infiltração acumulada superestimados se comparados aos demais tratamentos analisados, sobretudo às metodologias de balanço volumétrico.
4. As técnicas de balanço volumétrico apresentaram um menor tempo de resposta à obtenção do regime assintótico, característica inerente ao fenômeno físico da infiltração de água no solo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIM, S.L. Análise comparativa das técnicas de determinação das características de infiltração na irrigação por sulcos. Fortaleza, CE: UFC, 1985. 136 p. **Dissertação de Mestrado em Agronomia.**

ARAÚJO FILHO, J.C. de; RIBEIRO, M.R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.3, p.363-370, 1996.

AUGUSTO, S.G. Estudo da eficiência e da uniformidade de distribuição da água na irrigação por sulcos em declive. Fortaleza, CE: UFC, 1984. 130 p. **Dissertação de Mestrado em Agronomia.**

AUSTIN, N. R.; PRENDERGAST, J. B. Use of kinematic wave theory to model irrigation on craccking soil. **Irrigation Science**, n. 18, p. 1-10, 1997.

BASSET, D.L.; FANGMEIR, D.D.; STRELKOF, T. Hydraulics of surface irrigation. In: JEMSEN, M.E. Design and operation of farm irrigations systems. St. Joseph. The **American Society of Agricultural Engineers**, 1983. Cap.12, p.447-98.

BAUTISTA, E., WALLANDER, W. W. **Numerical** calculations of infiltration in furrow irrigation simulation models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 2, p. 286-311, 1993.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BERTRAND, A.R. **Rate of water intake in the field**. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis*.Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.197-208.

BONDURANT, J. A Developing furrow infiltrometer. **Agricultural Engineering the Journal of ASAE**, v. 38, p.602-604, 1957.

BOOHER, L. J. **Surface irrigation**. Roma : FAO, 1974, 160p., (FAO nº 95).

BOUWER, H. **Intake rate: cylinder infiltrometer**. In: Klute A., ed. *Methods of Soil Analysis*. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1986. cap. 32, p.825-844.

CAMACHO, E.; PÉREZ-LUCENA, C.; ROLDÁN-CAÑAS, J.; ALCAIDE, M. IPE: Model for management and control of furrow irrigation in real time. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v. 123, n. 4, p. 264-269. 1997.

CARVALHO, J. E. B. de. Manejo do solo em pomares. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, 6., 2000, Bebedouro, SP. **Anais...** Bebedouro, SP:

Fundação Cargill, 2000. p.107-146.

CARVALHO, J. J.de; AZEVEDO, C. A. V.de; BARRETO, A. N.; HENRIQUE, J.; AZEVEDO, H. M. de Desuniformidade espaço-temporal no desempenho do sistema de irrigação por sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.18-25, 1999.

CASTROS, L. C. A.; SOUZA, F. Análise dos parâmetros de infiltração na irrigação por sulcos e infiltração utilizando a metodologia do balanço de volume. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, p. 172-174, 1998.

CHAVES, H.M L; ORLOWSKI, E.; ROLOFF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.2, p.141-147, 1993.

CHILDS, J. L., WALLANDER, W. W., HOPMANS, J. W. Spatial and variation of furrow infiltration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n.1, p. 74-90, 1993.

CHRISTIANSEN, J.E.; BISHOP, A.A.; KIEFER, F.W & FOK, YU-SI. Evaluation of intake rate constants to related do advance of water in surface irrigation. **Transactions of the American Society Agricultura Engineers**, Chicago, p. 671-674. 1966.

CHRISTOFIDIS, D. Situação das áreas irrigadas: métodos e equipamentos de irrigação: Brasil. Brasília: UnB, 1999. 26 p.

COELHO, R.D.; VICCINO, J.R.; SILVA V.M. da. Infiltrômetro de anéis e variabilidade espacial das equações de infiltração de água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21. Santa Maria, 1992, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1992.

COLLINS, H. G.; CAMPBELL, R. B. Water infiltracion in hawaiian sugarcane furrows. **Journal of the Irrigation and Drainage**, Division Proceeding of ASCE, v. 93, n. IR 4, p. 81-96, 1967.

CORRÊA, J. B. D. Variabilidade espacial de características e propriedades físicas de latossolo roxo do Município de Lavras - MG. 1986. 83 f. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1986.

COSTA, E.L.; SILVA, A.M. da; COLOMBO, A.; ABREU, A.R. de. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.131-134, 1999.

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S., PAIR, C.H. & SHOCKLEY, D.G. **Methods of evaluating irrigation systems**. Washington. Agricultural Handbook n° 82, SCS-USDA, 1956.

- CUENCA, R.H. **Irrigation system design**. New Jersey: Prentice Hall, 1989, 551p.
- DE MARIA, I.C.; CASTRO O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.703-709, 1999.
- DERPSCH, R.; ROTH, C.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. Controle de erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1991. 272p.
- ELLIOTT, R. L.; WALKER, W. R. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. **Transactions of ASAE**, v. 25, n. 2, p. 396-400, 1982.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 212 p., 2006.
- ERIE, L.J. Evaluations of infiltration Measurements. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Arizona, p. 11-13, 1962.
- ESFANDIARI, M.; MAHESHWARI, B. L. Application of the optimization method for estimating infiltration characteristics in furrow irrigation and its comparison with other methods. **Agricultural Water Management**, v. 34, n. 2, p. 169-185, 1997.
- FOK, Y. S. Derivation of Lewis-Kostiakov intake equation. **Journal of Irrigation and Drainage**, n. 112 (IR2), p. 164-171, 1986.
- FRIZZONE, J. A., **Irrigação por superfície**. São Paulo, ESALQ/USP, 1993. 183P.
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 13 ed. São Paulo, Nobel, 1990. 486p.
- HILLEL, D. **Solo e Água; fenômeno e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1982. 264p.
- LAL, R. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. Ibadan: **International Institute of Tropical Agriculture**, 1979. 37p. Technical Bulletin, 1
- MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrossequência de solos bem a muito mal drenados. 1994. 88 f. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1994.
- MERRIAM, J.L. **Irrigation system evaluation and improvement**. Polytecnic College, Califórnia, 57 p., 1968.
- MOORE, I.D.; LARSON, C.L. An infiltration - runoff model for cultivated of soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph. v.23, n.6, p. 1460-1467, 1980.

MORAES, W.V. de. Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivo. Lavras: UFLA, 1984. 107p. **Dissertação Mestrado.**

MORIN, J.; VAN WINKEL, J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1223-1227, 1996.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; EHR, K. T. Spatial variability of field-measured soil water properties. **Hilgardia**, Berkley, v. 42, n. 7, p. 215-259, Nov. 1973.

PEREIRA, L. S. **Surface irrigation system**. In: Pereira, et al., Sustainability of water resources utilization in agriculture. 1995.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; SANTOS, W.L.; RODRIGUES, L.N.; ANTTUNES, V.L. Infiltração de água no solo [S.l.:s.n], 1997. 26p. (Caderno didático, 25)

RAGHAVAN, G.S.V.; MICKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. **Journal of Terramechanics**, Elmsford, v.19, p.235-242, 1983.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996. 513p.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABELA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.3, p.289-298, 1992.

REZENDE, F.C.; SCALLOPI, J.E. Avaliação de métodos para a determinação das características de infiltração por sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.20, n.2, p.227-233, 1985.

SANTANA, E. F.; AZEVEDO, C. A. V.; BARRETO, A. N.; DANTAS NETO, J.; BEZERRA, J. R. C. Monitoramento temporal e sazonal da infiltração do sulco na cultura do algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 1, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: EMBRAPA Algodão, p. 372-375, 1997.

SHOCKLEY, D.G.; PHELAN, J.T.M.; LASHON, L.F.; HAISE, H.R.; DONNAN, W.W. & MYERS, L.E. A method for determining intake characteristics of irrigation furrows. **Agricultural Research Service and Conservation Service**. United States Department of Agriculture. Logan, Utah, 10 p. 1959.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: Larson, W.E.; Blake, G.R.; Allmaras, R.R.; Voorhees, W.B.; Gupta, S.C. (eds.). **Mechanics related process in structured agricultural soils**. NATO applied sciences. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, v.172, p.205-221, 1989.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compatibility: A review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Paraná (Brésil). **Étude Gestion Sols**, Paris, v.5, n.1, p.61-71, 1998.

VIEIRA, H.A. Comportamento de quatro infiltrômetros na determinação da velocidade de infiltração básica d'água no solo. Viçosa: UFV, 1977. 52p. **Dissertação Mestrado**.

WALKER, W. R. Two decades of surface irrigation research: four significant results and their practical consequences. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IRRIGATION, 6<sup>th</sup>, 1993, Tel-Aviv. **Proceedings...** Tel- Aviv: Agritech, p. 137-158. 1993.

WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V. **Surface irrigation: theory and practice**. New Jersey: Prentice-Hall, 386p, 1987.

## ANEXO 1

### CONTEÚDO DE UMIDADE

CONTEÚDO DE UMIDADE EM VOLUME (%) OBTIDO ANTES DAS REALIZAÇÕES DOS QUATRO DIAS DE TESTES.

Teste nº: 1

Local: Fazenda Experimental Vale do Curu

Data: 13/01/2006

Nº Lata	Peso Lata (g)	Peso S. U. (g)	Peso S. S. (g)	θ %	θ %*
1	36,47	151,14	145,52	7,215	7,299
3	34,46	134,94	128,54	9,524	
39	47,63	155,97	152,12	5,158	

S. U. : Solo Úmido + Peso da lata; S.S.: Solo Seco + Peso da lata em uma estufa a 105-110° C por 24 horas; \*θ% Valor médio.

Formula utilizada:  $U = (a - b) / c$ , sendo **a**: Solo Úmido + Peso da lata; **b**: Solo Seco + Peso da lata e **c**: Solo seco – peso da lata.

Teste nº: 2

Data: 27/01/2006

Nº Lata	Peso Lata (g)	Peso S. U. (g)	Peso S. S. (g)	θ %	θ %*
1	36,47	157,82	151,94	7,219	6,965
3	34,46	174,5	167,72	7,123	
39	47,63	179,0	173,05	6,642	

Teste nº: 3

Data: 02/02/2006

Nº Lata	Peso Lata (g)	Peso S. U. (g)	Peso S. S. (g)	θ %	θ %*
10	35,06	147,79	144,44	4,288	4,269
20	32,86	171,80	167,52	4,449	
63	34,75	169,23	165,43	4,071	

Teste nº: 4

Data: 10/02/2006

Nº Lata	Peso Lata (g)	Peso S. U. (g)	Peso S. S. (g)	θ %	θ %*
1	36,47	165,16	154,06	13,215	11,570
3	34,46	177,46	171,44	6,152	
39	47,63	167,60	155,75	15,344	

## ANEXO 2

### TESTES DE INFILTRAÇÃO COM CILINDRO INFILTRÔMETRO

**Teste n°: 1****Local: Fazenda Experimental Vale do Curu****Data: 13/01/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo instantâneo (min.)</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Leitura (cm)</b>	<b>Lâmina instantânea (cm)</b>	<b>Lâmina acumulada (cm)</b>	<b>Lâmina acumulada (mm)</b>
8:00	0	-	1,7	-	-	-
8:02	2	2	3,0	1,3	1,3	13
8:05	3	5	4,0	1,0	2,3	23
8:10	5	10	4,7	0,7	3,0	30
8:15	5	15	5,7	1,0	4,0	40
8:25	10	25	7,0 / 2,5	1,3	5,3	53
8:35	10	35	3,9	1,4	6,7	67
8:45	10	45	5,2	1,3	8,0	80
9:00	15	60	6,7 / 2,0	1,5	9,5	95
9:15	15	75	3,6	1,6	11,1	111
9:30	15	90	5,4	1,8	12,9	129
9:50	20	110	6,6 / 3,1	1,2	14,1	141
10:10	20	130	4,5	1,4	15,5	155
10:30	20	150	5,9	1,4	16,9	169

**Teste n°: 2****Data: 27/01/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo instantâneo (min.)</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Leitura (cm)</b>	<b>Lâmina instantânea (cm)</b>	<b>Lâmina acumulada (cm)</b>	<b>Lâmina acumulada (mm)</b>
7:32	0	-	2,5	-	-	-
7:33	1	2	3,0	0,5	0,5	5
7:36	3	5	3,5	0,5	1,0	10
7:41	5	10	3,9	0,4	1,4	14
7:46	5	15	4,3	0,4	1,8	18
7:51	5	25	4,7	0,4	2,2	22
8:01	10	35	5,0	0,3	2,5	25
8:11	10	45	5,2	0,2	2,7	27
8:21	10	60	5,7	0,5	3,2	32
8:36	15	75	6,0	0,3	3,5	35
8:51	15	90	6,5 / 3,5	0,5	4,0	40
9:06	15	110	4,0	0,5	4,5	45
9:26	20	130	4,1	0,1	4,6	46
9:46	20	150	4,5	0,4	5,0	50

## Teste n°: 3

Data: 02/02/2006

Hora	Tempo instantâneo (min.)	Tempo acumulado (min.)	Leitura (cm)	Lâmina instantânea (cm)	Lâmina acumulada (cm)	Lâmina acumulada (mm)
9:25	0	-	2,6	-	-	-
9:26	1	1	4,3	1,7	1,7	17
9:29	3	4	5,2	0,9	2,6	26
9:32	3	7	5,7	0,5	3,1	31
9:35	3	10	6,3	0,6	3,7	37
9:40	5	15	6,8	0,5	4,2	42
9:45	5	20	7,4	0,6	4,8	48
9:50	5	25	7,9 / 1,0	0,5	5,3	53
10:00	10	35	2,3	1,3	6,6	66
10:10	10	45	3,4	1,1	7,7	77
10:20	10	55	4,4	0,5	8,2	82
10:35	15	70	5,5	0,5	8,7	87
10:50	15	85	6,6 / 1,8	1,1	9,8	98
11:05	15	100	3,2	1,4	11,2	112
11:25	20	120	4,5	1,3	12,5	125
11:45	20	140	5,9	1,4	13,9	139
12:15	30	170	7,8	1,9	15,8	158

## Teste n°: 4

Data: 10/02/2006

Hora	Tempo instantâneo (min.)	Tempo acumulado (min.)	Leitura (cm)	Lâmina instantânea (cm)	Lâmina acumulada (cm)	Lâmina acumulada (mm)
8:24	0	-	2,6	-	-	-
8:25	1	1	3,1	0,5	0,5	5
8:28	3	4	3,5	0,4	0,9	9
8:31	3	7	4,0	0,5	1,4	14
8:36	5	12	4,1	0,1	1,5	15
8:41	5	17	4,2	0,1	1,6	16
8:46	5	22	4,5	0,3	1,9	19
8:56	10	32	4,8	0,5	2,4	24
9:06	10	42	5,3	1,3	3,7	37
9:16	10	52	5,9	0,6	4,3	43
9:31	15	67	6,1	0,2	4,5	45
9:46	15	82	6,5 / 3,5	0,4	4,9	49
10:01	15	97	4,3	0,8	5,7	57
10:21	20	117	4,5	0,2	5,9	59
10:41	20	137	4,7	0,2	6,1	61
11:01	20	157	4,9	0,2	6,3	63

## ANEXO 3

# TESTES DE INFILTRAÇÃO COM SULCO INFILTRÔMETRO

**Teste n°: 1****Local: Fazenda Experimental Vale do Curu****Data: 13/01/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo instantâneo (min.)</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Leitura tambor (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volume infiltrado (L)</b>	<b>Lâmina acumulada (mm)</b>
8:00	0	-	29	-	-	-
8:02	2	2	30	1,0	1,576	1,97
8:05	3	5	31	1,0	1,576	3,94
8:12	7	12	32	1,0	1,576	5,91
8:17	5	17	33,1	1,1	1,734	8,08
8:27	10	27	34	0,9	1,418	9,85
8:42	15	42	35	1,0	1,576	11,82
8:57	15	57	36,2	1,2	1,891	14,18
9:12	15	72	37,5	1,3	2,049	16,75
9:27	15	87	38,1	0,6	0,946	17,93
9:47	20	107	40,3	2,2	3,467	22,26
10:07	20	127	42,3	2,0	3,152	26,20
10:27	20	147	44	1,7	2,679	29,55
10:47	20	167	46,21	2,2	3,483	33,90

Uma diferença de 1,00 cm de nível de água no tambor, corresponde ao volume de 1,576 litro. O sulco teste tem 1,00 m de comprimento e a área a ser irrigada terá espaçamento entre sulcos de 0,80 m.

**Teste n°: 3****Data: 02/02/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo instantâneo (min.)</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Leitura tambor (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volume infiltrado (L)</b>	<b>Lâmina acumulada (mm)</b>
9:20	0	-	29,2	-	-	-
9:22	2	2	29,5	0,3	0,473	0,591
9:25	3	5	33,3	3,8	5,989	7,486
9:28	3	8	36,4	3,1	4,886	6,107
9:31	3	11	36,7	0,3	0,473	0,591
9:36	5	16	41,0	4,3	6,777	8,471
9:41	5	21	42,5	1,5	2,364	2,955
9:46	5	26	44,5	2,0	3,152	3,940
9:56	10	36	48,7	4,2	6,619	8,274
10:06	10	46	52,0	3,3	5,201	6,501
10:16	10	56	56,0	4,0	6,304	7,880
10:31	15	71	60,0	4,0	6,304	7,880
10:46	15	86	65,1	5,1	8,038	10,047
11:01	15	101	70,0	4,9	7,722	9,653
11:21	20	121	76,5	6,5	10,244	12,805
11:41	20	141	82,0	5,5	8,668	10,835
12:11	30	171	93,0	11,0	17,336	21,670

**Teste n°: 4****Data: 10/02/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo instantâneo (min.)</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Leitura tambor (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volume infiltrado (L)</b>	<b>Lâmina acumulada (mm)</b>
8:40	0	-	37,0	-	-	-
8:41	1	1	38,2	1,2	1,891	2,364
8:43	2	3	39,7	1,5	2,364	2,955
8:46	3	6	43,0	3,3	5,201	6,501
8:49	3	9	46,4	3,4	5,358	6,698
8:54	5	14	48,7	2,3	3,625	4,531
8:59	5	19	53,9	5,2	8,195	10,244
9:04	5	24	56,5	2,6	4,098	5,122
9:14	10	34	63,8	7,3	11,505	14,381
9:24	10	44	68,6	4,8	7,565	9,456
9:34	10	54	74,0	5,4	8,510	10,638
9:49	15	69	79,5	5,5	8,668	10,835
10:04	15	84	86,6	7,1	11,190	13,987
10:19	15	99	92,0	5,4	8,510	10,638

## ANEXO 4

# TESTES DE INFILTRAÇÃO COM A TÉCNICA DE ENTRADA E SAÍDA

**Teste n°: 1****Local: Fazenda Experimental Vale do Curu****Data: 13/01/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Carga de saída (cm)</b>	<b>Vazão de saída (L/s)</b>	<b>Infiltração (L/s/80m)</b>	<b>Infiltração (mm/h)</b>
9:00	-	-	-	-	-
9:15	15	11,5	1,946	1,889	106,275
9:20	20	12	2,089	1,746	98,236
9:30	30	13	2,387	1,448	81,482
9:40	40	13,2	2,448	1,387	78,025
9:50	50	13,6	2,573	1,262	71,006
10:05	65	13,5	2,542	1,293	72,774
10:20	80	13,5	2,542	1,293	72,774
10:35	95	13,5	2,542	1,293	72,774
11:05	125	13,5	2,542	1,293	72,774
11:35	155	13,5	2,542	1,293	72,774

Carga de entrada (cm): 14

Equações das calhas:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão de entrada (L/s): 3,8358

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 2****Data: 27/01/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Carga de saída (cm)</b>	<b>Vazão de saída (L/s)</b>	<b>Infiltração (L/s/80m)</b>	<b>Infiltração (mm/h)</b>
9:23	-	-	-	-	-
9:40	17	8,7	1,2232	1,3079	73,571
9:45	22	8,9	1,2704	1,2608	70,917
9:50	27	9,0	1,2942	1,2369	69,576
9:55	32	9,0	1,2942	1,2369	69,576
10:05	42	9,4	1,3914	1,1397	64,109
10:15	52	9,7	1,4661	1,0650	59,907
10:25	62	9,4	1,3914	1,1397	64,109
10:40	77	9,5	1,4161	1,1150	62,718
10:55	92	9,5	1,4161	1,1150	62,718
11:10	107	9,8	1,4914	1,0398	58,486

Carga de entrada (cm): 11

Equações das calhas:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão de entrada (L/s): 2,5311

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 3****Data: 02/02/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Carga de saída (cm)</b>	<b>Vazão de saída (L/s)</b>	<b>Infiltração (L/s/80m)</b>	<b>Infiltração (mm/h)</b>
12:44	-	-	-	-	-
12:55	12	7,5	0,955	1,985	111,674
12:58	15	9,0	1,294	1,646	92,615
13:01	18	10,0	1,542	1,398	78,656
13:06	23	10,5	1,672	1,267	71,315
13:11	28	11,0	1,807	1,133	63,737
13:16	33	11,0	1,807	1,133	63,737
13:26	43	11,5	1,946	0,994	55,926
13:36	53	11,7	2,003	0,937	52,738
13:56	73	11,7	2,003	0,937	52,738
14:16	93	11,7	2,003	0,937	52,738

Carga de entrada (cm): 12

Equações das calhas:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão de entrada (L/s): 2,9407

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 4****Data: 10/02/2006**

<b>Hora</b>	<b>Tempo acumulado (min.)</b>	<b>Carga de saída (cm)</b>	<b>Vazão de saída (L/s)</b>	<b>Infiltração (L/s/80m)</b>	<b>Infiltração (mm/h)</b>
9:16	-	-	-	-	-
9:27	11	4,5	0,408	1,739	97,846
9:30	14	6,0	0,658	1,488	83,740
9:35	19	7,0	0,852	1,296	72,896
9:40	24	7,5	0,955	1,192	67,064
9:55	34	8,5	1,177	0,971	54,613
10:05	44	8,5	1,177	0,971	54,613
10:15	54	8,3	1,131	1,016	57,186
10:30	69	8,5	1,177	0,971	54,613
10:45	84	8,4	1,154	0,994	55,904
11:00	99	8,5	1,177	0,971	54,613

Carga de entrada (cm): 10

Equações das calhas:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão de entrada (L/s): 2,1476

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

## ANEXO 5

TESTES DE INFILTRAÇÃO COM A TÉCNICA DO  
BALANÇO DE VOLUME (PROPOSTO POR  
CHRISTIANSEN *et al.*, 1966)

**Teste n°: 1****Local: Fazenda Experimental Vale do Curu****Data: 13/01/2006**

Tempo (min.)	Distância (m)	$(q \cdot t_1)/L$ (m)	$(q \cdot t_1)/L - \bar{y}$ (m)
0	0	-	-
1	10	0,0221	0,0153
2	20	0,0221	0,0153
4	30	0,0255	0,0187
5	40	0,0298	0,0230
8	50	0,0335	0,0267
10	60	0,0368	0,0300
13	70	0,0397	0,0329
15	80	0,0424	0,0356

Equação da calha:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão média (L/s): 2,9407

Carga de entrada (cm): 12

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 2****Data: 27/01/2006**

Tempo (min.)	Distância (m)	$(q \cdot t_1)/L$ (m)	$(q \cdot t_1)/L - \bar{y}$ (m)
0	0	-	-
1	10	0,0243	0,0162
2	20	0,0243	0,0162
5	30	0,0405	0,0324
7	40	0,0426	0,0345
8	50	0,0389	0,0308
10	60	0,0405	0,0324
13	70	0,0452	0,0371
15	80	0,0456	0,0375

Equação da calha:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão média (L/s): 3,240

Carga de entrada (cm): 12,7

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 3****Data: 02/02/2006**

<b>Tempo (min.)</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>(q.t<sub>1</sub>)/L (m)</b>	<b>(q.t<sub>1</sub>)/L - <math>\bar{y}</math> (m)</b>
0	0	-	-
2	10	0,0441	0,0173
4	20	0,0441	0,0173
7	30	0,0515	0,0247
10	40	0,0533	0,0265
12	50	0,0529	0,0261
14	60	0,0515	0,0247
17	70	0,0530	0,0262
20	80	0,0551	0,0283

Equação da calha:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão média (L/s): 2,9407

Carga de entrada (cm): 12

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

**Teste n°: 4****Data: 10/02/2006**

<b>Tempo (min.)</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>(q.t<sub>1</sub>)/L (m)</b>	<b>(q.t<sub>1</sub>)/L - <math>\bar{y}</math> (m)</b>
0	0	-	-
1	10	0,0183	0,0125
2	20	0,0181	0,0123
3	30	0,0174	0,0116
5	40	0,0215	0,0157
7	50	0,0231	0,0173
12	60	0,0322	0,0264
13	70	0,0299	0,0241
15	80	0,0282	0,0224

Equação da calha:

Entrada:  $Q = 0,1137 H^{1,7238}$ 

Vazão média (L/s): 2,1476

Carga de entrada (cm): 10

Saída:  $Q = 0,0713 H^{1,6649}$ 

Espaçamento entre sulcos (m): 0,8 Comprimento do sulco (m): 80

## ANEXO 6

TESTES DE INFILTRAÇÃO COM A TÉCNICA DO  
BALANÇO DE VOLUME (METODOLOGIA DE  
WALKER & SKOGERBOE, 1987)

Teste n°: 1

Local: Fazenda Experimental Vale do Curu

Data: 13/01/2006

Dados:

L (m)	80
n	0,04
U <sub>CC</sub> (g/g)	0,112
U <sub>PMP</sub> (g/g)	0,044
f	0,4
S <sub>0</sub> (m/m)	0,006
E <sub>S</sub> (m)	0,8
d <sub>S</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,4
Zr (cm)	30

### 1.1 Hidrógrafas:

Calha de entrada: Q = 0,1137 H <sup>1,7238</sup>				Calha de saída: Q = 0,07137 H <sup>1,6649</sup>			
Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)	Hora	H (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)
11:00	-	-	-	11:11	0	0	0
11:01	0,05	1	0,0374	11:21	0,07	1	0,0672
11:11	0,08	11	0,0796	11:31	0,09	11	0,0944
11:21	0,10	21	0,1138	11:41	0,10	21	0,1088
11:31	0,11	31	0,1326	11:51	0,11	31	0,1237
11:41	0,12	41	0,1525	12:01	0,11	41	0,1237
11:51	0,12	51	0,1525	12:11	0,11	51	0,1237
12:01	0,12	61	0,1525				
12:11	0,12	71	0,1525				

Q entrada (m<sup>3</sup>/min): 0,1525      Q saída(m<sup>3</sup>/min): 0,1237

f<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/min/m) = (Q<sub>entrada</sub> - Q<sub>saída</sub>)/L      f<sub>0</sub>: 0,00036

### 1.2 Avanço:

Avanço (min.)	X (m)
0	0
1,5	10
1,9	20
3,2	30
5,0	40
6,3	50
8,0	60
10,5	70
13,4	80

$$x = p \cdot t_x^r$$

Método dos dois pontos:

r: 0,70312

p: 12,9003

$$x = 12,9003 \cdot t_x^{0,70312}$$

## 1.3 Geometria do fluxo:

Y (m)	X (m)
0	0
0,020	0,060
0,030	0,080
0,050	0,110
0,070	0,170
0,080	0,190
0,090	0,220
0,100	0,270

Pm (m)	Pm <sub>ac</sub> (m)
0	0
0,09381	0,09381
0,03464	0,12845
0,05831	0,18676
0,09381	0,28057
0,03464	0,31521
0,04690	0,36211
0,07348	0,43560

$$A = a_1 \cdot Y^a_2$$

$$PM = b_1 \cdot Y^b_2$$

Y médio (m)	0,070
Y médio (m)	0,170
Y médio (m)	0,100
Y médio (m)	0,270

L <sub>2</sub>	1,297045
L <sub>1</sub>	5,35068
a <sub>1</sub>	2,329375
a <sub>2</sub>	2,297045

Pm méd. (m)	0,28057
Pm máx. (m)	0,43560
b <sub>2</sub>	1,2333
b <sub>1</sub>	7,4548

c <sub>2</sub>	0,7641
c <sub>1</sub>	2,2144
A <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> ) = 0,1111906	

Teste n°: 2

Data: 27/01/2006

Dados:

L (m)	80
n	0,04
U <sub>CC</sub> (g/g)	0,112
U <sub>PMP</sub> (g/g)	0,044
f	0,4
S <sub>0</sub> (m/m)	0,006
E <sub>S</sub> (m)	0,8
d <sub>S</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,4
Zr (cm)	30

## 1.1 Hidrógrafas:

Calha de entrada: Q = 0,1137 H <sup>1,7238</sup>				Calha de saída: Q = 0,07137 H <sup>1,6649</sup>			
Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)	Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)
11:00	-	-	-	11:11	0	0	0
11:01	0,05	1	0,0390	11:21	0,08	1	0,0638
11:11	0,09	11	0,1075	11:31	0,08	11	0,0638
11:21	0,09	21	0,1075	11:41	0,09	21	0,0777
11:31	0,10	31	0,1289	11:51	0,10	31	0,0925
11:41	0,11	41	0,1519	12:01	0,11	41	0,1085
11:51	0,12	51	0,1764	12:11	0,11	51	0,1085
12:01	0,12	61	0,1764				
12:11	0,12	71	0,1764				

Q entrada (m<sup>3</sup>/min): 0,1764 Q saída(m<sup>3</sup>/min): 0,1085 $f_0$  (m<sup>3</sup>/min/m) = (Q<sub>entrada</sub> - Q<sub>saída</sub>)/L  $f_0$ : 0,00085

## 1.2 Avanço:

Avanço (min.)	X (m)
0	0
1,0	10
2,0	20
3,0	30
4,0	40
5,0	50
7,0	60
8,0	70
10,0	80

$$x = p \cdot t_x^r$$

Método dos dois pontos:  
r: 0,75647  
p: 14,0158  
 $x = 14,0158 \cdot t_x^{0,75647}$

## 1.3 Geometria do fluxo:

Y (m)	X (m)
0	0
0,010	0,080
0,030	0,100
0,050	0,120
0,060	0,150
0,070	0,200
0,080	0,230
0,090	0,260

Pm (m)	Pm <sub>ac</sub> (m)
0	0
0,11489	0,11489
0,04899	0,16388
0,04899	0,21287
0,04690	0,25978
0,07348	0,33326
0,04690	0,38016
0,04690	0,42707

$$A = a_1 \cdot Y^a_2$$

$$PM = b_1 \cdot Y^b_2$$

Y médio (m)	0,060
Y médio (m)	0,150
Y máx. (m)	0,090
Y máx. (m)	0,260

L <sub>2</sub>	1,290549
L <sub>1</sub>	5,661705
a <sub>1</sub>	2,471767
a <sub>2</sub>	2,290549

Pm méd. (m)	0,25978
Pm máx. (m)	0,47397
b <sub>2</sub>	1,1772
b <sub>1</sub>	7,1274

c <sub>2</sub>	0,7553
c <sub>1</sub>	2,1326
A <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> ) = 0,015855	

Teste n°: 3

Data: 02/02/2006

Dados:

L (m)	80
n	0,04
U <sub>CC</sub> (g/g)	0,112
U <sub>PMP</sub> (g/g)	0,044
f	0,4
S <sub>0</sub> (m/m)	0,006
E <sub>S</sub> (m)	0,8
d <sub>S</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,4
Zr (cm)	30

## 1.1 Hidrógrafas:

Calha de entrada: Q = 0,1137 H <sup>1,7238</sup>				Calha de saída: Q = 0,07137 H <sup>1,6649</sup>			
Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)	Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)
11:00	-	-	-	11:11	0	0	0
11:01	0,05	1	0,0390	11:21	0,08	1	0,0638
11:11	0,09	11	0,1075	11:31	0,09	11	0,0777
11:21	0,10	21	0,1289	11:41	0,10	21	0,0925
11:31	0,10	31	0,1289	11:51	0,10	31	0,0925
11:41	0,11	41	0,1519	12:01	0,11	41	0,1085
11:51	0,11	51	0,1519	12:11	0,11	51	0,1085
12:01	0,12	61	0,1764				
12:11	0,12	71	0,1764				

Q entrada (m<sup>3</sup>/min): 0,1764      Q saída(m<sup>3</sup>/min): 0,1085  
 $f_0$  (m<sup>3</sup>/min/m) = (Q<sub>entrada</sub> - Q<sub>saída</sub>)/L       $f_0$ : 0,00085

## 1.2 Avanço:

Avanço (min.)	X (m)
0	0
2,0	10
3,0	20
5,0	30
6,0	40
7,0	50
8,0	60
10,0	70
11,0	80

$$x = p \cdot t_x^r$$

Método dos dois pontos:  
r: 1,14355  
p: 5,15471  
 $x = 14,0158 \cdot t_x^{0,75647}$

## 1.3 Geometria do fluxo:

Y (m)	X (m)
0	0
0,01	0,09
0,03	0,11
0,05	0,12
0,06	0,14
0,07	0,23
0,08	0,24
0,09	0,26

Pm (m)	Pm <sub>ac</sub> (m)
0	0
0,12884	0,12884
0,04899	0,17783
0,04243	0,22026
0,03464	0,25490
0,12884	0,38374
0,02449	0,40823
0,03464	0,44288

$$A = a_1 \cdot Y^a_2$$

$$PM = b_1 \cdot Y^b_2$$

Y médio (m)	0,06
X médio (m)	0,14
Y máx. (m)	0,09
X máx. (m)	0,26

L <sub>2</sub>	0,436829
L <sub>1</sub>	0,820257
a <sub>1</sub>	0,570881
a <sub>2</sub>	1,436829

Pm méd. (m)	0,25490
Pm máx. (m)	0,50288
b <sub>2</sub>	1,3302
b <sub>1</sub>	10,7551

c <sub>2</sub>	0,9528
c <sub>1</sub>	6,3464
A <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> ) = 0,013088	

Teste n°: 4

Data: 10/02/2006

Dados:

L (m)	80
n	0,04
U <sub>CC</sub> (g/g)	0,112
U <sub>PMP</sub> (g/g)	0,044
f	0,4
S <sub>0</sub> (m/m)	0,006
E <sub>S</sub> (m)	0,8
d <sub>S</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,4
Zr (cm)	30

## 1.1 Hidrógrafas:

Calha de entrada: Q = 0,1137 H <sup>1,7238</sup>				Calha de saída: Q = 0,07137 H <sup>1,6649</sup>			
Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)	Hora	h (m)	T acum. (min.)	Q (m <sup>3</sup> /min.)
11:00	-	-	-	11:11	0	0	0
11:11	0,05	1	0,0390	11:21	0,09	3	0,0706
11:21	0,08	11	0,0877	11:31	0,10	8	0,0925
11:31	0,10	21	0,1289	11:41	0,11	13	0,1085
11:41	0,12	31	0,1714	11:51	0,11	23	0,1085
11:51	0,12	41	0,1764	12:01	0,11	33	0,1085
12:01	0,12	51	0,1764	12:11	0,11	48	0,1085
12:11	0,12	61	0,1764	12:21	0,11	63	0,1085
12:21	0,12	70	0,1764				

Q entrada (m<sup>3</sup>/min): 0,1764      Q saída(m<sup>3</sup>/min): 0,1085f<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/min/m) = (Q<sub>entrada</sub> - Q<sub>saída</sub>)/L      f<sub>0</sub>: 0,00085

## 1.2 Avanço:

Avanço (min.)	X (m)
0	0
1,0	10
1,0	20
2,0	30
3,0	40
4,0	50
5,0	60
7,0	70
8,0	80

$$x = p \cdot t_x^r$$

Método dos dois pontos:

r: 0,7067

p: 18,4027

$$x = 14,0158 \cdot t_x^{0,75647}$$

## 1.3 Geometria do fluxo:

Y (m)	X (m)
0	0
0,020	0,150
0,030	0,200
0,050	0,260
0,070	0,300
0,080	0,330
0,090	0,350
0,100	0,360

Pm (m)	Pm <sub>ac</sub> (m)
0	0
0,21587	0,21587
0,07348	0,28936
0,09381	0,38316
0,06928	0,45245
0,04690	0,49935
0,03464	0,53399
0,02449	0,55849

$$A = a_1 \cdot Y^a_2$$

$$PM = b_1 \cdot Y^b_2$$

Y médio (m)	0,070
Y médio (m)	0,330
Y máx. (m)	0,100
Y máx. (m)	0,360

L <sub>2</sub>	0,2440
L <sub>1</sub>	0,6313
a <sub>1</sub>	0,5075
a <sub>2</sub>	1,2440

Pm méd. (m)	0,45245
Pm máx. (m)	0,55849
b <sub>2</sub>	0,5903
b <sub>1</sub>	2,1745

c <sub>2</sub>	0,7406
c <sub>1</sub>	1,7264
A <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> ) = 0,014117	