MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA FASE DE AVANÇO NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

DIRCEU VILELA DE ANDRADE

Engenheiro agrônomo

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

**Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.**

**PIRACICABA
Estado de São Paulo- Brasil
Junho de 1994**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - FCLQ/USP

Andrade, Dirceu Vilela de

A553m Modelo matemático para simulação da fase de avanço
na irrigação por sulcos. Piracicaba, 1994.
135p.

tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Irrigação por sulco - Desempenho 2. Irrigação
por sulco - Dimensionamento - Modelo matemático
3. Irrigação por sulco - Simulação - Modelo matemático
I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Pi-
racicaba

CDD 631.7

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA FASE DE AVANÇO NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

DIRCEU VILELA DE ANDRADE

Aprovado em 01.08.1994

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel	ESALQ/USP
Prof. Dr. José Antonio Frizzone	ESALQ/USP
Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi	ESALQ/USP
Prof. Dr. JoãoCarlos Cury Saad	FCA/UNESP
Prof. Dr. Jairo Augusto Campos de Araújo	FMVAJ/UNESP

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel
Orientador

À minha mãe Lalia.

À memória de meu pai Wolmy.

À minha esposa Rejane.

Aos meus filhos Virgínia, Juliana e Daniel.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e esperança.

À Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco-
CODEVASF, pela liberação para a realização do curso.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-
ESALQ/USP, por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela
acolhida e apoio dispensados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
Tecnológico- CNPq, pela ajuda financeira durante o transcorrer do curso.

Ao Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel, pela orientação, amizade
e apoio recebidos no decorrer do curso e na realização do presente estudo.

Aos demais professores e colegas do curso, pelo apoio e
sugestões recebidos durante o Doutorado.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a
realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	x
SUMMARY	xii
 1. INTRODUÇÃO	 1
 2. REVISÃO DE LITERATURA	 4
2.1. Considerações gerais	4
2.2. Hidráulica da irrigação por sulcos	10
2.2.1. A fase de avanço da água em sulcos de infiltração	10
2.2.2. O problema do avanço na irrigação por sulcos	12
2.2.3. Escoamento de água no meio poroso	14
2.2.4. Cálculo do escoamento superficial	16
2.2.5. Geometria da seção transversal de escoamento	20
2.2.6. A rugosidade superficial em sulcos	24
2.3. Infiltração da água no solo	28
2.4. Modelos matemáticos	40
2.4.1. Modelo hidrodinâmico	44
2.4.2. Modelo zero-inércia	49
2.4.3. Modelo de onda cinemática	51
2.4.4. Modelo do balanço volumétrico	52

3. MATERIAL E MÉTODOS	61
3.1. Descrição do modelo	62
3.2. Desenvolvimento teórico e computacional do modelo	66
3.3. Sequência dos cálculos	71
3.3.1. Solução para a primeira célula de espaço	71
3.3.2. Solução para a segunda célula de espaço	72
3.4. Processo físico do modelo	74
3.4.1. Organização para linguagem de computador	74
3.4.2. Dados de entrada	76
3.5. Verificação do modelo	77
3.5.1. Análise com dados de sulcos de precisão	78
3.5.2. Análise com dados a nível de campo	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Comparação com dados de sulco de precisão	82
4.2. Comparação com dados da parcela experimental	86
5. CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICE 1	109
APÊNDICE 2	116
APÊNDICE 3	130

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área da seção transversal, em m^2 ;
- A_o - área da seção transversal no início do sulco, em m^2 ;
- $\overline{A_s}$ - área superficial média, em m^2 ;
- $\overline{A_i}$ - área infiltrada média, m^2 ;
- A_{io} - área infiltrada acumulada no início do sulco, m^2 ;
- a - expoente do tempo da eq. de infiltr. acumulada de kostiakov, adm ;
- a' - expoente do tempo da eq. de velocidade de infiltr. de kostiakov, adm ;
- B - largura da superfície livre de água no sulco, m ;
- $b1, b2$ - parâmetros de ajuste da relação de potência entre A x Y , adm ;
- C - coeficiente de resistência de Chezy, adm ;
- c, m - parâmetros de ajuste da relação potência entre B x Y , adm ;
- $c1, c2$ - parâmetros geométricos da seção transversal do sulco, adm ;
- DI - efeito dinâmico da infiltração, dado pela eq.(43) ;
- F - número de Froude, dado pela eq. (44) ;
- f_o - velocidade de infiltração básica, $m^3.m^{-1}.min^{-1}$;
- g - aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$;
- i - índice de espaço, adm ;
- $I(T)$ - lâmina de infiltração, m ;
- $i(T)$ - velocidade de infiltração, $m.min^{-1}$;

- j - índice de tempo, adm ;
 K - parâmetro de ajuste da eq. infiltr. acum. de Kostiakov, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$;
 K' - parâmetro de ajuste da eq. infiltr. instantânea, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$;
 L - comprimento do sulco, m ;
 $n[i]$ - coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning, adm ;
 n_0 - coeficiente de rugosidade de Manning inicial, adm ;
 P - força de pressão, m ;
 p, r - parâmetros empíricos de ajuste da equação de avanço, adm ;
 Pm - perímetro molhado, m ;
 Q - vazão, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
 q_i - vazão infiltrada na célula atual, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{segn.}$;
 $q[i]$ - vazão no início do próximo trecho, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
 q_{iac} - vazão infiltrada acumulada, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
 q_0 - vazão de entrada no sulco, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$;
 q_s - vazão de saída no sulco, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$;
 Re - número de Reynolds, adm ;
 Rh - raio hidráulico, m ;
 ry - fator de forma superficial, adm ;
 rz - fator de forma subsuperficial ;
 $s(t)$ - distância de avanço, m ;
 So - declividade, $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$;

- S_f - gradiente do declive da resistência hidráulica, $m \cdot m^{-1}$;
- t - tempo de avanço ou de infiltração, min ou s ;
- $t_o[i]$ - tempo de oportunidade de infiltração, s ;
- $T_{0,5L}$ - tempo de avanço na metade da parcela, min ;
- TL - tempo de avanço no final da parcela; min;
- $t[i]$ - tempo instantâneo de avanço, s ;
- t_{avc} - tempo de avanço acumulado, s ;
- V - velocidade média do fluxo, $m \cdot s^{-1}$;
- V_s - volume superficial, m^3 ;
- V_i - volume infiltrado, m^3 ;
- V_{sa} - volume superficial acumulado, m^3 ;
- V_{ia} - volume infiltrado acumulado, m^3 ;
- V_t - volume total acumulado, m^3 ;
- Y - altura da lâmina de água, m ;
- Y_o - lâmina de água no início do sulco, m;
- ρ, γ - parâmetros de ajuste da relação de potência $Y \times P_m$, adm ;
- ε - medida da altura da rugosidade, m e
- Δs - segmento de espaço, m.

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA FASE DE DE AVANÇO NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Autor: DIRCEU VILELA DE ANDRADE

Orientador: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

RESUMO

Os modelos matemáticos para previsão da irrigação superficial constituem recursos valiosos, capazes de levar em conta inúmeras alternativas de dimensionamento a um custo e tempo reduzido.

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático simplificado, para a simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos, utilizando células de espaço pré-fixadas e rugosidade variável.

O modelo é baseado na associação da equação de Manning para movimento uniforme de água em canais e na equação de infiltração de Kostikov.

O sulco é hipoteticamente dividido em pequenas células de espaço fixas (Δs), nas quais é assumido o movimento como uniforme e o coeficiente de rugosidade "n" de Manning variável. É aplicado em cada um destes segmentos as referidas equações e feito um balanço do volume da água que flui pelo sulco, considerando a água infiltrada e a fornecida pelo segmento

anterior. Por cálculo matemático utilizando-se de um programa desenvolvido para computador obtêm-se o avanço da água.

Os valores calculados pelo modelo proposto diferem daqueles observados no campo de sulcos de precisão em 0,71% ao final do tempo de avanço.

Concluindo, o modelo de simulação se mostrou com um pequeno nível de complexidade e os resultados obtidos apresentaram uma boa relação com os dados de campo, qualificando-o como uma ferramenta útil e eficaz de ajuda para o dimensionamento da irrigação por sulcos.

MATHEMATICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF THE ADVANCED PHASE OF FURROW IRRIGATION

Author : DIRCEU VILELA DE ANDRADE

Adviser: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

SUMMARY

The use of mathematical models in order to forecast the superficial irrigation, is a valuable resource that permits several dimensioning alternatives, at reduced cost and time.

The aim of this work is to develop a simplified mathematical model, to simulate the advancing phase, in the furrow irrigation, using fixed space cells and variable rugosity.

The model is based on the Manning equation for the uniform water flow in channels, together with the Kostiakov infiltration equation.

The furrow is divided hypothetically in small fixed space cells (Δs), in which the flow is assumed as being uniform, and the rugosity coefficient of the Manning "n" as being variable. These two equations are applied in each segment and balance the water along the whole furrow, is possible by computing the water infiltrated and that supplied from preceding segment. A computer program was developed to simulate the water advance.

Data of the proposed model differ from those of the precision field furrows, in 0,71 % at the end of the advance time.

As a conclusion, it can be said that the simulation model is simple and as its results fitted satisfactorily the field data, it could be a useful tool in the dimensioning of furrow irrigation.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação superficial ou por gravidade, possuem como principal característica a distribuição de água na área a ser irrigada através da superfície do solo, utilizando a energia da gravidade. Para isto é exigida uma condição superficial adequada do solo, de modo a proporcionar um escoamento contínuo sem causar erosão.

Os sistemas de irrigação por superfície constituem a maior proporção da área irrigada no mundo, sendo que a crise energética atual tem provocado um novo interesse para estes métodos. Os Estados Unidos da América do Norte tem procurado a melhoria da irrigação superficial, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a sua simulação, quanto nas técnicas de automação destes métodos.

A irrigação por sulcos consiste na condução de água em pequenos canais ou sulcos situados lateralmente às linhas de plantio, durante o tempo necessário para que a água se infiltre neles tanto vertical como lateralmente. O processo típico de uma irrigação por sulcos compõe-se de quatro fases: avanço, infiltração e recesso, as quais em conjunto, permitem a análise do desempenho do sistema.

A simplicidade da irrigação por sulcos contrasta com o estudo de seu escoamento hidráulico, que é complexo e se assemelha ao movimento de

água em um canal de terra aberto à pressão atmosférica, com o leito inicialmente seco e permeável. Em cada seção do sulco a vazão é variável com o tempo, ainda que no início seja fornecida uma vazão constante. Estas características definem um regime não permanente, gradualmente variado sobre um meio poroso (o solo).

A fase de avanço em sulcos é de mais difícil previsão, devido à natureza do escoamento e geometria do fluxo: a forma do sulco muda continuamente devido a erosão e deposição de partículas do solo provocadas pelo movimento da água.

O dimensionamento da irrigação por sulcos pode ser feito por um processo de tentativas desenvolvido com ajuda de ensaios realizados em campo ou através da simulação com a utilização de modelos matemáticos, com o objetivo de se conseguir os melhores índices de desempenho do sistema ainda na fase de projeto, em função de uma combinação adequada dos parâmetros envolvidos. Normalmente os testes de campo geram resultados mais representativos, porém a experiência tem demonstrado que a determinação destes dados é uma tarefa onerosa, complexa e demorada, sendo que qualquer tentativa de substituir ou diminuir o número destes ensaios é válida. Neste aspecto, os modelos matemáticos constituem recursos preciosos, capazes de levar em conta várias alternativas de projeto a um custo e tempo reduzidos.

Os modelos utilizados para a simulação da irrigação por superfície podem ser formulados com base em uma aproximação completa, quando o avanço da água no solo é simulado através das equações completas de Saint-Venant e a quantificação da infiltração feita pela equação de Richards. Qualquer outra situação é considerada uma aproximação simplificada, desde que uma ou algumas das equações que o integram sejam simplificadas. A

precisão de cada modelo depende em grande parte das validades das hipóteses assumidas para representar situações reais.

A grande vantagem no dimensionamento da irrigação por sulcos utilizando modelagem matemática é permitir obtenção da equação do avanço a partir das características de infiltração no solo para diferentes vazões e declividades, sem ser necessários testes no campo, possibilitando o dimensionamento com uma vazão de máxima eficiência.

A análise hidráulica da irrigação por sulcos é mais complexa do que a por faixas ou inundação, sendo por isto que menos modelos matemáticos foram desenvolvidos para a sua simulação e, mesmo assim, são muito complicados devido a dificuldade em se relacionar matematicamente a função de infiltração com a geometria do sulco.

Considerando a necessidade da melhoria dos índices de eficiência e uniformidade da irrigação por sulcos, através da execução de um projeto racional utilizando modelo matemático mais simples, foi realizado o presente trabalho com o seguinte objetivo:

- Desenvolver um modelo matemático simplificado para a simulação da fase de avanço de água em sulcos em declive com drenagem livre, utilizando células de espaço pré-fixadas e rugosidade variável, assumindo o movimento como uniforme dentro destes pequenos segmentos e quantificando a vazão infiltrada pela equação modificada de Kostikov.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações gerais

Os sistemas de irrigação superficial possuem como principal característica , a distribuição de água através da superfície do solo utilizando para isto a energia associada a gravidade.

A irrigação por sulcos consiste na colocação de uma vazão não erosiva contínua (constante ou variável) ou intermitente, por meio de pequenos canais ou sulcos construídos entre as linhas de plantio, que representam uma fração da superfície total a ser irrigada, durante o tempo necessário para que a água se infiltre vertical e lateralmente ao longo do perímetro molhado, umedecendo o perfil do solo compreendido pelo sistema radicular das culturas .

Um processo típico de irrigação por sulcos, com drenagem livre no final das parcelas pode ser caracterizado por quatro fases: avanço, reposição, depleção e recesso. O início da fase de avanço coincide com o começo da irrigação, no momento em que a vazão é derivada a parcela e prolonga-se até que a frente de avanço atinja a sua parte final. Neste instante, verifica-se a ocorrência de escoamento superficial nessa extremidade, podendo ou não ser caracterizado como perda de água, dependendo de sua eventual reutilização. A fase de reposição deve se estender até que a quantidade de água

requerida tenha sido reposta ao solo, através da irrigação em considerável extensão da parcela irrigada. Uma vez essa condição satisfeita, a aplicação de água é interrompida, tendo início a fase de depleção. Esta, quase sempre apresenta curta duração, sendo praticamente imperceptível, podendo por isso ser desprezada, encerrando no momento em que a lâmina de água no ponto de derivação é removida da superfície por escoamento superficial e infiltração, quando se inicia a fase de recesso. O deslocamento progressivo de uma ou mais frentes recessivas na superfície de escoamento, até que nenhuma lâmina de água ocorra na superfície define a fase de recesso e o final do processo de irrigação. Esta caracterização é arbitrária e a divisão de cada fase é meramente descritiva, procurando traduzir a principal característica que ocorre em cada estágio considerado. A infiltração ocorre em todas as fases do processo, ou seja nas partes onde existir água e representa o principal parâmetro envolvido no dimensionamento, operação e manejo de sistemas de irrigação superficial, onde suas características influenciam o comportamento de todas as fases do processo e, conseqüentemente o desempenho do sistema (SCALOPPI, 1986).

O principal problema associado ao dimensionamento da irrigação por sulcos de acordo com SCALOPPI (1983), consiste na previsão das taxas de avanço e recesso de água na superfície do solo. Estes processos em conjunto determina o tempo de oportunidade para a infiltração nas diferentes partes da parcela e conseqüentemente os níveis de eficiência de aplicação e de armazenamento e a uniformidade de distribuição de água para uma determinada combinação de parâmetros hidráulicos e de solo que podem ser associados.

A importância das fases de depleção e recesso na irrigação por sulcos tem sido questionada por diferentes autores em termos de sua contribuição efetiva para o perfil final.

WALKER (1989) afirma que na irrigação por sulcos a fase de depleção é de muito pouca duração, sendo praticamente imperceptível e podendo por isso ser desprezada. Também em sulcos com reduzida seção de escoamento e moderado gradiente de declive, a fase de recesso é suficientemente rápida, podendo ser considerada desprezível, sendo que a medida que se aumenta a seção de escoamento e diminui o declive, o recesso se torna mais lento.

Também SOUZA (1984), diz que na maioria das vezes a fase de recesso é muito curta, com a água desaparecendo quase que simultaneamente ao longo do sulco. HART et al. (1983) aponta que o tempo de recessão é relativamente pequeno, podendo ser ignorado quando a declividade excede a aproximadamente 0,05 %. WILKE & SMERDON (1965), consideram que o recesso pode ser desprezado, relativamente à sua contribuição ao volume total infiltrado durante as fases anteriores.

Hidraulicamente, o escoamento de água em sulcos de infiltração caracteriza-se como sendo em canal aberto (à pressão atmosférica) sobre um meio poroso e irregular quanto a forma, declive e rugosidade hidráulica superficial. Estas características definem um fluxo instável e não uniforme, apresentando uma infiltração variável com o tempo (SCALOPPI, 1983).

O fluxo de água em sulcos se assemelha ao movimento em um canal de terra com o leito inicialmente seco e permeável, sendo que em cada seção do sulco a vazão é variável com o tempo. A fase de avanço fica difícil de ser prevista, devido a natureza do escoamento, classificado como não permanente e gradualmente variado, diminuindo a vazão com a distância devido a infiltração (TABUADA, 1989).

De acordo com REDDY & CLYMA (1981), os parâmetros que afetam o desempenho da irrigação por sulcos são: a vazão de entrada, declividade do sulco, extensão da parcela, coeficiente de rugosidade hidráulica, forma do sulco e características de infiltração do solo. As variáveis operacionais a serem determinadas a nível de projeto são a vazão aplicada, o tempo de aplicação, comprimento e espaçamento entre sulcos e a lâmina requerida. As características de infiltração, rugosidade hidráulica e a forma do sulco são parâmetros que variam de local para local.

HANSEN (1958), relacionou dez variáveis básicas envolvidas na irrigação por superfície, ou seja: 1) vazão aplicada, 2) taxa de avanço, 3) tamanho da parcela, 4) altura da lâmina líquida superficial, 5) Taxa de infiltração, 6) declividade, 7) resistência ao escoamento superficial, 8) risco de erosão, 9) forma da superfície condutora e 10) lâmina de infiltração requerida. Estas variáveis associadas determinam um fluxo de natureza muito complexa para ser perfeitamente caracterizada através da aplicação dos conceitos clássicos de mecânica dos fluidos.

A colocação de uma determinada vazão no início do sulco vai originar uma onda que vai se propagando ao longo do mesmo, cuja velocidade de avanço depende não somente da vazão de entrada, como também das características físicas e hidrodinâmicas do solo e do teor de água nos primeiros centímetros de profundidade na seção transversal do sulco (TABUADA, 1989)

Segundo BASSET et al. (1983), devido ao fato da taxa de infiltração ser geralmente 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 da frente em direção ao ponto de derivação da água. A ocorrência da infiltração reduz o

fluxo superficial, tornando-o variável com a distância e o tempo, resultando em um caso especial de escoamento instável gradualmente variado à pressão atmosférica. A velocidade superficial da água é quase sempre subcrítica e o fluxo geralmente é turbulento, podendo em certos casos ser transicional ou mesmo laminar.

Com relação ao dimensionamento da irrigação superficial de acordo com FRIZZONE (1993), a menos que se utilizem modelos matemáticos os níveis de eficiência e uniformidade não podem ser estabelecidos a "priori", sendo que o seu planejamento exige ensaios de campo que, somente após análise criteriosa revelam dados que permitem definir os parâmetros de projeto. Estes testes a nível de campo geralmente proporcionam resultados mais representativos, porém o processo é demorado, caro e trabalhoso. Nestes aspectos os modelos matemáticos se revelam como ferramentas preciosas, capazes de levar em conta várias alternativas de projeto a um custo e tempo reduzidos.

Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para descrever e analisar a irrigação superficial, variando em complexidade desde simples modelos algébricos, baseados no princípio da conservação da massa, até modelos hidrodinâmicos, os quais consistem na solução das equações de Saint-Venant para fluxo de água em canais sob regime não permanente e variado. Também são usados modelos baseados na hipótese de que a aceleração da água pode ser considerada nula, ao qual denominam zero-inércia. A maior parte destes modelos foi aplicada na irrigação por inundação e por faixa, devido ao fato da análise hidráulica da irrigação por sulcos ser mais complexa do que para estes métodos de irrigação superficial (SOUZA, 1981).

SCALOPPI (1983), afirma que a despeito das dificuldades em se relacionar matematicamente a função de infiltração do solo com a geometria do sulco, diversos modelos tem sido propostos para estimar as taxas de avanço e recesso de água na irrigação superficial. Cada modelo baseia-se em diversas hipóteses simplificadoras que, apesar de não serem rigorosamente corretas para as condições existentes, muitas vezes constituem um artifício valioso para simplificar, ou mesmo possibilitar a solução deste complexo problema. A validade dos modelos propostos para representar fenômenos práticos da irrigação superficial, depende acentuadamente da representatividade das variáveis de alimentação requeridas para o seu processamento. Os parâmetros de uma equação representativa do processo de infiltração desempenham um papel particularmente importante nos resultados obtidos pelos modelos de simulação.

A otimização dos sistemas de irrigação por sulcos até recentemente era limitada a solos homogêneos por dois motivos: primeiro, porque a variabilidade espacial da infiltração em sulcos não era quantificada e segundo, porque não existia um modelo que computasse as variações espaciais em função da infiltração (WALLENDER & RAYEJ, 1987).

De acordo com TABUADA (1989), o escoamento no meio poroso (infiltração) possui maior complexidade e tem sido quantificado por fórmulas empíricas, que não fornecem nenhuma informação quanto à evolução da frente de umedecimento no espaço e no tempo. A melhor maneira de se estimar a infiltração é a partir dos dados de avanço, medindo-se a seção transversal de escoamento e o volume de água escoado no final do sulco, bem como a vazão aplicada no início da parcela.

2.2. Hidráulica da irrigação por sulcos

2.2.1. A fase de avanço da água em sulcos de infiltração

A fase de avanço tem início quando a água é aduzida ao sulco e termina quando a frente de avanço atinge o final da parcela.

O avanço da água na irrigação por sulcos segundo SCALOPPI(1986), é difícil de ser previsto, devido a natureza do escoamento superficial. Aplicando-se uma vazão constante no início da parcela, observa-se que a área de infiltração vai progressivamente aumentando com a distância de avanço em maior proporção que a redução da velocidade de infiltração média na distância considerada, produzindo como consequência a diminuição da taxa de vazão com o tempo.

O comportamento do avanço da água no solo se deve a redução da vazão com a distância, sendo que as variações das condições superficiais de escoamento devidos ao cultivo, manejo e a própria irrigação modificam a rugosidade da superfície, a taxa de infiltração, a forma da seção transversal de escoamento e, conseqüentemente, as características de avanço de água na superfície. A vazão aplicada, a declividade da parcela e a umidade do solo antes da irrigação, também afetam a taxa de avanço (FRIZZONE, 1993).

O avanço é a fase mais crítica na irrigação por sulcos, devido apresentar a taxa de infiltração em níveis relativamente elevados quando comparados com outras etapas, pelo fato do tempo ser inversamente proporcional à razão de infiltração (DOURADO NETO, 1987).

De acordo com TABUADA (1989), o escoamento superficial e o fluxo no interior do solo são dois processos interdependentes que não

devem ser dissociados; mas anteriormente, havendo necessidade de saber o tempo que a água levava para atingir o final da parcela, houve necessidade de recorrer a equações desenvolvidas com base nos dados observados no campo. Diversos pesquisadores desenvolveram equações empíricas, não somente para saber o tempo de avanço, mas também para o desenvolvimento de modelos que pudessem revelar de forma mais real o processo da irrigação. A expressão mais utilizada para se obter uma previsão da fase de avanço, é a função de potência na forma:

$$s(t) = p \cdot t^r \quad (01)$$

onde:

- $s(t)$ - distância de avanço (metros);
- t - tempo de avanço (minutos);
- p, r - parâmetros empíricos de ajustamento dos dados observados.

Alguns autores, tais como FOK & BISHOP (1965), WILKE & SMERDON (1965) e HART et al. (1968), utilizam esta equação na forma de potência juntamente com uma função de infiltração, em seus modelos de simulação da irrigação superficial.

Os coeficientes empíricos da equação de avanço podem ser obtidos por meio de regressão linear, após uma transformação logarítmica dos dados observados de distância e tempo e pelo método dos dois pontos, proposto por ELLIOT & WALKER (1982), que consiste em obter os parâmetros do sistema para dois pontos conhecidos, normalmente a metade e o comprimento total do sulco com os correspondentes tempos para a água atingir estas distâncias.

Outras expressões matemáticas podem ser utilizadas para a determinação do avanço de água, sendo que todas elas integram parâmetros empíricos, embora não de uma forma implícita. Estas dependem em geral da condição inicial da umidade do solo, da vazão de alimentação, do número de pontos observados durante o ensaio ou irrigação, da duração do teste e do tipo de solo. Os valores encontrados numa dada situação não podem servir para a previsão de futuras irrigações (TABUADA, 1989).

GRASSI(1988), analisando o significado físico das constantes empíricas "p" e "r" da equação de avanço, mostrou que "p" é um parâmetro que depende da declividade, da vazão e da rugosidade superficial do sulco e que "r" esta relacionado com as características físicas do solo expressas em função da infiltração.

Segundo RAYEJ & WALLENDER (1987), quando a água é aplicada a montante em um sulco, alguma porção se infiltra no solo e um volume remanescente é armazenado na superfície. O tempo requerido para a água alcançar uma determinada distância não é conhecido, entretanto, para qualquer tempo não sabido o volume total aplicado é igual a soma dos volumes superficiais e subsuperficiais (conservação da massa).

2.2.2. O problema do avanço na irrigação por sulcos

De acordo com vários autores, tais como STRELKOF (1970), SCALOPPI (1983) e BASSET et al. (1983), o fenômeno do avanço em sulcos de infiltração tem sido enfocada sob duas aproximações gerais: hidrodinâmica e balanço volumétrico.

A aproximação hidrodinâmica é baseada na solução das equações de conservação da massa (continuidade) e da energia ou da quantidade de movimento que governam o movimento de água em regime não permanente e gradualmente variado, conhecidas como equações de Saint-Venant. Estas equações são classificadas como não lineares, do tipo hiperbólico e relacionam a altura da lâmina líquida na superfície e a velocidade média do fluxo em um canal aberto, onde as derivações das mesmas são encontradas em textos específicos, tais como, HENDERSON (1966) e CHOW (1986).

A solução baseada no balanço volumétrico considera que os volumes superficial e infiltrado podem ser aproximados pelo produto das respectivas áreas médias das seções transversais de escoamento superficial e infiltrado pela distância de avanço considerada. As áreas médias são calculadas com base nas áreas determinadas no ponto de derivação da água multiplicados por fatores de forma adequados, geralmente determinados empiricamente. Geralmente é assumido que o fluxo é uniforme para uma determinada vazão, declividade, rugosidade hidráulica e geometria da seção transversal de escoamento (SCALOPPI, 1983).

Os fatores de forma superficial (r_y) e subsuperficial (r_z) são funções explícitas da vazão de entrada, coeficiente de rugosidade e declividade, bem como das características de infiltração. Os possíveis erros quando se utiliza a equação do balanço do volume são a estimativa destes fatores de forma e a determinação da área da seção transversal pela equação de Manning, que considera o fluxo uniforme (YU & SINGH, 1990).

O fator de forma subsuperficial relaciona o volume real de água infiltrado até a distância considerada com um volume infiltrado fictício,

caso a lâmina infiltrada no início do sulco fosse constante ao longo de todo o comprimento do mesmo (WALKER & SKOGERBOE, 1987).

De acordo com SOUZA (1983), o problema do avanço na aproximação do balanço volumétrico, se reside na determinação da variação dos fatores de forma, r_y e r_z , com o tempo e das lâminas máximas superficial e infiltrada, Y_o e Z_o . Ainda, segundo este mesmo enfoque, a equação de energia é ignorada, sendo substituída pela hipótese de que o produto $r_y.Y_o$, seja constante e igual a lâmina média, $\bar{Y}$, o que tem sido comprovado por vários autores. O problema está centrado na avaliação do fator de forma subsuperficial, r_z , que pode ser determinado através de vários enfoques.

2.2.3. Escoamento de água no meio poroso

O fenômeno completo da irrigação por superfície é um caso especial de fluxo espacialmente variado e não permanente sobre um meio poroso. Espacialmente variado significa dizer que as variáveis dependentes mudam com o espaço, na direção s ao longo da parcela. Não permanente, significa que tais variáveis são função do tempo. O estado do fluxo é turbulento ou transitório (devido a massas geradas pelos elementos de rugosidade superficial e vegetativa), apesar de serem normalmente encontrados números de Reynolds bem abaixo de 1.000 e também pelo fato dos números de Froude serem geralmente bem menores que a unidade, o fluxo é subcrítico. Outros regime de escoamento diferentes são mais prováveis de ocorrer imediatamente próximo à frente de avanço e perto da frente de recessão (BASSET et al., 1983).

De acordo com TABUADA (1989), no regime gradualmente variado a curvatura da linha superficial é reduzida, a variação da altura se faz de forma gradual, as componentes verticais da aceleração das partículas são desprezíveis e é sensível a influência do atrito sobre a propagação da onda, sendo isto compatível com o escoamento que se verifica na irrigação por sulcos.

Hidraulicamente os sulcos ou faixas funcionam da mesma maneira que os canais, onde a diferença fundamental é que enquanto nestes o objetivo é conduzir a máxima vazão possível a distâncias consideráveis com a mínima perda por infiltração, nos sulcos o que interessa saber é que em tempos recorridos se infiltre a água aplicada. Nos canais desprezando as perdas por infiltração e evaporação, pode-se afirmar que a vazão se mantém constante, ao passo que na irrigação superficial a vazão é variável, decrescendo à medida que aumenta a distância, devido a infiltração (GRASSI, 1988).

As condições de fluxo na irrigação por sulcos difere da dos canais abertos em terra, devido ao fato de que as vazões conduzidas pelos sulcos são pequenas e uma grande variação na altura da lâmina de água é verificada, produzindo problemas na estimativa da resistência hidráulica (MICHAEL, 1978).

Hidraulicamente a fase de reposição ou infiltração é caracterizada por uma relativa estabilidade nas condições de escoamento superficial, podendo admitir que o perfil longitudinal da água escoando na superfície seja aproximadamente linear, o que simplifica as análises teóricas propostas para a descrição desta fase (SCALOPPI, 1986).

TABUADA (1989), afirma que o fluxo no meio poroso não saturado envolve normalmente o movimento de dois ou mais fluidos, sendo que

o escoamento está condicionado pela interação entre as três fases: solo, água e ar. O solo como meio poroso, é considerado como um meio polifásico, constituído por uma matriz sólida, eventualmente deformável- os grãos, normalmente agrupados em agregados e um espaço intergranular- os poros, por onde circulam os diversos fluidos. O teor de água, a pressão efetiva e a condutividade hidráulica estão relacionadas entre si e seu conhecimento é muito importante para o entendimento das transferências de massa ao nível do meio poroso não saturado. A complexidade do formalismo matemático que daí resulta faz com que o processo seja usualmente interpretado através de duas hipóteses mais simples: bifásica e monofásica. A bifásica considera a matriz do solo como fixa, no meio da qual se deslocam dois fluidos- a água e o ar. Na hipótese monofásica a água é o único fluido que escoar no meio poroso, negligenciando o movimento do ar, isto é, admitindo que durante o movimento este se encontra sempre à pressão atmosférica.

Ainda, segundo o mesmo autor, nos métodos de irrigação superficial, que se incluem a componente infiltração, a hipótese monofásica se adapta melhor ao método por sulcos, uma vez que neste, a água não molha totalmente a superfície do solo, permitindo assim a expulsão do ar existente no mesmo à medida que a água vai avançando ao longo do perfil, por conseguinte, sem que o ar afete o escoamento.

2.2.4. Cálculo do escoamento superficial

Quando é assumido que movimento seja uniforme, isto é sob a condição que a vazão e a área da seção transversal do fluxo superficial sejam

univocamente relacionadas, pode então a relação área-vazão ser suprida por uma equação para fluxo uniforme, como a fórmula de Chezy, Manning ou Darcy-Weisbach, sendo a equação de Manning a mais utilizada (CHOW, 1986).

De acordo com AZEVEDO NETTO & ALVAREZ (1986) a fórmula de Chezy é a principal equação de fluxo uniforme, sendo que as fórmulas práticas para o escoamento em condutos livres são baseadas nesta expressão. Essas equações práticas, que incluem a fórmula de Bazin, de Ganguillet-Kutter, de Manning, de Hazen-Williams e a de Powell são interessantes e possuem certa importância as relações que podem ser estabelecidas com o coeficiente C da fórmula de Chezy, ao qual é usualmente expressa por:

$$V = C\sqrt{Rh.S_o} \quad (02)$$

onde: V - velocidade média do fluxo, $m.s^{-1}$;
 C - coeficiente de resistência de Chezy, adimensional;
 Rh - raio hidráulico, m e
 S_o - declividade, $m.m^{-1}$.

Se aplicarmos as equações do movimento uniforme e turbulento em canais abertos, especificamente a fórmula de Manning têm-se:

$$V = \frac{1}{n} Rh^{2/3} S_o^{1/2} \quad (03)$$

sabendo que:

$$Q = A.V \quad (04)$$

$$Rh = \frac{A}{Pm} \quad (05)$$

têm-se:

$$Q = \frac{A}{n} Rh^{2/3} So^{1/2} \quad (06)$$

onde:

- Q - vazão, em $m^3.s^{-1}$;
- n - coeficiente de rugosidade hidráulica, adimensional;
- Pm - perímetro molhado, em m e
- A - área da seção transversal, em m^2 .

Os parâmetros geométricos podem ser separados dos termos hidráulicos da eq. (06), onde o lado esquerdo da equação abaixo é o fator de seção para o fluxo uniforme:

$$A.Rh^{2/3} = \frac{Q.n}{So^{1/2}} \quad (07)$$

TROUT (1991), afirma que se os parâmetros geométricos podem ser expressos pelo fator de seção de Manning, eles podem ser quantificados para qualquer capacidade hidráulica requerida pelo lado direito da eq. (07).

Os parâmetros hidráulicos da resistência para o fluxo turbulento através de superfícies rugosas podem ser obtidos através de diversas formas (LENCASTRE, 1983 e CHOW, 1986), e podem ser interrelacionados pelas diversas fórmulas de resistência.

Em 1950 Powell citado por CHOW (1986) sugeriu uma fórmula logarítmica para o cálculo da rugosidade em canais artificiais, semelhantes as que foram estabelecidas para as tubulações por Nikuradase e Von Kármán. Esta equação como uma função implícita do coeficiente de Chezy, é dada por:

$$C = -23,19 \cdot \log \left(\frac{C}{4 \cdot Re} + \frac{\varepsilon}{Rh} \right) \quad (08)$$

onde: Re - número de Reynolds;
 ε - medida da altura da rugosidade em canais, em m.

Para canais rugosos, o fluxo é geralmente turbulento e o número de Reynolds se torna muito grande quando comparado com C, então a eq. (08) fica aproximada por:

$$C = 23,19 \cdot \log \left(\frac{Rh}{\varepsilon} \right) \quad (09)$$

De acordo com CHOW (1986), comparando a fórmula de Chezy com a equação de Manning é verificado que:

$$C = \frac{1}{n} Rh^{1/6} \quad (10)$$

Esta equação apresenta um importante relação entre o coeficiente de Chezy (C) e o "n" de Manning, sendo que estes podem ser interrelacionados.

Relacionando as equações (09) de Powell e (10) de Manning, podemos calcular "n" a partir da altura da rugosidade ϵ , ou seja eliminando C das referidas equações, têm-se:

$$n = \frac{Rh^{1/6}}{23,19 \cdot \log \frac{Rh}{\epsilon}} \quad (11)$$

ou a altura da rugosidade ϵ dada por:

$$\epsilon = 10^{\log Rh - \left(Rh^{1/6} / 23,19 \cdot n \right)} \quad (12)$$

2.2.5. Geometria da seção transversal de escoamento

A geometria do fluxo é necessária para separar o volume de água da superfície do solo, do volume infiltrado no mesmo durante a fase de avanço, com a finalidade de se calcular os parâmetros de infiltração. Para isto deve-se descrever matematicamente a forma da seção transversal de escoamento e a área do fluxo, onde provavelmente a mais usada equação de fluxo uniforme para suprir esta relação seja a fórmula de Manning. A geometria do fluxo na irrigação por sulcos é mais difícil de ser descrita do que nos métodos por faixas e inundação. A forma do sulco muda continuamente devido a erosão e deposição de partículas de solo produzidas pela força da água, mas as formas típicas variam de triangular a trapezoidal, ficando posteriormente com a forma parabólica (WALKER, 1989).

Como foi observado por PEREIRA (1991), o escoamento de água ao longo dos sulcos altera as suas características geométricas, principalmente a profundidade máxima, devido ao assoreamento de parte dos taludes, fazendo com que os sulcos fiquem com uma forma aproximadamente parabólica.

Segundo ARÁUJO (1990), após a segunda e terceira irrigação, praticamente não ocorreu mudança nas características geométricas dos sulcos, nem mesmo na profundidade, que é a variável mais sensível às modificações.

Para se obter os parâmetros geométricos da seção transversal do sulco de acordo com WALKER (1989), é assumido que se pode escrever uma série de relações com potências simples, a partir de pares de valores da largura da base (B) em metros e da profundidade da lâmina de água no sulco (Y) em m, relacionando esta altura com a área da seção transversal (A) em m² e o perímetro molhado (Pm) em m, têm-se as seguintes relações:

$$B = c.Y^m \quad (13)$$

$$A = b_1.Y^{b_2} \quad (14)$$

em que:

$$b_1 = \frac{c}{m+1} \quad (15)$$

$$b_2 = m+1 \quad (16)$$

$$Pm = \rho Y^\gamma \quad (17)$$

Estes coeficientes e expoentes são empíricos e a maneira mais simples de analisar estes dados é através da seção transversal dos sulcos obtida com o auxílio de um perfilômetro e então dividir a altura Y em incrementos iguais e gráfica ou numericamente integrar a área e o perímetro molhado. Estes dados são relacionados utilizando regressão linear ou o método dos dois pontos proposto por ELLIOT & WALKER (1982).

O cálculo do perímetro molhado é mais rigoroso e executado por integração numérica da seguinte forma:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ [Y - Y(i-1)]^2 + [0,5 \cdot [Bi - B(i-1)]]^2 \right\}^{0,5} \quad (18)$$

A área do fluxo na entrada do sulco utilizando a equação de Manning para movimento uniforme pode ser determinada por meio da seguinte relação:

$$Ao = c1 \left\{ \frac{qo \cdot n}{60 \sqrt{So}} \right\}^{c2} \quad (19)$$

onde:

- Ao - área da seção transversal no início do sulco, m^2 ;
- qo - vazão de entrada, $m^3 \cdot min^{-1}$;
- n - coeficiente de rugosidade de Manning, adimensional;
- So - declividade da parcela, $m \cdot m^{-1}$;
- $c1$ e $c2$ - constantes geométricas do sulco, definidas por:

$$c2 = \frac{3b2}{5b2 - 2\gamma} \quad (20)$$

$$c1 = b1 \left\{ \frac{\rho^{0,67}}{b1^{1,67}} \right\}^{c2} \quad (21)$$

onde: $b1$, $b2$, ρ e γ são parâmetros de ajustamento.

Assumindo o movimento como uniforme, a lâmina no início do sulco (lâmina normal) Y_0 para um dado sulco é função da vazão de entrada, onde o perímetro molhado pode ser substituído pela largura da seção transversal de escoamento (YU & SINGH, 1990), sendo dada pela expressão baseada na equação de Manning:

$$Y_0 = \left\{ \frac{q_0}{S_0^{1/2}} \frac{(m+1)^{5/3}}{c} \right\}^{\frac{3}{(3m+5)}} \quad (22)$$

onde, c e m são parâmetros de ajustamento da função potência ($B = c.Y^m$).

TROUT (1991), em seus estudos de geometria dos sulcos, utilizando a equação de Manning para fluxo uniforme e uma relação de potência entre a área da seção transversal e o perímetro molhado, observou que um decréscimo de 75% na vazão ao longo dos sulcos, resulta em uma diminuição de 40% no perímetro molhado e de 29% na velocidade.

Em virtude da dificuldade em determinar a rugosidade nos sulcos, WILKE & SMERDON (1965) resolveram o problema da utilização da equação de Manning estabelecendo uma relação empírica entre a lâmina, vazão e declividade, para determinar o valor da área média superficial, desde que os sulcos possuam a forma aproximadamente parabólica.

2.2.6. A rugosidade superficial em sulcos

Sob as tradicionais práticas de cultivo, a rugosidade do sulco segundo TROUT (1992a), é criada primariamente pelos agregados do solo e pelas irregularidades na forma do sulco e uma vez que o tamanho, forma e arranjo dos aglomerados do solo podem ser alterados pelo movimento da água, o fluxo pode ter sua rugosidade mudada. Apesar desta relação ser reconhecida, ela não é muito bem quantificada e a rugosidade superficial nos sulcos é geralmente assumida como espacialmente uniforme e temporariamente constante para uma dada irrigação.

De acordo com BROWN et al. (1988), a forma e a rugosidade do sulco mudam devido à ação das partículas do solo, onde pequenos torrões quebram, se movem e são redepositados pelo movimento da água. Os agregados de solo seco se desfazem a montante e são rapidamente molhados pelo avanço da água no sulco devido a força de cisalhamento e pelo próprio fluxo da água. Os pequenos aglomerados resultantes e as partículas de lama rolam e saltam ao longo do fundo do sulco onde então enchem as rachaduras ou cavidades existentes no perímetro do mesmo, racham ou deixam para trás torrões maiores. Essas pequenas partículas são agarradas ao lugar pela ação da gravidade e da tensão da água, grudando o solo no perímetro, resultando numa suavização da forma do sulco.

Diversas fórmulas semi-empíricas para fluxo uniforme têm sido desenvolvidas para canais abertos, onde nestes a rugosidade não é muito bem definida como no caso do escoamento de água nos encanamentos. A maior necessidade está voltada para a avaliação da rugosidade para o fluxo em canais abertos, sendo que os coeficientes necessitam ser avaliados em termos de

rugosidade relativa e das características de escoamento de uma maneira similar a análise do fator de fricção nos tubos (HANSEN, 1958).

Para a aplicação da equação de Manning o problema reside segundo GRASSI (1988), na seleção do coeficiente de rugosidade "n", pois os valores disponíveis para canais de terra não são aplicáveis, dado as características específicas de rugosidade dos sulcos.

CHOW (1986), esclarece que normalmente é utilizado um único valor do coeficiente de rugosidade "n" de Manning para todas as ocasiões. Na realidade o valor de "n" é altamente variável e depende de uma série de fatores, tais como: a rugosidade da superfície representada pela forma e tamanho do material de formação do perímetro molhado que produzem o efeito retardatório no fluxo, a vegetação considerada como um tipo de superfície rugosa, irregularidades do canal, alinhamento no canal, sedimentação e erosão, obstruções, tamanho e forma do canal, vazão e altura do fluxo, mudanças sazonais que possam ocorrer, materiais em suspensão e aqueles que assentam no fundo do canal. Também a intervenção do homem quando através de capinas para eliminação de plantas daninhas, provoca uma modificação na seção transversal. Estas afirmações deixam prever que o coeficiente é muito complexo de se determinar, sendo que para selecionar um valor apropriado de "n" para várias condições de projeto se faz necessário um conhecimento básico destes fatores.

A rugosidade da superfície de acordo com TABUADA (1989), afeta tanto o avanço como o recesso em sulcos e é quantificada por um parâmetro empírico, o coeficiente de rugosidade para as fórmulas utilizadas no escoamento em canais com movimento uniforme. O valor deste coeficiente

varia ao longo do ciclo da irrigação, não sendo fácil a sua obtenção, uma vez que o próprio fluxo de água altera a rugosidade da superfície do solo.

STRELKOF & SOUZA (1984), observaram que o coeficiente de rugosidade de Manning desempenha um fator relevante para a determinação da altura de água superficial, sendo aparente que quanto maior o valor de "n", mais elevado o valor da altura do fluxo a montante.

A resistência para fluxo uniforme e turbulento em canais abertos segundo MICHAEL (1978), é frequentemente expresso em termos de resistência através das relações de Chezy ($V = C\sqrt{Rh.S_o}$), Darcy-Weisbach ($V = \sqrt{8g.Rh.S_o / f}$) e Manning ($V = 1 / n.Rh^{2/3}S_o^{1/2}$), sendo que estes coeficientes de resistência C , f e n podem ser interrelacionados.

Devido ao fato da rugosidade absoluta em canais de terra ser difícil de se medir, o fluxo uniforme em sulcos é mais comumente modelado através da equação de Manning, onde nesta, o fator de seção requerido para conduzir uma vazão num dado declive é proporcional ao coeficiente de rugosidade "n" (TROUT, 1992a).

HEERMANN et al. (1969), observaram que a resistência hidráulica na irrigação por sulcos é uma função do logaritmo da proporção da rugosidade absoluta para o raio hidráulico.

TROUT (1992b), estudando o efeito da velocidade do fluxo (V) na rugosidade dos sulcos, verificou que a rugosidade absoluta e o coeficiente de rugosidade "n" decrescem com o aumento da velocidade. O mesmo autor modelou "n" versus velocidade (V), determinado através de dados coletados durante testes em infiltrômetros com recirculação de água, obtendo uma função de potência, na forma ($n = 0,0086.V^{-0,65}$), observando através desta relação, que "n" aumenta de 0,021 para 0,034 quando a vazão diminui de

0,67 para 0,17 l/s na declividade de 0,6%, para o solo testado. Com a relação entre a rugosidade e a velocidade, os modelos podem melhor descrever o sistema físico.

CHOW (1986), afirma que o valor de "n" decresce com o aumento da vazão nos canais, salientando que quando a altura de água é pequena, as irregularidades do fundo do canal ficam mais expostas e estes efeitos ficam mais pronunciados. Também GRASSI (1988), estudando o efeito da velocidade no coeficiente de rugosidade "n", verificou que este aumenta quando a velocidade diminui.

FANGMEIR & STRELKOF (1979), estudando os efeitos do coeficiente de rugosidade no avanço, recessão, eficiência e uniformidade, encontraram curvas de avanço e recesso totalmente diferentes para cada valor de "n", mas o efeito na eficiência é surpreendentemente pequeno.

Os valores de "n" de Manning, variam desde 0,02 para solos irrigados previamente, para ao redor de 0,04 para solos em áreas recém preparadas, chegando até cerca de 0,15 para o crescimento denso de ervas daninhas ou culturas dentro dos sulcos ou faixas (ELLIOT & WALKER, 1982).

Diversos autores, como ELLIOT & WALKER(1982), WALKER & SKOGERBOE (1987) e WALKER (1989) utilizam em seus exemplos de cálculo da equação de infiltração pelo método do balanço, o valor de "n" igual a 0,04.

SCALOPPI (1983), SOUZA (1984) e LEVIEN & SOUZA(1987), utilizaram o valor de "n" igual a 0,022 em seus modelos de simulação, a partir de dados de sulcos de precisão.

GRASSI (1988), em suas experiências com sulcos, indica o valor de $n = 0,042$ para sulcos recém abertos e $n = 0,033$ para sulcos assentados depois da primeira irrigação.

2.3. Infiltração da água no solo

A fase de infiltração ou reposição inicia quando a frente de avanço atinge o final da parcela e termina no momento em que a lâmina de irrigação tenha sido infiltrada nesta extremidade, ocasionando assim o momento do corte no fornecimento da água.

A infiltração é o fator mais importante que afeta a irrigação por superfície segundo WALKER & SKOGERBOE (1987), controlando essencialmente no solo a quantidade de água que entra e o avanço de água sobre o mesmo. Em um solo originalmente seco a velocidade de infiltração possui um valor inicial muito alto, para logo decrescer rapidamente com o tempo, até que finalmente se alcança um valor quase constante, a velocidade de infiltração básica, que é um valor próximo da condutividade hidráulica de saturação do solo.

O bom desempenho da irrigação por sulcos está na dependência da duração da fase de reposição. Como a distribuição da água ao longo da parcela não é perfeita, pode ocorrer que ao final do tempo de infiltração existam áreas deficientes em água, o que reduz a eficiência de armazenamento. Esta etapa deve-se estender até que a qualidade da irrigação seja considerada satisfatória. É bom salientar que, enquanto a uniformidade de distribuição e a eficiência de armazenamento aumentam com o tempo de

duração da fase de reposição, a eficiência de aplicação vai se reduzindo, devido à verificação de escoamento superficial no final da parcela e a eventuais perdas por percolação profunda nos locais onde o tempo de infiltração excede o tempo necessário para infiltrar a lâmina requerida (SCALOPPI, 1986).

A infiltração pode ser definida de uma maneira geral de acordo com a concepção de TABUADA (1989), como sendo a invasão de um meio polifásico (o solo) por um fluido molhante (a água), sendo este processo acompanhado pelo deslocamento de um outro fluido não molhante (o ar).

Ainda segundo o mesmo autor, pelo fato de que a velocidade de avanço de água sobre o sulco ser maior que a velocidade de infiltração no solo, o escoamento no interior do solo, pode ser considerada como bidimensional, segundo o plano que contém a seção transversal do sulco. Para um dado solo, em cada seção do sulco a infiltração é tanto maior quanto maior for a condutividade hidráulica do solo. Por outro lado, a altura de água sobre o sulco vai variando no tempo e no espaço, alterando assim as condições de infiltração ao longo do mesmo.

A infiltração de acordo com LIBARDI (1984) é definida como a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera. O termo taxa de infiltração refere-se à quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo, sendo fato experimental que, durante o processo de infiltração, a referida taxa tende a diminuir com o tempo atingindo um valor final constante.

A infiltração é um processo complexo, dependente de inúmeras variáveis, relacionadas às características físicas e morfológicas do solo. Apresenta uma dependência especial da umidade inicial no perfil e da condição da superfície, que, por sua vez é afetada pela geometria da seção de

escoamento e pelo fluxo superficial que determinam a condição física e a grandeza da área de infiltração. O escoamento superficial está associado ao transporte e reorientação das partículas do solo, que modificam sua condição superficial e alteram as características de infiltração (REZENDE & SCALOPPI, 1985).

É normal a utilização de soluções simplificadoras (WALKER & SKOGERBOE, 1987), que permitem calcular o volume de água infiltrada em função do tempo, sem no entanto fornecerem qualquer informação a respeito da evolução da frente de umedecimento, ao longo do tempo, no interior do solo. Tais modelos usam parâmetros de caráter físico ou empírico, o que os tornam sensíveis às condições iniciais e aos limites relativos aos casos em estudo (TABUADA, 1989).

Diversos modelos matemáticos tem sido desenvolvidos para descrever a infiltração nos solos, principalmente a vertical. As equações de infiltração foram desenvolvidas empiricamente ou a partir de considerações físicas e aplicam-se somente a solos homogêneos. De acordo com LIBARDI (1984), WALKER & SKOGERBOE (1987) e TABUADA (1989) , as equações de infiltração podem ser classificadas em três categorias:

i) Soluções fundamentadas em relações gerais para escoamento em meio poroso. São as equações baseadas na solução da equação unidimensional de Darcy, conhecidas como equação de Richards. O uso desta equação para a avaliação da infiltração revela-se promissor por quantificar esse processo com resultados próximos da realidade, porem seu uso requer o conhecimento das relações da pressão efetiva com a umidade e com a condutividade hidráulica, cuja determinação é trabalhosa e demorada.

ii) Soluções simplificadas com base em parâmetros físicos, que se fundamentam na hipótese que o solo possa ser representado por um feixe de tubos capilares (Equação de Green & Ampt). Embora essas soluções forneçam resultados precisos, elas somente são aplicáveis à situações muito limitadas, ou seja, condição inicial de umidade uniforme no solo, raramente ou nunca verificado em culturas irrigadas e escoamento mono dimensional.

iii) Soluções simplificadas com base em parâmetros empíricos. São as equações baseadas no ajuste matemático de dados experimentais de água infiltrada em função do tempo.

Segundo WALKER & SKOGERBOE (1987), uma das primeiras equações simplificadas com base em parâmetros empíricos foi a equação de Kostiakov na forma potencial, sendo uma fórmula simples e de amplo uso que descreve muito bem a infiltração que ocorre em períodos de tempo curto e médio, ajustando-se razoavelmente bem para uma grande quantidade de solos. A maioria dos modelos matemáticos para simular a irrigação superficial utiliza esta equação para quantificar a infiltração.

A equação de Kostiakov pode ser expressa em termos de infiltração acumulada da seguinte forma:

$$I(t) = k \cdot t^a \quad (23)$$

onde:

$I(t)$ - lâmina de irrigação, em m;

t - tempo de infiltração, em min;

k e a - parâmetros empíricos de ajuste para os seguintes domínios ($k > 0$ e $0 \leq a < 1$).

A taxa de infiltração $i(t)$ é obtida através da derivação da equação (23) de infiltração acumulada em relação ao tempo, ou seja:

$$i(t) = \frac{dI}{dt} = a \cdot k \cdot t^{a-1} \quad (24)$$

Ficando a equação de velocidade de infiltração instantânea $i(t)$, da seguinte forma:

$$i(t) = k' \cdot t^{a'} \quad (25)$$

onde: $i(t)$ - velocidade de infiltração, em m. min⁻¹.

Analizando a equação(25) de infiltração instantânea, quando $t \rightarrow \infty$ (tempos longos), i tende para zero, o que é fisicamente incorreto, uma vez que quando $t \rightarrow \infty$, i deveria tender para um valor igual a condutividade hidráulica saturada do solo (k_s). Podemos no entanto calcular o tempo limite (T) quando isto acontece, substituindo i por k_s na eq. (25), onde é pressuposto que o valor de k_s seja conhecido (LIBARDI, 1984):

$$T \leq \left(\frac{k'}{k_s} \right)^{\frac{1}{a'}} \quad (26)$$

A equação empírica de Kostiaikov possui duas desvantagens de acordo com WALKER & SKOGERBOE (1987). Primeiro o fato de não poder ser ajustada para diferentes condições de campo, que possuem um grande efeito na infiltração, tal como o conteúdo inicial de umidade do solo. Segundo,

para tempos grandes de aplicação de água, a velocidade de infiltração tende para zero, o qual se sabe está incorreto. Para resolver estes problemas deve-se determinar a umidade do solo quando da realização do teste de campo, associando assim a equação às condições do ensaio. Para a correção deste último problema devemos acrescentar às equações (23) e (25) um termo constante, que corresponde a infiltração final a medida que o tempo aumenta, ficando as mesmas assim caracterizadas:

i) Em termos de infiltração acumulada $I(t)$:

$$I(t) = k \cdot t^a + f_0 \cdot t \quad (27)$$

onde: f_0 - infiltração básica, em $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, quando $t \rightarrow \infty$.

ii) Em termos de infiltração instantânea $i(t)$:

$$i(t) = k' \cdot t^{a'} + f_0 \quad (28)$$

Ainda segundo os mesmos autores, a introdução do terceiro termo na equação de Kostiakov, vai requerer uma constante empírica a mais que na fórmula original, sendo portanto mais difícil de calibrar com dados de campo e utilizar em modelos matemáticos de simulação.

A equação de Kostiakov pode ainda ser expressa em termos de área infiltrada e volume infiltrado, desde que a lâmina infiltrada acumulada seja multiplicado pelo perímetro molhado e pelo respectivo segmento de espaço (ELLIOT & WALKER, 1982).

FANGMEIR & RAMSEY (1978) em seus estudos com sulcos de precisão concluíram que a largura da base e o perímetro molhado podem ser

usados para caracterizar a vazão de entrada em sulcos e também mostraram que a taxa de infiltração foi correlacionada linearmente com o perímetro molhado.

STRELKOF & SOUZA (1984), verificaram que em contraste com as faixas, a altura de água em sulcos possui primordial influência na infiltração. Concluíram ainda que quando as constantes empíricas da equação de Kostiaikov são determinadas usando a largura da superfície livre ou o perímetro molhado como uma característica do comprimento transversal, o valor de "a" permanece mais ou menos constante, enquanto que o valor de "k" muda em proporção direta para o raio do perímetro molhado e para a largura da base. Também essas constantes possuem um pequeno efeito na variação da altura de água de montante, sendo que o principal efeito do parâmetro α é na forma da curva de infiltração acumulada e conseqüentemente na forma da curva de avanço.

A infiltração em sulcos é um exemplo de fluxo médio poroso bidimensional, onde ao contrário do caso unidimensional, as forças não agem colinearmente para todos os pontos ao longo do domínio do escoamento e assim o fluxo da infiltração não é necessariamente normal para a superfície de infiltração. Análises neste processo são complexas, também devido a outros fatores, tais como a evolução no tempo da altura do fluxo, o qual causa um gradiente no tempo de oportunidade de infiltração e no conteúdo de umidade ao longo do perímetro molhado; a redução do gradiente do potencial por causa da frente de molhamento de avanço nos sulcos adjacentes; a complicada geometria dos sulcos; a variabilidade nos parâmetros de solo e a dificuldade de se medir essas variáveis no campo. Devido ao processo descrito ser difícil, a infiltração em modelos de irrigação por sulcos tem sido normalmente avaliado usando fórmulas empíricas (BAUTISTA & WALLENDER, 1993).

No caso da irrigação por sulcos deve-se considerar a redução do perímetro molhado ou da área líquida de infiltração com a distância de avanço. SCHWANKL & WALLENDER (1988) usaram a equação modificada de Kostiakov com e sem efeitos do perímetro molhado em seu modelo de simulação zero-inércia, concluindo que quando o perímetro é assumido constante, pode resultar numa superestimação do tempo de avanço.

TROUT (1992b), estudando o efeito da velocidade e do perímetro molhado na infiltração, encontrou que ambos podem influenciar significativamente a distribuição de água e seus efeitos podem ser quantificados em uma faixa de solos e incluídos em modelos de previsão.

Para a determinação das características de infiltração é recomendado que se utilizem métodos que procurem reproduzir fielmente as condições que são observadas durante a irrigação normal, ou seja aqueles baseados na presença do fluxo superficial, que são soluções particulares da equação do balanço volumétrico, na qual o volume infiltrado é a única variável dependente. Os parâmetros da equação de Kostiakov são determinados através de avaliações sucessivas do volume de água infiltrado em função do tempo.

O procedimento baseado no balanço volumétrico para a determinação das constantes da equação de infiltração foi proposto inicialmente por CHRISTIANSEN et al. (1966) e posteriormente por FANGMEYER & RAMSEY (1978) utilizando sulcos de precisão.

REZENDE & SCALOPPI (1985) em seu trabalho com diferentes métodos baseados no avanço de água para o cálculo da equação de infiltração, observaram que apesar destes procedimentos apresentarem resultados muito aproximados do volume infiltrado, os valores dos parâmetros da equação foram diferentes para as diversas metodologias testadas. Este fato

vêm reforçar a hipótese de que as características de infiltração de um solo para fins de dimensionamento do sistema de irrigação superficial, não podem ser baseadas apenas no expoente da equação de infiltração obtida, ou seja tanto o coeficiente como o próprio expoente caracterizam a infiltração de água no solo.

WALKER & SKOGERBOE (1987) utilizaram o modelo do balanço volumétrico para a determinação dos parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov modificada, utilizando dados de avanço de água no sulco. A equação de balanço volumétrico pode ser descrita por:

$$q_0.t = ry.A_0.s + rz.k.t^a.s + \frac{f_0.t}{1+r} \quad (29)$$

onde:

- q_0 - vazão de entrada no sulco, $m^3 \cdot min^{-1}$;
- t - tempo transcorrido desde o início da irrigação, em min;
- ry - fator de forma de armazenamento superficial, que se define por uma constante entre 0,7 e 0,8;
- A_0 - área da seção transversal molhada do fluxo na entrada do sulco, em m^2 ;
- s - distância de avanço no tempo t , min;
- k - parâmetro de ajuste da equação de Kostiakov, $m^3 \cdot min^{-a} \cdot m^{-1}$;
- a - expoente do tempo na equação de infiltração da forma Kostiakov, adimensional;
- f_0 - Velocidade de infiltração básica, $m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$;
- r - expoente do tempo na equação de avanço, adimensional;
- rz - fator de forma subsuperficial, dado pela seguinte expressão simplificada proposta em 1959 por Kiefer, citado por WALKER & SKOGERBOE (1987):

$$rz = \frac{\alpha + r(1 - \alpha) + 1}{(1 + \alpha)(1 + r)} \quad (30)$$

O primeiro termo da eq. (29) representa o volume total de água aplicado no sulco, o segundo termo representa o volume de água armazenada na superfície do solo e terceiro e quarto representam o volume de água infiltrado ao longo da distância de avanço.

WALKER (1989), afirma que na maioria dos casos uma simples relação potencial pode ser utilizada para relacionar a largura da superfície livre (B), área da seção transversal (A) e o perímetro molhado (Pm), como uma função da altura do fluxo (Y). Estas relações de potência podem ser obtidas através das eq. (13), (14) e (17).

Essas equações na forma de potência podem ser combinadas na fórmula de Manning onde foram separados os fatores de seção e hidráulico e calculado a área da seção transversal no início do sulco, através da eq. (19).

ELLIOT & WALKER (1982), propuseram um método dos "dois pontos" para avaliar os parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov, onde após a definição da relação área-vazão, calcula-se a velocidade de infiltração básica através do método de entrada e saída na qual se usa um sulco completo e após um longo tempo de irrigação, temos:

$$fo = \frac{qo - qs}{L} \quad (31)$$

onde:

- fo - infiltração básica, $m^3 \cdot m^{-1} \cdot min^{-1}$;
- qs - vazão de saída, $m^3 \cdot min^{-1}$;
- L - comprimento do sulco, m.

Logo a equação de balanço (29) se escreve para dois pontos de avanço medidos, para definir os parâmetros da equação de avanço. Esses dois pontos comuns são a metade ($L/2$) e o comprimento total da parcela (L), com os respectivos tempos ($T_{0,5L}$) e (TL). O expoente " r " do avanço pode ser determinado através de regressão ou por meio da seguinte expressão:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{L}{L/2}\right)}{\ln\left(\frac{TL}{T_{0,5L}}\right)} \quad (32)$$

Para a metade do comprimento do sulco ($L/2$), têm-se:

$$q_{0,5L} = \frac{r y \cdot A_o \cdot L}{2} + r z \cdot \frac{k(T_{0,5L})^a \cdot L}{2} + \frac{f_o(T_{0,5L}) \cdot L}{2(1+r)} \quad (33)$$

e para o comprimento total do sulco (L):

$$q_{0,TL} = r y \cdot A_o \cdot L + r z \cdot \frac{k(TL)^a \cdot L}{1+r} + \frac{f_o(TL) \cdot L}{1+r} \quad (34)$$

onde:

- $T_{0,5L}$ - tempo de avanço na metade da parcela, min;
- TL - tempo de avanço no final da parcela, min;
- L - comprimento total da parcela, m.

As incógnitas das eq. (33) e (34) são os parâmetros k e a . Resolvendo estas equações simultaneamente e utilizando transformação logarítmica, têm-se:

$$a = \frac{\ln(VL / VO,5L)}{\ln(TL / TO,5L)} \quad (35)$$

em que:

$$VL = \frac{qo.TL}{T} - ry.Ao - \frac{fo.TL}{1+r} \quad (36)$$

$$VO,5L = \frac{qo.TO,5L}{L/2} - ry.Ao - \frac{fo.TO,5L}{1+r} \quad (37)$$

O parâmetro k é calculado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{VL}{rz.TL^a} \quad (38)$$

onde o valor de rz é calculado através da eq. (30).

A maior dificuldade deste procedimento baseado no balanço de volume, se reside na estimativa dos fatores de forma superficial (ry) e de infiltração (rz) que são empíricos, principalmente o fator superficial que é assumido arbitrariamente como tendo um valor entre 0,7 e 0,8, geralmente usando 0,77, o que não é correto (SCALOPPI, 1986).

2.4. Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos para simulação constituem recursos importantes e eficientes para racionalizar o dimensionamento, operação e manejo da irrigação por sulcos, visando a obtenção de níveis satisfatórios de eficiência e uniformidade de distribuição de água. A análise dos modelos é baseada na solução das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, as quais governam o fluxo de água em canais sob regime não permanente e variado sobre um meio poroso.

De acordo com ELLIOT et al. (1982), os projetos dos sistemas de irrigação superficial podem ser significativamente incrementados pela simulação matemática do comportamento hidráulico de cada fase do processo, sem requerer os ensaios de campo, que são onerosos, trabalhosos e demorados.

Diversos modelos matemáticos estão atualmente disponíveis para auxiliar o dimensionamento dos sistemas de irrigação por superfície. Estes modelos com diferentes graus de complexidade e precisão, necessitam de alguns parâmetros representativos de entrada para o seu processamento, como a equação de infiltração, a geometria da seção transversal do fluxo superficial, a vazão a ser derivada, o comprimento da parcela, a declividade do campo, o tempo de aplicação da água, o coeficiente de rugosidade hidráulica superficial e o tempo desejado no processamento. Como resultados, o modelo simula o avanço e o recesso de água na superfície, a quantidade de água infiltrada na extensão da parcela e uma completa avaliação da irrigação (SCALOPPI, 1986).

As variáveis independentes, vazão de entrada, declividade, rugosidade superficial, constantes de infiltração e o tempo de corte na irrigação,

são os parâmetros básicos de alimentação para cada modelo. A partir destes parâmetros de entrada, o modelo pode prever as variáveis dependentes, incluindo o avanço, recessão, infiltração, escoamento superficial, percolação, eficiência e uniformidade, ou seja, através de um modelo de simulação, cada variável independente pode ser modificada sem mudar as outras e os efeitos sobre a irrigação superficial estudada. Na prática, devido a vazão de entrada e a declividade de fundo do sulco serem relativamente fáceis de medir, a principal fonte de erros de alimentação dos modelos ficam por conta da rugosidade e das características de infiltração (BASSET et al., 1983).

A validade de um modelo proposto para representar situações reais, segundo SCALOPPI (1983), depende acentuadamente da precisão dos dados requeridos para o seu processamento, onde principalmente, os parâmetros de uma equação representativa do processo de infiltração desempenha um papel relevante nos resultados obtidos pelo modelo.

A importância de uma equação de infiltração representativa para a avaliação de modelos de simulação é tão relevante, que SOUZA (1981) utilizou uma versão do modelo zero-inércia para descrever a fase de avanço, com o objetivo de determinar os parâmetros de infiltração a ser utilizado em seu modelo hidrodinâmico.

Os modelos utilizados para simulação dos métodos de irrigação superficial, podem se formular com base em uma aproximação completa, quando a fase de avanço de água sobre o solo é simulada através das equações completas de Saint-Venant e a quantificação da infiltração, feita pela equação de Richards. Qualquer outra situação é considerada uma aproximação simplificada, visto que alguma ou algumas das equações que o integram foram

simplificadas, quer a equação de infiltração, quer as equações de Saint-Venant (TABUADA, 1989).

A despeito das dificuldades em se relacionar matematicamente a função de infiltração do solo com a geometria dos sulcos, diversos modelos tem sido propostos para estimar as fases de avanço e recesso de água na irrigação por sulcos. Cada modelo é baseado em hipóteses simplificadoras que, apesar de não serem rigorosamente corretas para as condições existentes, muitas vezes constituem um recurso valioso para facilitar, ou mesmo possibilitar a solução deste complexo problema (SCALOPPI, 1983).

Ainda segundo o mesmo autor, uma das aplicações mais importantes dos modelos, refere-se a sua utilização na forma adimensional, que possui a finalidade de reduzir o número de variáveis envolvidas no fenômeno em consideração e com isso, através do uso de gráficos, resumir todo o problema de dimensionamento de sistemas de irrigação superficial, feitos em função dos valores normalmente assumidos pelas variáveis na grande prática da irrigação.

BASSET et al. (1983), esclarece que todos os modelos matemáticos desenvolvidos para simulação da irrigação superficial, utilizam a equação do balanço do volume ou a equação da continuidade e diferem um do outro, em razão da escolha da equação de movimento utilizada.

De acordo com diversos autores, como BASSET et al. (1983), SCALOPPI (1983), SOUZA (1983) e TABUADA (1989), todos os enfoques que empregam o princípio da mecânica dos fluidos na solução do problema de avanço na irrigação superficial, situam-se dentro de duas categorias principais:

i) Enfoque hidrodinâmico, que é baseado na solução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, conhecidas como equações de Saint-Venant.

ii) Enfoque do balanço volumétrico, que é baseado no princípio da conservação da massa, junto com certas hipótese relativas à lâmina média do fluxo superficial, onde a altura para pontos chaves na superfície do fluxo é considerada normal.

Considerando estas duas aproximações gerais e mais uma terceira que apresenta a hipótese de que a aceleração é desprezível no enfoque hidrodinâmico, os modelos matemáticos podem ser classificados em quatro categorias, por ordem decrescente de complexidade: modelos hidrodinâmicos, modelos zero-inércia, modelos de onda cinemática e modelos de balanço de volume. Os modelos em sua maior categoria podem ainda ser subdivididos de acordo com a técnica de solução usada, diferencial ou forma integral, se as equações são ou não lineares, se primeira ou segunda ordem de precisão são encontradas.

SCALOPPI (1983), desenvolveu teórica e computacionalmente modelos matemáticos para a simulação da irrigação superficial, através de sulcos ou faixas de infiltração, utilizando o modelo zero-inércia e diversos modelos baseados na equação do balanço de volume. O trabalho incluiu ainda, uma avaliação de desempenho, usando dados obtidos em campos experimental de precisão e uma demonstração do potencial de utilização dos modelos propostos. O autor concluiu que os modelos constituem recursos valiosos e eficientes para racionalizar o dimensionamento, operação e manejo de sistemas de irrigação por superfície, visando conseguir níveis satisfatórios de eficiência e uniformidade de distribuição de água.

YU & SINGH (1990), afirmam que devido a complexidade da irrigação por sulcos duas simplificações são constantemente feitas nos modelos de simulação: i) o emprego da equação de Kostiakov para calcular o volume infiltrado e ii) em ordem de se representar a variedade de diferentes formas da seção transversal dos sulcos, a maioria dos pesquisadores têm considerado a área ou certos termos relacionados com a geometria da seção transversal de escoamento em termos de uma função de potência.

TABUADA (1989), analisando diversos modelos, chegou a conclusão de que o desenvolvimento dos mesmos incide sobretudo, com grande influência na componente de escoamento superficial, sendo a componente no meio poroso (infiltração) traduzida por fórmulas empíricas ou semi-empíricas, cujos parâmetros são obtidos através de ensaios de campo antes das irrigações, que em termos de previsão ao longo do ciclo da irrigação são certamente frágeis.

2.4.1. Modelo hidrodinâmico

Os modelos hidrodinâmicos baseiam-se na resolução por via numérica das equações de Saint-Venant, completas ou simplificadas, sendo que quando se trata da simulação da irrigação superficial, temos que considerar também o tipo da equação utilizada para a quantificação da infiltração.

Os modelos hidrodinâmicos segundo TABUADA (1989), podem ainda ser subdivididos em duas categorias, de acordo com as simplificações feitas, em: i) modelo hidrodinâmico completo ou determinístico, que é o que considera o maior número de informações físicas do processo a

simular, sendo a infiltração quantificada pela equação de Richards que, constitui um dos termos da equação da continuidade e ii) modelo hidrodinâmico de aproximação simplificada, que quantifica a infiltração por uma das equações simplificadas como a de Kostiakov.

As equações diferenciais parciais de Saint-Venant são classificadas como não lineares, do tipo hiperbólico e relacionam a altura da lâmina de água na superfície com a velocidade média do fluxo em um canal aberto, sendo deduzidas por HENDERSON (1966) e CHOW (1986). Aplicando o princípio da conservação da massa e o teorema de Euler ou da quantidade de movimento, as equações de Saint-Venant serão representadas pelas seguintes expressões:

i) Equação da continuidade

$$\frac{\partial Q}{\partial S} + \frac{\partial A}{\partial T} + \frac{\partial Az}{\partial T} = 0 \quad (39)$$

ii) Equação da quantidade de movimento

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{2.V}{gA} + (1 - F^2) \frac{\partial Y}{\partial S} = S_o - S_f + DI \quad (40)$$

sendo que:

$$S_f = \frac{V^2}{C^2 R_h} \quad (41)$$

$$DI = \frac{V \left(\partial Az / \partial T \right)}{2 \cdot gA} \quad (42)$$

$$F = \frac{V}{(gA/B)^{1/2}} \quad (43)$$

Desenvolvendo e simplificando a eq. (40), têm-se a expressão final da equação da quantidade de movimento para aplicação em irrigação superficial:

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{Q^2}{gA} \right) + \frac{\partial P}{\partial S} = A.S_o - A.S_f - \frac{V(\partial A_z / \partial T)}{2g} \quad (44)$$

Nas equações (39), (40), (41), (42), (43) e (44), A representa a área da seção transversal de escoamento superficial, V - velocidade média do fluxo, Q - vazão, S - distância ao longo do canal, B - largura da superfície livre, A_z - área da seção transversal infiltrada, g - aceleração da gravidade, S_o - gradiente de declive do canal, S_f - gradiente de declive da resistência hidráulica dado pela eq. (41), C - coeficiente de Chezy, R_h - raio hidráulico, DI - efeito dinâmico da infiltração, aqui considerada um fluxo lateral saindo do canal, conforme eq. (42), P - força de pressão e F - número de Froude, dado pela eq. (43).

SCALOPPI (1983), observa que as equações de Saint-Venant, nas quais as variáveis independentes são a velocidade média e a lâmina de água no canal, e as variáveis dependentes são a distância ao longo do mesmo e o tempo, não podem ser resolvidas diretamente. Soluções aproximadas podem ser obtidos por via numérica, através de três técnicas: método das características (STRELKOF, 1970); integração em células oblíquas e integração

em células retangulares. O principal inconveniente da utilização dos métodos numéricos era o custo operacional e de memória do computador para atender os limites da convergência especificada para um grau de precisão desejado, onde uma alternativa mais simples e menos onerosa, mas ainda com suficiente precisão, consiste na linearização das equações da continuidade e de movimento.

A solução para o modelo hidrodinâmico consiste em criar, em cada intervalo de tempo durante a fase de avanço, de uma célula ou volume de controle variável, assim como determinar a vazão e área, ou a altura de água em cada seção da célula de controle, aplicando aos limites, esquerdo e direito, as equações da continuidade e da quantidade de movimento, do conjunto de células previamente obtidos. O tamanho do passo de tempo (Δt) é adotado de acordo com a precisão desejada no modelo (WALKER & SKOGERBOE, 1987).

A aproximação hidrodinâmica é segundo SOUZA (1981), a mais sofisticada técnica de solução numérica para as equações de Saint-Venant, onde os modelos apresentam uma boa concordância entre os dados observados em campo e os simulados. Podem ainda serem usados para estabelecer um padrão com o qual os modelos mais simples podem ser comparados, mas no entanto requer uma complicada programação, grande armazenamento de dados e grande tempo de processamento.

Os modelos hidrodinâmicos completos para a simulação dos sistemas de irrigação superficial, foram primeiramente utilizados na irrigação por faixas, por serem mais simples de simular que o método por sulcos , entre outros por KINCAID et al. (1972), BASSET & FITZSIMMONS (1976),

SAKKAS & STRELKOF (1974), KATOPODES & STRELKOF (1977), STRELKOF (1977) e FONKEN et al. (1980).

KINCAID et al. (1972), apresentaram um modelo matemático para simular o avanço da água em faixas de infiltração, baseado na solução numérica das equações hidrodinâmicas, resolvendo as equações pelo método das características numa malha retangular, utilizando uma relação de potência para descrever a infiltração e o coeficiente de rugosidade "n" de Manning para a resistência.

O primeiro modelo considerado completo, incluindo todas as fases da irrigação por faixas foi o proposto por Basset em 1973, citado por SCALOPPI (1983), onde as equações de Saint-Venant foram resolvidas pelo método das características, utilizando uma malha retangular. A equação de infiltração utilizada foi a de Kostiakov e a rugosidade superficial foi representada pelo "n" de Manning.

KATOPODES & STRELKOF (1977), propuseram um modelo hidrodinâmico completo para simular todas as fases da irrigação por faixas, também aplicando o método das características para resolver as equações.

A irrigação por sulcos começou a ser simulado através das equações de Saint-Venant, somente a partir de 1980, por SOUZA (1981) e ELLIOT et al. (1982). SOUZA (1981), propôs um modelo hidrodinâmico não linear, para sulcos com drenagem livre, baseado na solução das equações diferenciais parciais que governam o fluxo de água em regime não permanente. A declividade da linha de energia foi calculada pela equação de Manning e o volume infiltrado computado pela equação de Kostiakov, considerando ainda que o sulco possui a forma parabólica e definida por uma função tipo potência.

ELLIOT et al. (1982), apresentaram um modelo mais simplificado, o da inércia nula.

O objetivo do trabalho de TABUADA (1989), foi a aplicação do modelo hidrodinâmico completo ou determinístico para modelação bidimensional e tridimensional da irrigação por sulcos abertos ou fechados.

A maioria dos modelos hidrodinâmicos foram originalmente desenvolvidos para simular uma fase da irrigação superficial para uma série de conhecidos parâmetros de campo. Este requerimento produz a direta solução do problema da irrigação, sendo no entanto altamente dependente da qualidade dos dados de entrada que alimentam estes modelos, onde existem diversas dificuldades em quantificar estes parâmetros. As características de infiltração dos solos em particular, é o mais crucial dado de entrada requerido. O mais recente desenvolvimento para produzir essas extensivas medidas de infiltração para simular o avanço é resolver o chamado problema "inverso" da irrigação por superfície, onde o avanço é medido e usado para calcular a infiltração (AZEVEDO, 1992).

2.4.2. Modelo zero-Inércia

Os modelos zero-inércia são baseados na hipótese de que a aceleração é desprezível, não levando em conta, além da equação de Richards, os dois primeiros termos da equação dinâmica, que representam os efeitos da aceleração local e convectiva (SCALOPPI, 1983), ficando a equação geral da quantidade de movimento simplificada da seguinte forma:

$$\frac{\partial P}{\partial X} = AS_o - AS_f \quad (45)$$

STRELKOF & KATOPODES (1977), baseados no fato de que na irrigação superficial, a velocidade da água é muito reduzida, onde nesta condição o número de Froude é geralmente muito pequeno, podendo ser considerado nulo, propuseram um modelo para simular todas as fases na irrigação por faixas.

Estas simplificações na equação da quantidade de movimento fazem o modelo zero-inércia ficar mais rápido, sendo bom salientar que os termos inerciais desprezados terão uma influência no escoamento, tanto menor quanto menor for o declive da parcela a ser irrigada (TABUADA, 1989).

A hipótese da zero-inércia tem sido utilizada em grande quantidade de modelos para faixas (STRELKOF & KATOPODES, 1977; FANGMEIR & STRELKOF, 1979 e CLEMENS, 1979) e também aplicada a sulcos de infiltração por SOUZA (1981) e ELLIOT et al. (1982).

O trabalho desenvolvido por SOUZA (1981), apresenta dados comprovando a pequena contribuição dos termos inerciais no resultado final da simulação da irrigação por sulcos, quando comparou o modelo hidrodinâmico completo com o zero-inércia.

ELLIOT et al. (1982), consideraram apenas a fase de avanço água em sulcos, concluindo pelos resultados encontrados, que o modelo zero-inércia pode simular com sucesso esta fase.

2.4.3. Modelo de onda cinemática

O modelo de onda cinemática despreza, além dos termos de inércia, o terceiro termo da equação dinâmica, o gradiente de pressão da água, o que implica em dizer que o modelo não leva em consideração os efeitos de jusante. O modelo assume que o declive da linha de energia (S_f) é igual ao declive da superfície de escoamento (S_o) e também que a força da gravidade é preponderante em relação aos termos desprezados na equação dinâmica e que a relação entre a vazão e a área, ou altura de água, é única para dada seção, ou seja, o declive da linha de energia não afeta esta relação (TABUADA, 1989).

Este modelo é baseado na solução da equação da continuidade (eq. 39), na condição de que a vazão é uma função da área da seção transversal do fluxo superficial, onde esta relação normalmente é conseguida por uma equação de fluxo uniforme, sendo a fórmula de Manning a mais usada (AZEVEDO, 1992).

O modelo de onda cinemática foi primeiramente desenvolvido e aplicado em processos hidrológicos, sendo posteriormente modificado para a aplicação em faixas de infiltração com declive e drenagem livre (CHEN, 1970 e SMITH, 1972) e mais recentemente para sulcos, também com gradiente de declive e drenagem livre por WALKER & HUMPHERYS (1983) e AZEVEDO (1992).

Segundo SCALOPPI (1983), o modelo de onda cinemática pode ser usado com relativo sucesso para a simulação da irrigação superficial em parcelas com declividade e drenagem livre, onde o método de solução é simples e a execução rápida diminui o custo de processamento. No entanto,

surtem alguns problemas na previsão dos perfis superficiais e infiltrados próximo a frente de avanço.

WALKER & HUMPHERYS (1983), analisaram o modelo hidrodinâmico e de zero-inércia para diferentes condições de declividade (0,25 a 1,04 %), concluindo que a sofisticação destes modelos para esta faixa de condição é supérfluo para a irrigação por sulcos, podendo este método ser simulado pelo modelo de onda cinemática. No entanto, declives menores que 0,1 % quando simulados por este modelo, podem resultar em erros significantes.

2.4.4. Modelo do balanço volumétrico

A maior parte dos modelos matemáticos para simular a fase de avanço na irrigação superficial são baseados no princípio da conservação da massa ou do volume, juntamente com certas hipóteses relativas à lâmina média do fluxo superficial. Este modelo normalmente é utilizado para a previsão do avanço da água em sulcos ou faixas, recorrendo para o cálculo da infiltração uma das soluções simplificadas, como é o caso da equação de Kostiakov.

Esta aproximação estabelece que, a qualquer momento, o volume total de água fornecido a um sulco é igual a soma dos volumes superficial e infiltrado, onde a equação da conservação da massa assume a forma de:

$$Q.t = V_s + V_i = s(\overline{A_s} + \overline{A_i}) \quad (46)$$

Na eq. (46), Q é a vazão derivada à parcela, t o tempo de irrigação, V_s o volume armazenado na superfície do sulco, V_i o volume de água infiltrado, s a distância de avanço, $\overline{As}$ a área superficial média e $\overline{Ai}$ a área infiltrada média. As áreas médias são calculadas em função das áreas determinadas no ponto de derivação da água (A_o) e (A_{io}), multiplicadas por fatores de forma adequados, geralmente determinados empiricamente. Estes fatores são simplesmente relações entre os volumes atuais de água superficial ou infiltrado e aqueles volumes calculados, assumindo constante A_o ou A_{io} na distância de avanço considerada. Para o cálculo da área superficial é assumido que o fluxo seja uniforme (lâmina normal), para uma dada vazão, declividade, rugosidade e geometria da seção transversal de escoamento. A área infiltrada no início da parcela (A_{io}) é facilmente determinada, uma vez que o tempo de infiltração e o perímetro molhado da seção de escoamento são conhecidos (SCALOPPI, 1983).

De acordo com LEVIEN (1985) na ausência da equação dinâmica no modelo para quantificar a variação da área molhada ao longo do sulco, o volume superficial é aproximado pelo produto da área superficial média pela distância "s" da frente de avanço, onde esta área média molhada é determinada pelo produto da área superficial (A_o), correspondente a vazão de entrada (Q_o), considerada constante por um fator de forma (r_y) do perfil de água, ficando o volume armazenado na superfície do solo (V_s) na forma:

$$V_s = \overline{As} \cdot s = A_o \cdot r_y \cdot s \quad (47)$$

O volume infiltrado por unidade de comprimento (V_i), pode ser descrito como sendo a integral da área infiltrada ao longo do sulco:

$$V_i = \int_0^s A_i . ds \quad (48)$$

A exemplo do que foi feito para o perfil superficial, pode-se expressar o volume infiltrado em termos de área média infiltrada ($\overline{A_i}$), isto é:

$$V_i = \overline{A_i} . s = A_{io} . rz . s \quad (49)$$

Substituindo as equações (47) e (49) na equação (46), tem-se uma nova expressão para o balanço de volume em um sulco de infiltração:

$$Q . t = A_o . ry . s + A_{io} . rz . s \quad (50)$$

onde ry é o fator que expressa a forma do perfil superficial, isto é, uma relação entre o volume superficial e volume do retângulo ($A_o.s$) e rz é o fator de forma subsuperficial que relaciona o volume real de água infiltrada até a distância " s " com um volume infiltrado fictício. Em sulcos, a geometria da seção transversal ao fluxo contribui para a determinação de ry , dificultando a atribuição destas constantes empíricas a "priori".

A equação de balanço de volume define a relação existente entre três relações, ou seja, a função de infiltração, a função de avanço e as hipóteses sobre o perfil superficial, sendo que a forma funcional de duas destas relações podem ser assumidas, enquanto a solução da equação de balanço volumétrico conduz à terceira (HART et al., 1968)

Segundo LEVIEN & SOUZA (1987), a equação (50) pode ser reescrita para expressar o avanço, " s ", em função dos demais parâmetros:

$$s = \frac{Q.t}{A_o.r_y + A_{io}.r_z} \quad (51)$$

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

$$A_o = \frac{B.Y}{m+1} \quad (52)$$

em que B é dado pela eq. (13), $B = c.Y^m$.

Como a lâmina de água na entrada do sulco Y_o , corresponde à lâmina normal de fluxo uniforme, Y_n , para a vazão aplicada, podendo ser calculada através da eq. (22). A área infiltrada acumulada no início do sulco pode ser determinada como sendo:

$$A_{io} = Pm.I(t) \quad (53)$$

onde: Pm é o perímetro molhado e $I(t)$ a lâmina infiltrada acumulada expressa pela equação de Kostiakov simples, eq. (23). Na eq. (53), quando a lâmina de água Y for muito pequena em relação a largura da superfície livre (B), o perímetro molhado pode ser aproximado por B , isto é $Pm \cong B = c.Y^m$, o que facilita os cálculos. A distância de avanço é calculada em uma série de incrementos de espaço, que ocorre em constantes intervalos de tempo.

A maior dificuldade do procedimento do balanço de volume está na estimativa das áreas médias superficial e infiltrada, que podem ser aproximadas por aquelas determinadas no início do sulco e que são multiplicadas por fatores de forma empíricos, r_y e r_z . Um valor entre 0,7 e 0,8 é geralmente verificado para o fator de forma superficial r_y e r_z pode ser aproximado pela expressão:

$$rz = \frac{1}{a + 1} \quad (54)$$

onde "a" é o expoente da equação de infiltração acumulada de Kostiakov. Quanto mais representativos forem os valores atribuídos aos fatores de forma ry e rz, mais precisas devem ser as estimativas da distância de avanço em função do tempo (SCALOPPI, 1986).

BASSET et al. (1983), observa que o fator de forma superficial é um valor arbitrário e assumido para o perfil inteiro, sendo baseado em resultados de alguns experimentos de cálculos com os modelos mais sofisticados que levam em conta o perfil superficial. Ainda o valor de rz, calculado de acordo com a eq. (54), subestima o volume infiltrado, sendo isto compensado com algum grau de volume superficial superestimado devido a hipótese que a altura de montante sobe gradualmente e se aproxima da altura normal, dependendo do gradiente de declive.

Kiefer em 1959, citado por WALKER & SKOGERBOE (1987) propôs uma expressão simplificada (eq. 30) para o cálculo do fator de forma subsuperficial, sendo adotado por estes autores em seu procedimento de cálculo da equação de infiltração pelo balanço volumétrico.

CHRISTIANSEN et al. (1966), propuseram uma expressão simplificada bastante precisa para os valores dos expoentes "r" da equação de avanço e "a" da equação de infiltração, comumente observados na prática, ou seja:

$$rz = \frac{(a - 1) - r(a - 1) + 2}{(r + 1)} \quad (55)$$

De acordo com BASSET et al. (1983), os modelos de balanço de volume ou altura normal, na qual a altura para pontos chaves na superfície do fluxo é considerada normal, enquanto a forma do perfil é estabelecida arbitrariamente antes do início dos cálculos, possui a desvantagem dos fatores de forma serem constantes. No entanto este é mais fácil que os outros e desde que as hipóteses simplificadoras sejam bem feitas, o modelo é bom, podendo ser executado sem recursos digitais, sendo ideal para cálculos rápidos e brutos em sistemas superficiais com razoável declividade para aceitar as condições de lâmina normal.

A condição física mais importante requerida para as validades das hipóteses feitas com relação à superfície de água nos modelos de balanço volumétrico, segundo STRELKOF (1977), é uma declividade de fundo do sulco suficientemente grande de modo que a superfície de água assumida nunca se aproxime da horizontal.

WILKE & SMERDON (1965), com base nos resultados de algumas relações empíricas para estimativa do volume de água superficial, concluíram que o perfil de água superficial em sulcos pode ser representado por uma linha reta definida pela altura normal ($Y_o = Y_n$) no início do sulco e, $(0,7 \cdot Y_o)$ na frente de avanço, sendo a partir desta definido um fator de forma superficial igual a 0,77.

O fator de forma para estimativa do volume de água superficial pode ser calculado em função do expoente "r" da equação de avanço, de acordo com FOK & BISHOP, 1965), através da seguinte relação:

$$ry = \frac{1}{r + 1} \quad (56)$$

No modelo de Hall-Davis apresentado por DOURADO NETO (1987), o valor de r_y para a irrigação por sulcos pode ser calculado por:

$$r_y = \frac{1}{\beta \cdot (m+1) + 1} \quad (57)$$

onde m é o expoente da relação de potência ($B = c \cdot Y^m$) e utilizando valores disponíveis na prática através de determinações empíricas, $\beta = 0,25$.

HALL (1956), propôs um modelo recursivo para simulação do avanço de água na irrigação por faixas, sendo mais tarde adaptado por DAVIS (1961) para a irrigação por sulcos, com a infiltração calculada pela equação de Kostiakov. Em vez de assumir a lâmina constante, foi considerado que a lâmina no início da faixa é normal para uma dada vazão de entrada, e a forma do perfil é uma parábola de grau entre 0,5 e 1 com um eixo coincidente com a superfície do solo e que a ponta do perfil infiltrado fosse aproximada também por uma parábola orientada do mesmo modo (HART et al., 1968).

O modelo de Hall-Davis consiste essencialmente na determinação das quantidades de água superficial e infiltrada, a passos de tempo constantes, a partir de valores determinados no intervalo de tempo anterior, tratando-se portanto de um modelo recursivo. A cada intervalo de tempo, os perfis superficial e subsuperficial evoluem de modo a formar um sistema de ortogonais. Este modelo permite simular, com certa precisão a fase de avanço de água em faixas ou sulcos (DOURADO NETO, 1987).

Outra aplicação do princípio de conservação da massa para a previsão do avanço de água em sulcos foi apresentado por WILKE & SMERDON (1965), baseado na solução da forma integrada da equação de

balanço volumétrico utilizando a transformada de Laplace. Eles propuseram uma série de equações de regressão linear relacionando o avanço e o tempo para diferentes valores do expoente "a" da equação de Kostiakov.

FOK & BISHOP (1965), desenvolveram um modelo também baseado no balanço de volume para estimar o avanço de água em faixas e sulcos. Considerando que a função de avanço é uma potência da forma da equação ($s = p.t^r$), que a lâmina média de água é uma função da lâmina de entrada no sulco e do expoente da equação de avanço e que o expoente "r" da função de avanço pode ser determinado pelo simples conhecimento do expoente "a" da equação de Kostiakov.

Uma aplicação do princípio da conservação da massa , aplicado a todas as fases da irrigação por faixas, ou seja um modelo completo foi desenvolvido por STRELKOF (1977).

O modelo simplificado do balanço de volume apresentado por SCALOPPI (1983) , atribui fatores de forma constantes e empíricos para a estimativa dos volumes de água superficial e infiltrado (r_y e r_z), onde geralmente , r_y é assumido como possuindo um valor de 0,8 e r_z calculado pela eq. (54).

RAYEJ & WALLENDER (1987), desenvolveram um modelo para a simulação da irrigação por sulcos com declive e drenagem livre, baseado na solução acumulativa da equação de balanço de volume, com intervalos de espaço especificados a "priori" e também levando em conta a variabilidade espacial. Concluíram que este modelo pode ser usado para o dimensionamento da irrigação por sulcos, através de condições de solo uniforme e não uniforme, entretanto, uma das limitações pode ser a medida da infiltração em diversas locações para se ter acesso ao parâmetro inicial de variabilidade.

LEVIEN & SOUZA (1987), propuseram um modelo algébrico simplificado que simula o processo completo da irrigação por sulcos com drenagem livre, baseado na solução da equação da conservação da massa, assumindo que a lâmina de irrigação é a lâmina de fluxo uniforme, mas no entanto, utilizaram duas constantes arbitrárias para os fatores de forma superficial e subsuperficial em sua função de avanço.

SINGH & YU-CHENG (1988), desenvolveram um modelo de balanço volumétrico utilizando células de espaço, aplicado à irrigação por sulcos. O modelo é baseado na equação da continuidade, através de uma linearização, em que o volume de água armazenado num segmento do sulco é descrito pelo volume que entra menos o que sai através da infiltração. Uma vez que o segmento de espaço é conhecido, o intervalo de tempo pode ser conseguido através de um processo iterativo durante o avanço.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O modelo para a simulação da fase de avanço da água na irrigação por sulcos com gradiente de declive e drenagem livre aqui proposto, é baseado na associação da equação de Manning para movimento uniforme em canais abertos com a equação de infiltração modificada de Kostiakov. O sulco é hipoteticamente dividido em pequenos e constantes segmentos de espaço (Δs), onde neste é assumido o fluxo como uniforme e a rugosidade superficial variável. Em cada uma destas células de espaço são aplicadas as referidas equações e feito um balanço do volume de água que escoar pelo sulco, considerando a água infiltrada e a fornecida pelo segmento anterior, até que o final do sulco seja atingido. Por cálculo matemático, com o auxílio de um programa de computador desenvolvido em linguagem Pascal é obtido o tempo de avanço para alcançar cada distância. O modelo é utilizado para a previsão do tempo de avanço da água, em sulcos com drenagem livre e declividade, a partir da segunda irrigação.

Devido a complexidade da fase de avanço na irrigação por sulcos, sete hipóteses básicas foram feitas:

- 1- O movimento da água é uniforme dentro de cada célula de espaço, podendo então a velocidade ser calculada pela equação de Manning.

2- A vazão infiltrada pode ser calculada pela equação modificada de Kostiakov para calcular a vazão infiltrada de água.

3- A rugosidade superficial de Manning "n" é variável ao longo da extensão do sulco, ou seja, quanto menor o perímetro molhado, maior o coeficiente de rugosidade "n" de Manning.

4- A vazão de entrada é constante.

5- O sulco possui declive e forma da seção transversal uniformes.

6- A seção transversal do sulco é parabólica, podendo expressar os parâmetros geométricos por uma função tipo potência.

7. A umidade do solo e as características de infiltração são uniformes ao longo do sulco.

Quando a água é aplicada no início do sulco, uma porção infiltra no solo e o volume remanescente é armazenado na sua superfície do mesmo. No presente modelo, o tempo requerido para a água atingir uma certa distância em relação ao início da parcela não é conhecido, entretanto, para qualquer tempo não conhecido, o volume total aplicado é igual a soma dos volumes superficial e infiltrado (conservação da massa).

3.1. Descrição do modelo

O modelo para simular a fase de avanço da água irrigação em é baseado na equação da continuidade, com a hipótese básica de que o movimento é uniforme dentro de cada pequeno segmento de espaço, para que se

possa utilizar a equação de Manning e assim atender a necessária relação entre a vazão e a área da seção transversal de escoamento.

Os dados de entrada requeridos pelo modelo são: o comprimento do sulco (L), a vazão de entrada (q_0), a declividade da parcela (S_0), o coeficiente de rugosidade inicial de Manning (n_0), os parâmetros de infiltração do solo [constantes K' , a' e f_0 da equação (28)], os parâmetros geométricos de forma do sulco (pares de valores da largura da superfície (B) e altura do fluxo de água (Y)). Como resultado o modelo irá gerar o tempo de avanço que a água leva para atingir cada célula de espaço.

Salienta-se que os parâmetros de infiltração do solo são representativos para uma dada condição de umidade, devendo procurar realizar os testes de infiltração para a alimentação do modelo com a umidade na condição de iniciar uma nova irrigação.

Uma vez que o segmento de espaço (Δs) é conhecido, o intervalo de tempo é obtido por um processo de cálculos matemáticos, durante a fase de avanço, aumentado sucessivamente até atingir o final do sulco.

O modelo gera no início de cada nova célula de espaço, uma nova vazão, resultando com isto em uma nova área da seção transversal de escoamento do fluxo, um outro raio hidráulico e também de acordo com as suposições previstas um coeficiente de rugosidade " n " de Manning diferente. Devido a estas características de área e vazão variáveis, a cada trecho não se faz necessário a utilização dos fatores de forma superficial e subsuperficial.

Para a solução das equações, pode-se construir um plano s - t , no qual as distâncias estão representadas no eixo das abcissas, e os tempos correspondentes, no eixo das ordenadas. Pode-se então estabelecer uma seqüência de linhas de distâncias, separadas por incrementos de espaço

constantes (Δs), onde a cada célula de espaço, a solução é obtida em uma sequência de intervalos de tempo, T_j , onde j é o índice de tempo ($j = 1, 2, \dots, N$), que constituem os acréscimos de tempo do avanço da frente líquida em movimento, a cada distância S_i , onde i é o índice de espaço ($i = 1, 2, \dots, N$), de maneira que $N = i + 1$ e, no limite direito do plano $s-t$, $j = N$. Como pode ser observado na figura 1, as células de computação são oblíquas durante a fase de avanço (área hachureada da Figura 1). O resultado principal deste procedimento é o tempo que a água levou para percorrer a distância s .

Figura 1. Organização das células de computação durante a fase de avanço.

A solução do modelo consiste em criar uma célula de controle de tempo deformável em cada incremento de espaço durante a fase de avanço, assim como determinar a vazão, a área, o raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade "n" de Manning em cada célula de controle, aplicando aos limites, jusante e montante, as equações do balanço de volume do conjunto de células previamente obtidos.

Tomando para o comprimento s , os intervalos finitos Δs e os correspondentes tempos que a frente de avanço levou para atingir estas distâncias, a partir da segunda célula de espaço, inclusive, a vazão que entra no segmento i é igual a vazão que sai da célula $i-1$. Os tempos correspondentes aos segmentos de espaço são obtidos aplicando o princípio da conservação da massa, fazendo um balanço da água infiltrada na célula atual e a fornecida pelo segmento anterior.

O comprimento do sulco é dividido em N segmentos de comprimento Δs , o que vai necessitar logicamente, N intervalos de tempo Δt para a água atingir a extremidade final do sulco. Uma vez que a célula de espaço é conhecida, a célula de tempo pode ser obtida pela relação entre Δs e a velocidade durante a fase de avanço, aumentando acumulativamente este incremento de espaço até atingir a extensão total do sulco.

A rugosidade superficial muda ao longo do sulco, ou seja quanto menor o raio hidráulico maior o coeficiente de rugosidade "n". Para estabelecer uma rugosidade variável, foi feita uma relação entre o coeficiente de rugosidade C de Chezy das fórmulas de Powell e de Manning. Com um valor inicial de rugosidade "n" de Manning (n_0), devido ao fato de seu uso ser mais comum, determinou-se a altura da rugosidade (ϵ) e com este valor

assumido constante em todo o processo, a cada nova célula de espaço calculou-se um novo valor para o coeficiente "n" .

A forma da seção transversal de escoamento do sulco foi assumida como possuindo a forma parabólica, podendo a área e o perímetro molhado serem relacionados com a altura do fluxo de água por uma função de potência.

A vazão infiltrada no solo, por segmento, é relacionada ao tempo de infiltração através da equação modificada de Kostiakov na forma de volume , determinada através do método de balanço volumétrico e, posteriormente, esta equação é derivada em relação ao tempo para expressar em termos de taxa de infiltração e multiplicada pela célula de espaço correspondente.

O modelo para uso em computadores foi desenvolvido em linguagem Pascal, apresentando os resultados do avanço da água em sulcos em termos distância em função do tempo , apresentando ainda os volumes superficial, infiltrado e total de água .

3.2. Desenvolvimento teórico e computacional do modelo

Como o movimento da água é assumido uniforme dentro de cada célula de espaço, a equação de Manning (eq.06) pode ser utilizada para suprir a necessária relação entre a vazão e a área da seção transversal. Separando a seção hidráulica dos termos geométricos têm-se a eq. (07) e através da geometria da seção transversal do sulco, assumido a forma

parabólica, têm-se a relação área da seção transversal com a vazão para ser utilizada no modelo:

$$A[i] = c1 \left\{ \frac{q[i-1].n[i-1]}{\sqrt{So}} \right\}^{c2} \quad (58)$$

e o raio hidráulico é determinado pela seguinte expressão:

$$Rh[i] = \left\{ \frac{q[i-1].n[i-1]}{A[i].\sqrt{So}} \right\}^{3/2} \quad (59)$$

onde:

- [i] - é o indexador do segmento de espaço;
- q[i-1] - vazão da célula anterior, m³.s⁻¹;
- A[i] - área da seção transversal na célula atual, m²;
- Rh[i] - raio hidráulico na célula atual, m;
- n[i-1] - coeficiente de rugosidade "n" na célula anterior;
- So - declividade do sulco, em m.m⁻¹ e
- c1 e c2- parâmetros geométricos do sulco.

Os coeficiente geométricos c1 e c2 do sulco foram calculados através de regressão linear logarítmica utilizando pares de valores de largura da base e altura do fluxo, conforme metodologia já descrita anteriormente onde c2 e c1 são obtidos pelas equações (20) e (21), respectivamente. O desenvolvimento matemático que conduz a estas equações está apresentado com suficientes detalhes no APÊNDICE 1.

Para a obtenção do coeficiente de rugosidade "n" de Manning variável, tem-se que relacionar os coeficientes de rugosidade C de Chezy da fórmula de Manning e de Powell (CHOW, 1986), que são representadas

respectivamente pelas equações (09) e (10). Igualando as duas relações pode-se calcular o valor da altura da rugosidade (ε), dada em metros, a partir do raio hidráulico e do coeficiente de rugosidade " n_o " inicial:

$$\varepsilon = 10^{\log Rh - \frac{Rh^{1/6}}{23,19.n_o}} \quad (60)$$

A partir desta altura de rugosidade que passa a ser constante, calcularemos o coeficiente de rugosidade variável de Manning " $n[i]$ ", para cada célula de espaço e que está relacionado com o raio hidráulico através da seguinte relação:

$$n[i] = \frac{Rh[i]^{1/6}}{23.19 \cdot \log\left(\frac{Rh[i]}{\varepsilon}\right)} \quad (61)$$

O tempo instantâneo de avanço $T[i]$ é determinado através da seguinte expressão:

$$T[i] = \frac{\Delta x}{v[i]} \quad (62)$$

onde a velocidade média $v[i]$, é dada por:

$$v[i] = \frac{q[i-1]}{A[i]} \quad (63)$$

sabendo que: $q[i-1] = q[i]$

O tempo de avanço acumulado na célula atual é obtido por:

$$Tavc[i] = Tavc[i - 1] + T[i] \quad (64)$$

onde:

- $T[i]$ - tempo de avanço instantâneo na célula atual, em s;
- Δs - célula de espaço, em m;
- $V[i]$ - velocidade média, em m.s⁻¹ e
- $Tavc[i-1]$ - tempo de avanço acumulado na célula anterior, em s .

A vazão infiltrada no solo por segmento é relacionada ao tempo de oportunidade através da equação de infiltração instantânea de Kostiakov modificada, obtida por derivação da equação acumulada em termos de volume:

$$\frac{dV}{dT} = K' \cdot T^{a'} + fo \quad (65)$$

onde dV/dT é a vazão em m³.s⁻¹.m. Multiplicando esta equação pelo segmento de espaço (Δs), têm-se a vazão infiltrada por segmento:

$$qi[i] = \{ K' \cdot To[i]^{a'} + fo \} \Delta s \quad (66)$$

onde:

- $qi[i]$ - vazão infiltrada na célula atual, m³.s.⁻¹.segmento;
- K' , a' e fo - parâmetros de ajuste da equação de infiltração e
- $To[i]$ - tempo de oportunidade instantâneo para a infiltração, em s.

O tempo de oportunidade de infiltração é o tempo que a água ficou em contato com o solo e assumindo um tempo médio que a água permaneceu sobre o segmento de espaço atual (instantâneo), têm-se:

$$To[i] = T_{avc}[i] - T_{avc}[i-1] - \frac{T[i]}{2} \quad (67)$$

onde $T_{avc}[i-1]$ é o tempo de avanço acumulado na célula anterior, em segundos.

É bom salientar que têm-se um tempo de oportunidade para cada célula de espaço e conseqüentemente uma vazão infiltrada para cada segmento.

A vazão no início do próximo trecho, $q[i]$ é obtida através da seguinte relação:

$$q[i] = q_0 - q_{iac}[i] \quad (68)$$

em que:

$$q_{iac}[i] = q_{iac}[i-1] + q_i[i] \quad (69)$$

onde:

- q_0 - vazão de entrada constante, em $m^3.s^{-1}$ e
- $q_{iac}[i]$ - vazão infiltrada acumulada na célula de espaço, em $m^3.s^{-1}$.segmento.

Os volumes acumulado, superficial, infiltrado e total, são calculados através das seguintes expressões:

$$Vsa[i] = q[i].T_{avc}[i] \quad (70)$$

$$Via[i] = qiac[i].Tavc[i] \quad (71)$$

$$VTa[i] = qo.Tavc[i] \quad (72)$$

$$VTa[i] = Vsa[i] + Via[i] \quad (73)$$

onde:

- $Vsa[i]$ - volume superficial acumulado, em m^3 ;
- $Via[i]$ - volume infiltrado acumulado, em m^3 e
- $VTa[i]$ - volume total acumulado, em m^3 .

3.3. Seqüência dos cálculos

O modelo desenvolvido possui duas fases distintas de cálculo: a previsão do tempo de avanço na primeira célula de espaço e os posteriores tempos a partir da segunda célula em diante.

3.3.1. Solução para a primeira célula de espaço

Com os dados de entrada do modelo, é calculado inicialmente os parâmetros geométricos do sulco $c1$ e $c2$. Em seguida é determinada a área da seção transversal no início do sulco (Ao) e também o raio hidráulico inicial (Rho) através das equações (58) e (59), na qual $n[i-1]$ é igual ao coeficiente de rugosidade inicial de Manning "no".

Com os valores de Ao , Rho e o coeficiente de rugosidade "no", é calculado a altura da rugosidade (ϵ), com o uso da eq. (60). Este valor

de ϵ será determinado somente na primeira célula, sendo constante durante todo o processo computacional.

Através da vazão de entrada (q_0) e da área da seção transversal no início do sulco (A_0), calculamos a velocidade pela eq. (63) e conseqüentemente o tempo de avanço que a água levou para atingir a extensão da célula inicial, pela relação contida na eq. (62).

Com o valor do tempo de avanço, calculamos o tempo de oportunidade de infiltração (T_0) na célula inicial pela relação expressa pela eq.(67).

Com este tempo de oportunidade T_0 é determinado a vazão infiltrada no trecho 1 através da equação modificada de Kostiaikov, multiplicada pela célula de espaço (eq. 66).

A vazão no início do próximo trecho $q[i]$, é obtida subtraindo da vazão de entrada constante (q_0) a vazão infiltrada acumulada (q_{iac}), como mostrado nas eq. (68) e (69).

Finalmente são calculados os volumes acumulados superficial, infiltrado e total, através das equações (70), (71) e (72), respectivamente.

3.3.2. Solução para a segunda célula de espaço

Com o valor da vazão no início do próximo trecho ($q[i]$), que é igual a vazão da célula anterior ($q[i-1]$), do coeficiente de rugosidade de Manning da célula anterior $n[i-1]$, calcula-se a área e o raio hidráulico para segunda célula, por meio das eq. (58) e (59), respectivamente.

Com os resultados de altura da rugosidade (ϵ) determinada na célula 1 e o raio hidráulico da célula 2, é calculado um novo valor para o coeficiente de rugosidade de Manning, através da eq. (61).

Analogamente a célula inicial, calcula-se o tempo instantâneo na célula 2. Acumulando-o com o tempo na célula 1 têm-se o tempo de avanço para a água atingir o segundo segmento de espaço (eq. 64).

O tempo de oportunidade instantâneo de infiltração na segunda célula é calculado separadamente, ou seja, seria o tempo em que a água permaneceu em contato com o solo no segmento 1 e 2. Na primeira célula tem-se um maior tempo de permanência da água sobre o solo e logicamente uma menor vazão infiltrada. Os tempos de oportunidades para a célula 1 ($To[1]$) e para o segmento 2 ($To[2]$) são calculados pela eq.(67).

A vazão infiltrada no segmento 2 é também calculada separadamente para cada trecho, por meio dos dois diferentes tempos de oportunidade, acumulando posteriormente para encontrar a vazão infiltrada acumulada (q_{iac}) na célula, através da eq. (69).

A vazão no início do próximo trecho, bem como os volumes acumulados superficial, infiltrado e total são determinados de forma análoga ao que foi feito na primeira célula de espaço.

Os cálculos continuam igualmente e sucessivamente em todas células de espaço, até que toda vazão seja infiltrada ou que o comprimento do sulco seja alcançado.

Salienta-se que quanto menor for a célula de espaço (Δs), mais preciso serão os resultados do modelo e mais demorado os cálculos computacionais.

Para uma melhor compreensão da metodologia de cálculos do modelo, um exemplo completo, passo a passo, com dados de entrada é apresentado com detalhes no APÊNDICE 2.

3.4. Processo físico do modelo

3.4.1. Organização para linguagem de computador

O modelo desenvolvido neste estudo denominado SAVIS (simulação do avanço na irrigação por sulcos), foi escrito em linguagem Pascal, por ser esta bastante poderosa e também permitir a detecção imediata de erros, o que facilita a programação.

A figura 2 apresenta o fluxograma básico do modelo, onde o mesmo prevê duas interrupções: primeiro, quando a vazão no início do próximo trecho for igual ou menor que zero ($q[i] \leq 0$) ou segundo, quando o comprimento total do sulco for alcançado ($i.\Delta s > L$), apresentando neste momento os resultados da simulação, ou seja o tempo de avanço para cada distância considerada.

O programa SAVIS conta com dois indexadores distintos (i) e (j), sendo (i) o contador geral para o modelo e (j) um indexador especial para o procedimento vazão infiltrada, onde cada uma destas vazões são calculadas separadamente em cada célula de espaço e posteriormente acumuladas no segmento correspondente.

Para facilitar a apresentação dos resultados em trechos ou estações de cinco em cinco metros, o modelo trabalha com a fração cinco,

Figura 2. Fluxograma básico do modelo

sendo portanto necessário que a célula de espaço (Δs) seja um múltiplo desta fração.

Uma listagem completa do programa do modelo é apresentado no APÊNDICE 3.

3.4.2. Dados de entrada

O modelo SAVIS requer os seguintes dados de entrada:

1. Pares de valores da largura da superfície livre dos sulcos (B), em m e da altura do fluxo (Y) em m, determinados a partir da seção transversal média. Esta seção foi obtida através do perfil feito com a ajuda de um perfilômetro instalado no início, meio e final do sulco, posteriormente graficando e dividindo esta seção típica em intervalos constantes de altura da lâmina. Estes dados irão gerar os coeficientes de forma dos sulcos, c_1 e c_2 e conseqüentemente a área da seção transversal ;

2. Vazão de entrada (q_0) em $m^3.s^{-1}$;

3. Coeficiente de rugosidade inicial de Manning (n_0), estipulado de acordo com a experiência do projetista e consulta a literatura específica sobre o assunto;

4. Declividade da parcela (S_0), em $m.m^{-1}$;

5. Parâmetros de infiltração do solo, ou as constantes K' , a' e f_0 da equação modificada de Kostiakov em termos de vazão infiltrada;

6. Comprimento do sulco (L), em m e

7. Célula de espaço (Δs) em m, onde o tamanho do segmento de espaço depende da precisão que se quer no modelo, devendo ser um múltiplo de cinco.

Com a modificação das variáveis de entrada, obtêm-se diversas situações de projeto, podendo escolher a que melhor se adapta a uma determinada condição, o que facilita em muito o dimensionamento da irrigação por sulcos.

3.5. Verificação do modelo

O modelo foi aferido com dados de sulco obtidos em campos de precisão, pertencentes a Universidade do Arizona, tendo sido relatados por Ramsey (1976)¹, citado por SOUZA (1984), LEVIEN (1985) e LEVIEN & SOUZA (1987).

Também foi feita uma avaliação do modelo com dados a nível de campo, obtidos através de diversos ensaios com diferentes vazões, realizados na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ, em Piracicaba- SP. Convém notar que estes parâmetros de campo foram atrelados a uma condição específica de umidade do solo, que seria a de proceder uma nova irrigação, utilizando um período médio de 6 a 7 dias entre cada ensaio.

¹. RAMSEY, M.K. Intake characteristics and flow resistance in irrigations furrows. Tucson, 1976. 141p. (M.Sc. - University of Arizona).

3.5.1. Análise com dados de sulco de precisão

O termo sulco de precisão indica um elevado grau controle, no que se refere à condição da superfície de escoamento, ou seja uniformidade em termos de seção transversal do fluxo, umidade e características de infiltração do solo, em relação ao que ocorre em uma irrigação normal.

Os dados utilizados foram os de Ramsey, com os parâmetros de infiltração da equação tipo Kostiakov proposta por SOUZA (1984), em termos de lâmina acumulada, sendo que esta foi adaptada para servir de alimentação ao modelo SAVIS.

Admitindo o movimento uniforme, para transformar a equação de lâmina para volume, têm-se que multiplicar a constante K pelo perímetro molhado (Pm), observado no início do sulco e pela célula de espaço (Δs), geralmente a unidade:

$$V = (Pm \cdot \Delta s) K \cdot T^a + f_0 \cdot T \quad (74)$$

O perímetro molhado é obtido através dos parâmetros geométricos do sulco, onde primeiramente com os dados fornecidos, a lâmina no início do sulco (Y_0) é considerada a lâmina normal, sendo função da vazão de entrada e calculada através da eq. (22). Com o valor de Y_0 , encontra-se o valor do perímetro molhado e com este a equação em termos de volume infiltrado por metro de sulco.

Finalmente deriva-se a equação em termos de volume para encontrar a relação em termos de vazão infiltrada, que é a utilizada no modelo.

Os dados dos sulcos de precisão foram comparados com os simulados pelo modelo, verificando assim a performance do modelo proposto em termos de previsão da fase de avanço da água.

3.5.2. Análise com dados a nível de campo

O experimento para a obtenção de dados para a avaliação do modelo proposto foi conduzido na área experimental de irrigação por superfície do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba- SP.

O solo do local dos ensaios foi classificado como terra roxa estruturada, série Luiz de Queiroz, cujo material de origem são as rochas básicas. Possui a classe textural classificada como Argila, densidade aparente média de $1,41 \text{ g/cm}^3$, com os limites superior e inferior de água disponível de 0,35 e $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, referentes às tensões de 0,01 e 0,1Mpa, respectivamente (FOLLEGATI, 1985).

Foram coletados durante os ensaios sete conjuntos de dados para a avaliação do modelo proposto, com diferentes vazões e a umidade média de 19,32 %, considerada satisfatória para realizar uma nova irrigação.

A área para os testes foi preliminarmente sistematizada com uma declividade média de 0,5 % no sentido do escoamento da água, sendo os sulcos abertos com a utilização de um sulcador alisador , construído segundo metodologia proposta por FRANZ & ALONÇO (1988).

Foram utilizados no ensaio cinco sulcos com o comprimento de 100 metros, estaqueados de 10 em 10 metros para a medida do avanço,

sendo três para medição efetiva e dois utilizados para bordadura. O fundo dos sulcos após a irrigação de assentamento foi novamente nivelado, para se ter certeza da declividade considerada (0,5 %).

Para o suprimento de água para os ensaios, foi utilizado um reservatório de nível constante com cota superior a área experimental, possibilitando a condução de água por gravidade até o início da parcela. A distribuição de água para os sulcos foi feita por meio de um tubo janelado ligado por um mangote ao tanque de alimentação, onde este tubo também serviu para aferir preliminarmente a vazão derivada às parcelas de acordo com o número de voltas do bocal.

A medição da vazão de entrada e saída dos sulcos foi feita através de calhas WSC, previamente aferidas em laboratório, assentadas no início e final da parcela.

A seção hidráulica dos sulcos foi determinada antes de cada ensaio, através do perfil médio dos mesmos com o uso de um perfilômetro, com leituras feitas no início, meio e final dos sulcos utilizados para o ensaio. Posteriormente, os dados foram graficados e obtida uma média, com os valores de largura da superfície livre e altura da lâmina de água.

A umidade média do solo foi calculada pelo método gravimétrico antes de cada ensaio, com amostras retiradas em cada estação de medição do avanço, ou a cada 10 metros. Procurou-se repetir os testes com uma umidade em torno de 19 a 20 % com base em peso seco, que seria a umidade verificada com 6 a 7 dias de intervalo entre uma irrigação, ao qual é o turno médio utilizado pela maioria das culturas sob regime de irrigação.

Em cada ensaio foram medidos os tempos de avanço que a água levou para atingir cada estação, bem como a leitura nas calhas da vazão de

entrada e saída, até esta vazão na extremidade final dos sulcos permanecer constante.

Para a aferição do modelo foram conseguidos resultados aceitáveis em termos de umidade para as vazões de 1,45, 1,04 e 0,71 l/s para o sulco 1 ; 1,33 e 0,98 l/s para o sulco 2 e 1,5 e 1,34 l/s para o sulco 3.

A obtenção de uma equação de infiltração representativa é importante para se conseguir uma precisa avaliação dos modelos de simulação da irrigação superficial.

Para a alimentação do modelo proposto, a equação de infiltração tipo Kostiakov modificada, foi obtida utilizando o procedimento do balanço de volume descrito por WALKER & SKOGERBOE (1987), cujo desenvolvimento teórico possui como base o princípio da conservação da massa aplicada à irrigação por sulcos durante a fase de avanço. Este método foi ligeiramente modificado, sendo que os coeficientes geométricos de forma dos sulcos (c_1 e c_2), determinados através das relações de potência entre a área e o perímetro molhado feitas através de regressão linear logarítmica. Também o expoente "r" da equação de avanço foi calculado por regressão ao invés do método dos dois pontos proposto por ELLIOT & WALKER (1982). Esta mudança conduz a uma equação mais representativa do processo de infiltração.

Os dados obtidos a nível de campo foram comparados com aqueles simulados pelo modelo, aferindo assim a eficácia do modelo proposto no presente trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto para a simulação da fase de avanço em sulcos com gradiente de declive e drenagem livre, é analisado e testado com dados de sulcos de precisão e também com os resultados obtidos a nível de campo nos ensaios realizados na área experimental de Piracicaba- SP.

4.1. Comparação com dados de sulcos de precisão

O primeiro exemplo de comparação utiliza dados de campos de precisão localizados na Universidade do Arizona (EUA), construídos com a finalidade exclusiva de gerar parâmetros precisos para testar modelos matemáticos, portanto possuindo um grau de controle muito superior do que o verificado em uma irrigação normal. Foram obtidos por Ramsey (1976), citados por SOUZA (1984) e LEVIEN (1985), em sulcos de precisão, apresentando as seguintes características: a forma dos sulcos é uma equação descrita por, $B = 1,95LY^{0,4539}$, onde B é a largura da superfície livre e Y a altura do fluxo, em m. Os parâmetros de entrada para o modelo são os seguintes: vazão de entrada, $q_0 = 1,33$ l/s; coeficiente de rugosidade de Manning inicial, $n_0 = 0,022$; declividade, $S_0 = 0,1032$ %; comprimento do sulco, $L = 100,58$ m (330 pés); constantes da equação de

Kostiakov, $K = 7,49 \text{ cm/h}$, $a = 0,5$; e finalmente a célula de espaço, $\Delta s = 0,125 \text{ m}$. Os valores de K , a e "no" foram propostos por SOUZA (1984).

Transformando a equação de infiltração em termos de lâmina para volume, têm-se: $V = 0,000374 \cdot T^{0,5}$, onde derivando esta, determinamos a seguinte expressão final para entrada no modelo:

$$\frac{dV}{dT} = 0,000187 \cdot T^{-0,5} \quad (75)$$

onde dV/dT é a vazão infiltrada, em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}$ e T é o tempo em s.

Os parâmetros de sulcos de precisão relatados por Ramsey foram utilizados por SOUZA (1984) para testar seu modelo hidrodinâmico e por LEVIEN & SOUZA (1987) na avaliação de seu modelo algébrico. Convém salientar que este conjunto de dados não traz nenhuma referência a respeito da velocidade de infiltração básica e das condições de umidade em que foram realizados os testes.

Os parâmetros originais de Ramsey são dados em pés, sendo necessária a devida transformação para metros para serem utilizados como entrada para o modelo. Para a comparação entre os resultados, os parâmetros foram transformados em uma equação de avanço, onde os tempos foram então calculados de 10 em 10 metros, até o final do sulco (100 m).

A tabela 1 apresenta os resultados da simulação com os dados de Ramsey, como é apresentada pelo modelo SAVIS

Tabela 1. Quadro de resultados apresentados pelo modelo SAVIS- Dados de Ramsey (1976).

Comprimento do sulco $L = 100$ metros

Vazão $q_0 = 1,33$ l/s Coeficiente de Manning inicial $n_0 = 0,022$

Declividade do sulco $S_0 = 0,1032$ %

Parâmetros de forma $c_1 = 1,246$ $c_2 = 0,6993$

Constantes de Kostiakov $K' = 0,000187$, $a' = -0,5$ e $f_0 = 0,0000$

Célula de espaço $\Delta s = 0,125$ metros

Distância (metros)	Tempo (minutos)	V.Superficial (m^3)	V. Infiltrado (m^3)	V. Total (m^3)
5	0,62	0,0386	0,0107	0,0493
10	1,27	0,0704	0,0310	0,1014
15	1,95	0,0980	0,0578	0,1557
20	2,66	0,1221	0,0898	0,2119
25	3,38	0,1434	0,1265	0,2699
30	4,13	0,1622	0,1675	0,3297
35	4,90	0,1789	0,2124	0,3912
40	5,69	0,1935	0,2609	0,4544
45	6,51	0,2063	0,3130	0,5194
50	7,34	0,2176	0,3685	0,5860
55	8,20	0,2273	0,4271	0,6544
60	9,08	0,2357	0,4889	0,7246
65	9,98	0,2428	0,5538	0,7966
70	10,91	0,2488	0,6216	0,8704
75	11,86	0,2538	0,6923	0,9461
80	12,83	0,2578	0,7658	1,0237
85	13,82	0,2610	0,8422	1,1032
90	14,85	0,2634	0,9213	1,1847
95	15,89	0,2651	1,0031	1,2682
100	16,97	0,2662	1,0877	1,3539

Os dados observados por Ramsey (1976) e os simulados pelo modelo proposto no presente trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de avanço observado (Ramsey) e simulado pelo modelo

Distância (metros)	Tempo observado por Ramsey (minutos) *	Tempo simulado pelo modelo (minutos)
0	0,00	0,00
10	1,13	1,27
20	2,54	2,66
30	4,09	4,13
40	5,74	5,69
50	7,46	7,34
60	9,24	9,08
70	11,08	10,91
80	12,96	12,83
90	14,89	14,85
100	16,85	16,97

* Dados apresentados por LEVIEN (1985), com os tempos obtidos através da equação de avanço, determinada por regressão linear, a partir dos dados originais de Ramsey.

A Figura 3 apresenta as curvas de avanço calculadas pelo modelo SAVIS e as observadas nos campos de precisão. Como se pode verificar, o modelo fornece uma excelente aproximação quando comparado com os dados de campo, apesar das hipóteses assumidas. Os valores calculados pelo modelo proposto diferem daqueles observados no campo em 0,71% ao final do tempo de

avanço, praticamente coincidindo com o valor observado, qualificando o modelo como de grande precisão para a simulação da fase de avanço.

Figura 3. Curvas de avanço observada por Ramsey e calculada pelo modelo .

4.2. Comparação com dados da parcela experimental

O desempenho do modelo também foi avaliado com dados obtidos na parcela experimental de irrigação por superfície do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP.

Os ensaios foram feitos com a umidade ideal para se voltar a irrigar média de 19,32 % para o solo do local dos ensaios , ou seja com um intervalo médio entre 6 a 7 dias entre cada irrigação, vinculando a umidade com os testes executados.

A tabela 3 apresenta as principais características dos ensaios executados a nível de campo, com sete vazões diferentes.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros de irrigação da parcela experimental.

Descrição dos Parâmetros	Sulco 1			Sulco 2		Sulco 3	
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Vazão inicial- q ₀ (l/s)	1,450	1,043	0,710	1,326	0,980	1,499	1,383
Vazão saída -q _s (l/s)	1,00	0,674	0,456	0,820	0,56	0,942	0,913
Umidade inicial (%)	19,42	18,88	19,85	18,88	19,42	19,85	19,42
Declividade- S ₀ (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
C. Manning inicial- n ₀	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Parâmetros de forma							
c ₁	1,3245	1,2207	1,1478	1,2342	1,2909	1,1645	1,2313
c ₂	0,7078	0,6950	0,6843	0,6960	0,7040	0,6844	0,6974
Comp.do sulco- L (m)	100	100	100	100	100	100	100
Parâmetros de infiltr.							
K' (m ³ /s ^a .m)	1,919. 10 ⁻⁴	1,413. 10 ⁻⁴	1,325. 10 ⁻⁴	9,435. 10 ⁻⁵	9,906. 10 ⁻⁵	2,063. 10 ⁻⁴	1,338. 10 ⁻⁴
a'	-0,6205	-0,4790	-0,5041	-0,3602	-0,4038	-0,5448	-0,4087
f ₀ (m ³ /s.m)	4,50. 10 ⁻⁶	3,68. 10 ⁻⁶	2,53. 10 ⁻⁶	5,07. 10 ⁻⁶	4,2. 10 ⁻⁶	5,57. 10 ⁻⁶	4,67. 10 ⁻⁶
Célula de espaço-Δs(m)	0,125	0,125	0,125	0,250	0,250	0,125	0,125
Constantes de avanço *							
p	10,9335	9,9943	8,4136	11,9468	10,4726	9,5317	10,3397
r	0,8060	0,6991	0,6975	0,6442	0,6416	0,7923	0,7062

* Equação da forma $s = p.T^r$

Os tempos de avanço observados a nível de campo e calculados pelo modelo SAVIS nos sulcos 1, 2 e 3 são apresentados na Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4. Dados de avanço observados e calculados pelo modelo SAVIS no sulco 1 da área experimental

Distância	Teste 1-$q_0=1,45$ l/s		Teste 2-$q_0=1,04$ l/s		Teste 3- $q_0=0,71$ l/s	
(metros)	Tempo (minutos)*		Tempo (minutos)		Tempo (minutos)	
	Observado	Modelo	Observado	Modelo	Observado	Modelo
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,00	1,09	1,17	1,25	1,42	1,49
20	2,00	2,27	2,55	2,69	3,50	3,25
30	3,25	3,52	4,40	4,32	5,77	5,30
40	4,75	4,83	6,87	6,17	8,80	7,69
50	6,50	6,23	9,52	8,29	12,22	10,49
60	8,12	7,69	12,33	10,76	15,77	13,81
70	10,25	9,24	15,67	13,67	19,82	17,80
80	12,00	10,89	19,83	17,16	25,00	22,65
90	13,75	12,63	24,25	21,44	31,50	28,60
100	16,50	14,49	30,50	26,74	39,85	35,95

Tabela 5. Dados de avanço observados e calculados pelo modelo SAVIS no sulco 2 da área experimental

Distância	Teste 1- $q_0 = 1,33$ l/s		Teste 2 - $q_0 = 0,98$ l/s	
(metros)	Tempo (minutos)		Tempo (minutos)	
	Observado	Modelo	Observado	Modelo
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,00	1,12	1,25	1,24
20	2,07	2,39	2,50	2,67
30	3,53	3,82	4,42	4,32
40	5,67	5,45	7,00	6,25
50	8,42	7,36	10,25	8,59
60	11,58	9,65	14,50	11,54
70	15,42	12,56	18,75	15,47
80	19,83	16,49	24,50	20,97
90	25,05	22,09	31,25	28,88
100	31,17	30,34	39,50	40,39

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam as curvas de avanço observadas e simuladas pelo modelo SAVIS no sulcos 1 da área experimental, para as vazões 1,45, 1,04 e 0,71 l/s, respectivamente.

Como pode ser verificado as curvas de avanço apresentam uma boa aproximação quando comparadas com os dados de campo. Os valores calculados pelo modelo no sulco 1 com a vazão de 1,45 l/s, diferem daqueles observados no

campo em 12,18 % no final do avanço, enquanto que nas vazões de 1,04 e 0,71 l/s as diferenças foram de 12,33 e 9,79 %, respectivamente.

Tabela 6. Dados de avanço observados e calculados pelo modelo SAVIS no sulco 3 da área experimental.

Distância (metros)	Teste 1- $q_0 = 1,50$ l/s		Teste 2 - $q_0 = 1,38$ l/s	
	Tempo (minutos)		Tempo (minutos)	
	Observado	Modelo	Observado	Modelo
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,18	1,14	1,17	1,12
20	2,47	2,43	2,33	2,40
30	4,12	3,85	4,25	3,85
40	5,83	5,40	6,25	5,52
50	7,72	7,11	8,50	7,46
60	9,63	9,00	11,17	9,79
70	11,80	11,11	14,50	12,65
80	14,53	13,49	18,50	16,31
90	17,72	16,19	22,50	21,10
100	22,07	19,31	29,17	27,47

Figura 4. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 1, com a vazão de 1,45 l/s.

As figuras 7 e 8 apresentam as curvas de avanço observadas a nível de campo e simuladas pelo modelo SAVIS no sulco 2 da área experimental, com as vazões de 1,33 l/s e 0,98 l/s.

Como pode ser verificado ocorreu no sulco 2 uma boa relação entre os dados observado no campo e o calculado pelo modelo. Na vazão de 1,33 l/s os valores simulados diferem dos observados em campo em 2,66 % no final da parcela, enquanto que na vazão de 0,98 l/s a diferença é de 2,25 %.

As Figuras 9 e 10 apresentam as curvas de avanço observadas e simuladas pelo modelo SAVIS no sulco 3 da área experimental, com as vazões de 1,50 l/s e 1,38 l/s.

Também neste sulco verificou-se uma boa aproximação da curva de avanço observada no campo com a simulada pelo modelo. Os valores calculados pelo modelo diferem daqueles verificados no campo na vazão de 1,50 l/s em 12,51 %, enquanto que na vazão de 1,38 l/s esta diferença cai para 5,83 %.

Figura 5. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 1, com a vazão de 1,04 l/s.

Figura 6. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 1, com a vazão de 0,71 l/s.

A média geral da diferença no final da parcela entre o tempo observado no campo experimental e o simulado pelo modelo SAVIS para as sete vazões testadas foi de 8,22 %. Apesar das limitações de controle dos fatores do ensaio a nível de campo esta diferença é pequena em termos práticos, qualificando o modelo como de boa precisão.

Como pode ser observado nas Figuras 4 a 10, em parte a tendência de subestimar o tempo de avanço observado em relação ao tempo de avanço simulado pelo modelo, pode ser possivelmente explicado devido ao fato dos três sulcos testados estarem um ao lado do outro. Também conforme a eq. (63),

o cálculo da velocidade média no trecho atual (i) foi realizada com a vazão média no segmento anterior ($i-1$), não considerando a vazão média na célula atual. Isto superestima a velocidade (V_i), reduzindo o tempo de avanço acumulado (T_{avc}). Não se utilizou a vazão média em i , devido isto ter sido considerado uma hipótese do modelo (movimento uniforme dentro de cada pequena célula) e de acordo com o tamanho da célula de espaço (Δs), esta diferença é tanto menor quanto menor for este segmento.

Figura 7. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 2, com a vazão de 1,33 l/s.

A diferença entre os resultados dos dados de Ramsey e os observados na parcela experimental, refere-se ao grau de controle conseguido nos ensaios. Na área dos testes, o terreno sofreu cortes e aterros acentuados e o solo é muito argiloso, dificultando o preparo e a abertura dos sulcos. Devido a estes fatores não se conseguiu uma boa uniformidade em termos de umidade do solo, declividade da parcela e na forma dos sulcos. Isto também contribuiu para a diferença entre os dados observados e calculados pelo modelo em cada sulco e vazão testada.

Figura 8. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 2, com a vazão de 0,98 l/s.

A variabilidade encontrada nos sulcos é acentuada, verificando uma umidade diferente para cada amostra retirada nas estações de leitura do avanço. Também verificou-se através das observações do perfilômetros que a forma do sulco muda entre uma irrigação e outra.

Figura 9. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 3, com a vazão de 1,50 l/s.

O coeficiente de rugosidade superficial é muito afetado pelas condições da superfície de escoamento do sulco, justificando então o uso deste coeficiente como variável no modelo apresentado. O valor do "n" inicial de

Manning utilizado no exemplo de campo foi adequado em vista da não uniformidade geral dos sulcos testados na área experimental.

Figura 10. Curvas de avanço observada e calculada pelo modelo no sulco 3, com a vazão de 1,38 l/s.

A hipótese básica de se considerar o movimento uniforme dentro de cada célula de espaço é aceitável, uma vez que o incremento de distância (Δs) é muito pequeno, tornando na realidade o escoamento variável na extensão total do sulco.

As diferenças entre os dados observados e os simulados pelo modelo dependem acentuadamente da precisão e representatividade dos parâmetros de entrada requeridos pelos modelos, ou seja do grau de controle conseguido quando da realização dos ensaios de campo, principalmente das constantes de infiltração.

Como sugestões, o modelo deveria ser testado com diferentes tipos de solo, em parcelas mais uniformes em termos de nivelamento e também com outras metodologias de cálculo das constantes da equação de infiltração, que constituem os parâmetros de entrada mais importantes para se avaliar com segurança o modelo SAVIS.

5. CONCLUSÕES

Com base nas hipóteses formuladas, nos resultados obtidos, na metodologia utilizada e nas condições locais em que foram realizados os ensaios de comparação de campo, chegou-se às seguintes conclusões:

a) Os valores calculados pelo modelo SAVIS praticamente coincidiram com aqueles observado em campo de precisão, diferindo apenas em 0,71 % ao final do tempo de avanço.

b) Com relação a comparação com os dados da parcela experimental, no sulco 1 para as vazões de 1,45, 1,04 e 0,71 l/s as diferenças entre o simulado e o observado no final do sulco foram respectivamente 12,18 ; 12,33 e 9,79 %. No sulco 2, para as vazões de 1,32 e 0,98 l/s as diferenças foram em ordem 2,66 e 2,25 %. Para o sulco 3, com as vazões de 1,5 e 1,38 l/s as diferenças entre o tempo calculado pelo modelo e o observado no campo foram de 12,51 e 5,83 %, respectivamente.

c) A média geral das diferenças entre os tempos simulados e os observados no final do sulco para as sete vazões testadas foi de 8,22 % . Apesar das limitações com relação ao controle dos fatores do ensaio a nível de campo, esta

diferença é pequena em termos práticos, podendo o modelo ser considerado como de boa precisão.

d) Com relação ao desenvolvimento do modelo SAVIS, o mesmo se mostra bem simplificado quando comparado a outros modelos matemáticos de precisão similar. Apresenta ainda a vantagem de não utilizar em seu procedimento de cálculo os fatores de forma superficial e subsuperficial, que em outros modelos são utilizados empiricamente.

e) De acordo com as hipóteses simplificadoras feitas e com os resultados apresentados, o modelo apresentado se mostra bastante consistente, simples e com uma boa precisão para se prever a fase de avanço na irrigação por sulcos abertos com gradiente de declive, a partir da segunda irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A . N. de. Influência de dois tipos de sulcadores no avanço e infiltração da água no solo. Viçosa, 1990. 56 p.(Mestrado- Universidade Federal de Viçosa)
- AZEVEDO, C. A.. V. Real- time solution of the inverse furrow advance problem. Logan, 1992. 263 p. (PhD- Utah State University)
- AZEVEDO NETTO, J. M. de & ALVAREZ, G.A.. **Manual de hidráulica**. 7.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1986. 2v.
- BASSET, D. L . ; FANGMEIR, D.D. ; STRELKOF, T. Hydraulics of surface irrigation. In: JENSEN.M.E. **Design and operation of farm irrigations systems** St Joseph. The American Society of Agricultural Engineers, 1983.cap.12, p.447-98.
- BASSET, D. L. & FITZSIMMONS, D. W. Simulating overland flow in border irrigation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 19 (4): 666-71, 1976.
- BAUTISTA, E. & WALLENDER, W. W. Numerical calculations of infiltration in furrow irrigation simulation models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, New York, 119 (2) : 286-311, 1993.

- BROWN, M . J. ; KEMPER, W.D. ; TROUT, T.J. ; HUMPHERYS, A .S.
Sediment, erosion, and water intake in furrows. **Irrigation Science**, New York, 9 :45- 55, 1988.
- CHEN, C. Surface irrigation using kinematic-wave method. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, 96 (IR2): 39-46, 1970.
- CHOW, VEN TE. **Open-channel hydraulics**. 22. ed. Singapore, McGraw-Hill, 1986. 680 p.
- CHRISTIANSEN, J.E . ; BISHOP, A .A . ; KIEFER, F.W.J. ; FOK, Y.S.
Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 9 (5): 671-4, 1966.
- CLEMENS, A . J. Verification of the zero inertia model for border irrigation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 22 (6): 1306-9, 1979.
- DAVIS, J. R. . Estimation rate of advance for irrigated furrows. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 4 (1) 52-7, 1961.
- DOURADO NETO, D. Modelo recursivo de Hall-Davis: algoritmos em Basic e para HP 15 C. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, 29 : 19- 24, 1987.
- ELLIOT, R . L. & WALKER, W. R. . Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 25 (2) : 396-400, 1982.
- ELLIOT, R . L . ; WALKER, W . R . ; SKOGERBOE, G.V. Zero-inertia modeling of furrow of furrow irrigation advance. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, 108 (IR3): 179-95, 1982.

- FANGMEIR, D. D. & RAMSEY, M . K . Intake characteristics of irrigation furrows. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, **21** (4): 696-700, 705, 1978.
- FANGMEIR, D .D. & STRELKOF, T. Mathematical models and border irrigation design. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, **22** (1): 93-9, 1979.
- FOK, YU-SI & BISHOP, A . A . Analysis of water advance in surface irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **91** (IR1): 99-116, 1965.
- FOLEGATTI, M . V. Desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido a diferentes lâminas médias de água através da irrigação por sulco. Piracicaba, 1985. 99 p. (Mestrado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- FONKEN, D. W. ; CARMODY, T. ; LAURSEN, M. ; FANGMEIR, D. Mathematical model of border irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **106** (IR 3): 203-20, 1980.
- FRANZ, C. A . B. & ALONÇO, A . S. dos. **Sulcador aclopável à semeadeira adubadeira para implantação de lavouras irrigadas por sulcos**. Planaltina, EMBRAPA/CPAC, 1988. 22 p.(EMBRAPA-CPAC.Circular Técnica,24).
- FRIZZONE, J.A . **Irrigação por superfície**. Piracicaba, ESALQ/ Departamento de Engenharia Rural, 1993. 183 p. (Série Didática 005)
- GRASSI, C. J. **Diseño y operación del riego por superficie**. Mérida, CIDIAT, 1988. 415 p. (Série RD, 36).
- HALL, W.A . Estimating irrigation border flow. **Agricultural Engineering**, St Joseph, **37** (4): 263-5, 1956.

- HANSEN, V. E. The importance of hydraulics of surface irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **84** (IR3): 1788.1-8, 1958.
- HART, W. E. ; BASSET, D. L. ; STRELKOF, T. Surface irrigation hydraulics- kinematics. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **94** (IR4): 419-40, 1968.
- HART, W. E. ; WOODWARD, G. ; HUMPHERYS, A . S. Design and operation of gravity or surface systems. In: JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St Joseph The American Society of Agricultural Engineers, 1983, cap. 13, p. 501-80.
- HEERMANN, D. F. ; WENSTROM, R. J. & EVANS, N. A . Prediction of resistance in furrows from soil roughness. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **12** (4): 482-5, 489, 1969.
- HENDERSON, F. M . **Open channel flow**. New York, Mc Millan, 1966. 552p.
- KATOPODES, N.D. & STRELKOF, T. Hydrodynamics of border irrigation- a complete model. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **103** (IR3):309-24, 1977.
- KINCAID, D. C. ; HEERMANN, D. L. ; KRUSE, E. G . Hydrodynamics of border irrigation advance. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **15** (4): 674-80, 1972.
- LENCASTRE, A . **Hidráulica geral**. Lisboa, Hidroprojecto, 1983. 654p.
- LEVIEN, S. L. A. Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado da irrigação por sulcos abertos em declive. Fortaleza, 1985. 91 p. (Mestrado- Universidade Federal do Ceará)

- LEVIEN , S. L. A . & SOUZA, F. de. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, **113** (3): 367-77, 1987.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta- atmosfera**. Piracicaba, ESALQ/CENA/USP, 1984. 232 p. (Apostila)
- MICHAEL, A .M. **Irrigation- theory and pratice**. New Delhi, Vikas Publ. House PVT, 1978. 801p.
- PEREIRA, G. M. Estudo das características de avanço e infiltração da água em sulcos, em um latossolo vermelho-escuro álico, com aplicação de água contínua e intermitente. Viçosa, 1991. 84 p. (Mestrado- Universidade Federal de Viçosa)
- RAYEJ, M. & WALLENDER, W. W. Furrow model with specified space intervals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, **113** (4): 536- 48, 1987.
- REDDY, J. M. & CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **24** (3): 617-23, 1981.
- REZENDE, F. C. & SCALOPPI, E. J. Avaliação de métodos para determinação das características de infiltração em sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **20** (2): 227-33, 1985.
- SAKKAS, J. G. & STRELKOF, T. Hydrodynamics of surface irrigation- advance phase. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **100** (IR1): 31-48, 1974.
- SCALOPPI, E. J. Modelos matemáticos para simulação da irrigação superficial. Botucatu, 1983. 155 p. (Livre Docência- Faculdade de Ciências Agronômicas/ UNESP)

- SCALOPPI, E. J. Sistemas de irrigação por superfície. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, 12 (139): 12-26, 1986.
- SCHWANKL, L. J. & WALLENDER, W. W. Zero-inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 31 (5): 1470-5, 1988.
- SINGH, V. P. & YU-CHENG, H. Muskingum model for furrow irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, New York, 114 (1) : 89-103, 1988.
- SMITH, R. E. Border irrigation advance and ephemeral flood waves. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE, New York, 98 (IR2): 289- 307, 1972.
- SOUZA, F. de. Non linear hydrodynamic model of furrow irrigation. Davis, 1981. 172 p. (PhD - University of California)
- SOUZA, F. de. **Hidráulica da irrigação por superfície**. Fortaleza, UFC, 1983. 54 p. (Apostila)
- SOUZA, F. de. Modelo matemático da irrigação por sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 19 (9): 1135-43, 1984.
- STRELKOF, T. Numerical solution of the Saint-Venant equations. **Journal of the Hydraulic Division**. ASCE, New York, 96 (HY1): 223-52, 1970.
- STRELKOF, T. Algebraic computation of flow in border irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE, New York, 103 (IR3): 357-77, 1977.
- STRELKOF, T. & KATOPODES, N. D. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE, New York, 103 (IR3): 325-42, 1977.

- STRELKOF, T. & SOUZA, F. de. Modeling effect of depth on furrow infiltration. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, 110 (4):375-87, 1984.
- TABUADA, M . A . Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos. Lisboa, 1989. 237 p. (Doutorado- Universidade de Lisboa).
- TROUT, T. J. Furrow geometric parameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, 117 (5): 613-34, 1991.
- TROUT, T. J. Furrow flow velocity effect on hydraulic roughness. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, 118 (6): 981-87, 1992a.
- TROUT, T. J. Flow velocity and wetted perimeter effects on furrow infiltration. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 35 (3): 855-63, 1992 b.
- WALKER, W. R . **Guidelines for designing and evaluation surface irrigations systems**. Rome, FAO, 1989. 137p.(FAO. Irrigation and Drainage Paper,45)
- WALKER, W. R . & HUMPHERYS, A . S. Kinematic wave irrigation model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE**, New York, 109 (4): 377-92, 1983.
- WALKER, W.R. & SKOGERBOE, G. V. **Surface Irrigation: theory and practice**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1987. 386 p.
- WALLENDER, W. W. & RAYEJ, M . Economic optimization of furrow irrigation with uniform and nonuniform soil. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 30 (5): 1425-29, 1987.

- WILKE, O. & SMERDON, E. T. A solution of the irrigation advance problem. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, 91 (IR3): 23-34, 1965.**
- YU, F. X. & SINGH, V. P. Analitical model for furrow irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, New York, 116 (2): 154-71, 1990.**

APÊNDICE 1

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DOS SULCOS

Assumindo o sulco como possuindo a seção transversal na forma parabólica, esquematicamente representado pela Figura 1, onde B é a largura da seção de escoamento, A é a área desta seção, P_m , o perímetro molhado e Y a profundidade da lâmina líquida no centro da seção.

Figura 1. Elementos geométricos da seção transversal na forma parabólica de um sulco de infiltração.

Considerando que o valor de B possa ser bem representado por uma função tipo potência, obtida através de pares de valores de B e Y , têm-se a seguinte relação:

$$B = c.Y^m \quad (01)$$

onde c e m são parâmetros de ajustamento determinados empiricamente, pode-se concluir que:

$$\frac{dB}{dY} = m.c.Y^{m-1} \quad (02)$$

reconhecendo que:

$$dA = B.dY \quad (03)$$

pode-se substituir o valor de B dado pela eq. (01) e obter a área da seção transversal da seguinte forma:

$$A = \frac{c}{m+1} Y^{m+1} \quad (04)$$

e relacionar também com a altura do fluxo, obtendo:

$$A = b_1.Y^{b_2} \quad (05)$$

onde para facilidade de cálculos têm-se:

$$b_1 = \frac{c}{m+1} \quad (06)$$

$$b_2 = m+1 \quad (07)$$

Assumindo a linearidade do segmento dP_m na Figura 1, pode-se escrever que:

$$\left(\frac{dP_m}{2}\right)^2 = \left(\frac{dB}{2}\right)^2 + (dY)^2 \quad (08)$$

e, portanto, têm-se:

$$\left(\frac{dPm}{2dY}\right)^2 = \left(\frac{dB}{2dY}\right)^2 + 1 \quad (09)$$

finalmente, têm-se:

$$dPm = 2 \left\{ \left(\frac{dB}{2dY} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} dY \quad (10)$$

O valor do Perímetro molhado pode então ser calculado por:

$$Pm = 2 \int_0^Y \left\{ \left(\frac{dB}{2dY} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2} dY \quad (11)$$

Como a integral da eq. (11) não pode ser calculada analiticamente, o perímetro molhado será determinado através de integração numérica por meio do programa SIMULA, de acordo com a seguinte expressão:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ \left[Y_i - Y(i-1) \right]^2 + \left[0,5 \cdot [B_i - B(i-1)] \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (12)$$

podendo também se relacionar com a altura Y , através de uma função de potência da seguinte forma:

$$Pm = \rho \cdot Y^\gamma \quad (13)$$

A relação área da seção transversal com vazão pode ser conseguida através da equação de Manning, onde foram separados os parâmetros geométricos dos hidráulicos :

$$A.Rh^{2/3} = \frac{qo.n}{So^{1/2}} \quad (14)$$

sabendo que:

$$A.Rh^{2/3} = \left(\frac{A}{cl} \right)^{1/c2} \quad (15)$$

têm-se:

$$\left(\frac{A}{cl} \right)^{1/c2} = \frac{qo.n}{So^{1/2}} \quad (16)$$

onde finalmente podemos relacionar a área com a vazão, por meio de :

$$A = cl \left\{ \frac{qo.n}{\sqrt{So}} \right\}^{c2} \quad (17)$$

onde:

$$c2 = \frac{3.b2}{5b2 - 2\gamma} \quad (18)$$

$$cl = bl \left\{ \frac{\rho^{2/3}}{bl^{5/3}} \right\}^{c2} \quad (19)$$

Com as relações de potência de área e perímetro molhado com a altura da lâmina, têm-se com o fator de seção geométrico da eq. (14):

$$A.Rh^{2/3} = \frac{A.A^{2/3}}{Pm^{2/3}} = \frac{A^{5/3}}{Pm^{2/3}} \quad (20)$$

onde:

$$Rh = \frac{A}{Pm} \quad (21)$$

ou seja:

$$A.Rh^{2/3} = \frac{(b1.Y^{b2})^{5/3}}{(\rho.Y^\gamma)^{2/3}} = \frac{b1^{5/3}.Y^{5/3.b2}}{\rho^{2/3}.Y^{2/3.\gamma}} \quad (22)$$

ou ainda:

$$A.Rh^{2/3} = \frac{b1^{5/3}}{\rho^{2/3}} Y^{5/3.b2} Y^{-2/3.\gamma} \quad (23)$$

ficando finalmente:

$$A.Rh^{2/3} = \frac{b1^{5/3}}{\rho^{2/3}} Y^{\frac{5b2-2\gamma}{3}} \quad (24)$$

Através da eq. (15) que relaciona o fator de seção geométrico com a área e os coeficientes $c1$ e $c2$, têm-se:

$$\frac{b1^{5/3}}{\rho^{2/3}} Y^{\frac{5b2-2\gamma}{3}} = \left(\frac{b1.Y^{b2}}{c1} \right)^{\frac{1}{c2}} \quad (25)$$

que equivale a:

$$\frac{b1^{5/3}}{\rho^{2/3}} Y^{\frac{5b2-2\gamma}{3}} = \frac{b1^{1/c2}.Y^{b2/c2}}{c1^{1/c2}} = \frac{b1^{1/c2}}{c1^{1/c2}} Y^{b2/c2} \quad (26)$$

onde:

$$Y^{\frac{5b_2-2\gamma}{3}} = Y^{\frac{b_2}{c_2}} \therefore \frac{5b_2-2\gamma}{3} = \frac{b_2}{c_2} \quad (27)$$

e agora podemos determinar c_2 pela seguinte relação:

$$c_2 = \frac{3b_2}{5b_2-2\gamma} \quad (28)$$

e também sabendo que:

$$\frac{b_1^{5/3}}{\rho^{2/3}} = \frac{b_1^{1/c_1}}{c_1^{1/c_2}} \therefore c_1^{1/c_2} = \frac{b_1^{1/c_2} \cdot \rho^{2/3}}{b_1^{5/3}} \quad (29)$$

e finalmente têm-se o valor de c_1 , através da seguinte expressão:

$$c_1 = \left\{ \frac{b_1^{1/c_2} \cdot \rho^{2/3}}{b_1^{5/3}} \right\}^{c_2} \therefore c_1 = b_1 \left\{ \frac{\rho^{2/3}}{b_1^{5/3}} \right\}^{c_2} \quad (30)$$

APÊNDICE 2

EXEMPLO DETALHADO DOS CÁLCULOS DO MODELO

A partir dos dados de sulcos de precisão relatados por Ramsey em 1976 e citados por SOUZA (1984) e LEVIEN (1985).

Dados de entrada do modelo:

$q_0 = 1,33 \text{ l/s};$

$S_0 = 0,1032 \text{ } \%$;

$n_0 = 0,022;$

Parâmetros geométricos- $B = 1,0951 \text{ y } 0,4539;$

Equação de infiltração- $dV/dT = 0,000187 t^{-0,5};$

Célula de espaço- $\Delta s = 10,0 \text{ metros (facilidades de cálculo) e}$

Comprimento do sulco- $L = 50 \text{ metros.}$

1. Cálculo de C1 e C2

Com os pares de valores da largura da superfície livre da água, B e da altura da lâmina de água, Y, é relacionado a altura com a base, área e perímetro molhado, através de uma função de potência, encontrando as seguintes relações:

$$B = 1,0951 \cdot Y^{0,4539}$$

$$A = 0,7532 \cdot Y^{1,4539}$$

$$Pm = 1,4845 \cdot Y^{0,5238}$$

Através destas funções é calculado os respectivos valores de c1 e c2 conforme já detalhado anteriormente, onde:

$$C1 = 1,2460$$

$$C2 = 0,6933.$$

2. Solução para a primeira célula de espaço

2.1. Cálculo da primeira área

$$A[1] = C1 \left\{ \frac{qo.no}{\sqrt{So}} \right\}^{C2} = 0,009316m^2$$

2.2. Cálculo do Raio Hidráulico

$$Rh[1] = \left\{ \frac{no.qo}{A[1].\sqrt{So}} \right\}^{3/2} = 0,030569m$$

2.3. Cálculo do valor da altura de rugosidade- ε

$$\varepsilon = e^{\frac{\ln Rh - \frac{Rh^{1/6}}{23.19/\ln 10.no}}{1}} = 0,00245m$$

2.4. Cálculo da velocidade na célula atual

$$V[1] = \frac{qo}{Ao} = 0,142758m/s$$

2.5. Cálculo do tempo instantâneo na célula atual

$$T[1] = \frac{\Delta s}{V[1]} = 70,048514s = 1,17min.$$

2.6. Cálculo do tempo de avanço acumulado

$$Tavc[i] = tavc[i - 1] + T[i] \therefore Tavc[1] = tavc[0] + T[1]$$

$$Tavc[1] = 0 + 1,17 = 1,17 \text{ min.}$$

2.7. Cálculo do tempo de oportunidade de infiltração (célula 1)

$$To[i] = Tavc[i] - Tavc(i - 1) - \frac{T[i]}{2}$$

$$To[1] = 70,048514 - 0 - 70,048514/2 = 35,024257 \text{ s}$$

2.8. Cálculo da vazão infiltrada (célula 1)

$$qi[i] = \{K'.To[i]^{a'} + fo\} \Delta s$$

$$qi[1] = \{0,000187.(35,024)^{-0,5} + 0\}.10 = 0,000315978 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{segm.}$$

2.9. Cálculo da vazão infiltrada acumulada

$$qiac[i] = qiac[i - 1] + qi[i] \therefore qiac[1] = qiac[0] + qi[1]$$

$$qiac[1] = 0 + 0,000315978 = 3,160 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

2.10. Cálculo da vazão no início do próximo trecho

$$q[i] = qo - qiac[i] \therefore q[1] = 0,00133 - 0,000316 = 0,001014022 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

2.11. Cálculo do volume superficial acumulado

$$Vsa[i] = q[i].Tavc[i] \therefore Vsa[1] = q[1].Tavc[1]$$

$$Vsa[1] = 0,001014022 \cdot 70,048574 = 0,0710 \text{ m}^3$$

2.12. Cálculo do volume infiltrado acumulado

$$Via[i] = qiac[i] \cdot Tavg[i] \therefore Via[1] = qiac[1] \cdot Tavg[1]$$

$$Via[1] = 3,160 \cdot 10^{-4} \cdot 70,0486 = 0,0221 \text{ m}^3$$

2.13. Cálculo do volume total acumulado

$$Vta[i] = qo \cdot Tavg[i] \therefore Vta[1] = qo \cdot Tavg[1]$$

$$vta[1] = 0,00133 \cdot 70,048 = 0,0932 \text{ m}^3$$

3. Solução para a segunda célula de espaço

3.1. Cálculo da área com a nova vazão

$$A[i] = C1 \left\{ \frac{q[i-1] \cdot n[i-1]}{\sqrt{S_o}} \right\}^{C2} \therefore A[2] = C1 \left\{ \frac{q[1] \cdot n[1]}{\sqrt{S_o}} \right\}^{C2}$$

$$A[2] = 0,007707 \text{ m}^2$$

3.2. Cálculo do raio hidráulico

$$Rh[i] = \left\{ \frac{n[i-1] \cdot q[i-1]}{A[i] \cdot \sqrt{S_o}} \right\}^{3/2} \therefore Rh[2] = \left\{ \frac{n[1] \cdot q[1]}{A[2] \cdot \sqrt{S_o}} \right\}^{3/2}$$

$$Rh[2] = 0,027048 \text{ m}^2$$

3.3. Cálculo do novo valor do coeficiente de rugosidade " n "

$$n[i] = \frac{Rh[i]^{1/6}}{\frac{23,19}{\ln 10} \ln \left(\frac{Rh[i]}{\varepsilon} \right)} \therefore n[2] = \frac{Rh[2]}{\frac{23,19}{\ln 10} \ln \left(\frac{Rh[2]}{\varepsilon} \right)}$$

$$n[2] = 0,022652$$

3.4. Cálculo da velocidade na célula atual

$$V[i] = \frac{q[i-1]}{A[i]} \therefore V[2] = \frac{q[1]}{A[2]}$$

$$V[2] = 0,131576 \text{ m. s}^{-1}$$

3.5. Cálculo do tempo instantâneo na célula atual

$$T[i] = \frac{\Delta s}{V[i]} \therefore T[2] = \frac{\Delta s}{V[2]}$$

$$T[2] = 76,001589 \text{ s}$$

3.6. Cálculo do tempo de avanço acumulado na célula 2

$$T_{avc}[i] = t_{avc}[i-1] + T[i] \therefore T_{avc}[2] = t_{avc}[1] + T[2]$$

$$T_{avc}[2] = 70,048514 + 76,0015 = 146,050103 \text{ s} = 4,43 \text{ min.}$$

3.7. Cálculo do tempo de oportunidade (célula 1 e 2)

$$To[i] = T_{avc}[i] - T_{avc}[i-1] - \frac{T[i]}{2}$$

$$To[1] = 146,050103 - 0 - 70,048514/2 = 111,025846 \text{ s}$$

$$To[2] = 146,050103 - 70,048514 - 76,001589/2 = 38,000794 \text{ s}$$

3.8. Cálculo da vazão infiltrada (célula 1 e 2)

$$qi[i] = \{K' \cdot To[i]^{a'} + fo\} \Delta s$$

$$qi[1] = \{0,00187 \cdot (111,025846)^{-0,5} + 0\} \cdot 10 = 1,775 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$qi[2] = \{0,00187 \cdot (38,000794)^{-0,5} + 0\} \cdot 10 = 3,034 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

3.9. Cálculo da vazão infiltrada acumulada

$$qiac[i] = qiac[i-1] + qi[i]$$

$$qiac[2] = 1,775 \cdot 10^{-4} + 3,034 \cdot 10^{-4} = 4,809 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{segm.}$$

$$\sum qiac[i] = 4,809 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{segm.}$$

3.10. Cálculo da vazão no início do próximo trecho

$$q[i] = qo - qiac[i] \therefore q[2] = qo - qiac[2]$$

$$q[2] = 1,33 \cdot 10^{-3} - 4,809 \cdot 10^{-4} = 0,000849 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{segm.}$$

3.11. Cálculo do volume superficial acumulado

$$Vsa[2] = 0,1240 \text{ m}^3$$

3.12. Cálculo do volume infiltrado acumulado

$$Via[2] = 0,0702 \text{ m}^3$$

3.13. Cálculo do volume total acumulado

$$Vta[2] = 0,1942 \text{ m}^3$$

4. Solução para a tercelra célula de espaço

4.1. Cálculo da área

$$A[3] = 0,006947 \text{ m}^2$$

4.2. Cálculo do Raio hidráulico

$$Rh [3] = 0,025297 \text{ m}$$

4.3. Cálculo do novo coeficiente de rugosidade "n"

$$n [3] = 0,023043$$

4.4. Cálculo da velocidade na célula atual

$$V [3] = 0,122211 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.5. Cálculo do tempo instantâneo na célula atual

$$T [3] = 81,825451 \text{ s}$$

4.6. Cálculo do tempo de avanço acumulado

$$T_{avc} [3] = 227,875554 \text{ s} = 3,80 \text{ min.}$$

4.7. Cálculo do tempo de oportunidade de infiltração (células 1, 2 e 3)

$$To[i] = T_{avc}[i] - T_{av}[i-1] - \frac{T[i]}{2}$$

$$To [1] = 227,88 - 0 - 70,048514/2 = 192,8513 \text{ s}$$

$$To [2] = 227,88 - 70,048514 - 76,001589/2 = 119,8262 \text{ s}$$

$$To [3] = 227,88 - 146,050103 - 81,825451/2 = 40,9127 \text{ s}$$

4.8. Cálculo da vazão infiltrada (células 1, 2 e 3)

$$qi[i] = \left\{ K' \cdot (To[i])^{a'} + f_o \right\} \cdot \Delta s$$

$$qi [1] = 1,347 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$qi [2] = 1,708 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_i [3] = 2,924 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

4.9. Cálculo da vazão infiltrada acumulada

$$q_{iac}[i] = \sum q_i[i] = q_i[1] + q_i[2] + q_i[3] = 0,0005979 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{segm.}$$

4.10. Cálculo da vazão no início do próximo trecho

$$q [3] = 0,000732 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

4.11. Cálculo do volume superficial acumulado

$$V_{sa} [3] = 0,1668 \text{ m}^3$$

4.12. Cálculo do volume infiltrado acumulado

$$V_{ia} [3] = 0,1362 \text{ m}^3$$

4.13. Cálculo do volume total acumulado

$$V_{ta} [3] = 0,3031 \text{ m}^3$$

5. Solução para a quarta célula de espaço

5.1. Cálculo da área

$$A [4] = 0,006339 \text{ m}^2$$

5.2. Cálculo do raio hidráulico

$$R_h [4] = 0,023845 \text{ m}$$

5.3. Cálculo do novo coeficiente de rugosidade "n"

$$n [4] = 0,02341$$

5.4. Cálculo da velocidade na célula atual

$$V [4] = 0,115480 \text{ m. s}^{-1}$$

5.5. Cálculo do tempo instantâneo na célula atual

$$T [4] = 86,594733 \text{ s}$$

5.6. Cálculo do tempo de avanço acumulado

$$T_{avc} [4] = 314,470287 \text{ s} = 5,24 \text{ min.}$$

5.7. Cálculo do tempo de oportunidade de infiltração (células 1, 2, 3 e 4)

$$T_o [1] = 279,446 \text{ s}$$

$$T_o [2] = 206,421 \text{ s}$$

$$T_o [3] = 127,792 \text{ s}$$

$$T_o [4] = 43,297 \text{ s}$$

5.8. Cálculo da vazão infiltrada (células 1, 2, 3 e 4)

$$q_i [1] = 1,110. 10^{-4} \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

$$q_i [2] = 1,302. 10^{-4} \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

$$q_i [3] = 1,654. 10^{-4} \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

$$q_i [4] = 2,842. 10^{-4} \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

5.9. Cálculo da vazão infiltrada acumulada

$$q_{iac} [4] = 0,000692 \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$$

5.10. Cálculo da vazão no início do próximo trecho

$$q [4] = 0,000638 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

5.11. Cálculo do Volume superficial acumulado

$$V_{sa} [4] = 0,2007 \text{ m}^3$$

5.12. Cálculo do Volume infiltrado acumulado

$$V_{ia} [4] = 0,2176 \text{ m}^3$$

5.13. Cálculo do volume total acumulado

$$V_{ta} [4] = 0,4182 \text{ m}^3$$

6. Solução para a quinta célula de espaço**6.1. Cálculo da área**

$$A [5] = 0,005821 \text{ m}^2$$

6.2. Cálculo do raio hidráulico

$$R_h [5] = 0,022571 \text{ m}$$

6.3. Cálculo do novo coeficiente de rugosidade "n"

$$n [5] = 0,023771$$

6.4. Cálculo da velocidade na célula atual

$$V [5] = 0,109598 \text{ m. s}^{-1}$$

6.5. Cálculo do tempo instantâneo na célula atual

$$T [5] = 91,242624 \text{ s}$$

6.6. Cálculo do tempo de avanço acumulado

$$T_{avc} [5] = 405,7129 \text{ s} = 6,76 \text{ min.}$$

6.7. Cálculo do tempo de oportunidade de infiltração (células 1,2,3,4 e 5)

$$T_o [1] = 370,689 \text{ s}$$

$$T_o [2] = 297,664 \text{ s}$$

$$T_o [3] = 219,035 \text{ s}$$

$$T_o [4] = 134,540 \text{ s}$$

$$T_o [5] = 45,621 \text{ s}$$

6.8. Cálculo da vazão infiltrada (células 1, 2, 3, 4 e 5)

$$q_i [1] = 9,713 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_i [2] = 1,084 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_i [3] = 1,264 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_i [4] = 1,612 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_i [5] = 2,769 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

6.9. Cálculo da vazão infiltrada acumulada

$$q_{iac} [5] = 0,000770 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

6.10. Cálculo da vazão no início do próximo trecho

$$q [5] = 0,000560 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

6.11. Cálculo dos volumes acumulados superficial, infiltrado e total

$$V_{sa} [5] = 0,2272 \text{ m}^3$$

$$V_{ia} [5] = 0,3124 \text{ m}^3$$

$$V_{ta} [5] = 0,5396 \text{ m}^3$$

Na tabela 1. se encontra o resumo dos cálculos feitos pelo modelo SAVIS, utilizando dados de sulco de precisão obtidos por Ramsey. É bom notar que para estes procedimentos foi utilizado um segmento de espaço grande ($\Delta s = 10 \text{ m}$), logicamente para facilidades de processamento.

Tabela 1. Resumo dos cálculos feitos pelo modelo SAVIS- dados de entrada conforme Ramsey (1976).

DISCRIMINAÇÃO	CÉLULA DE ESPAÇO				
	1	2	3	4	5
1. Área $A[i]$, m ²	0,00932	0,00771	0,00695	0,00634	0,00582
2. Raio hidráulico $Rh[i]$, m	0,03057	0,02705	0,02530	0,02385	0,02257
3. Altura da rugosidade s , m	0,00245	0,00245	0,00245	0,00245	0,00245
4. Coeficiente de rugosidade "n"	0,02200	0,02265	0,02304	0,02341	0,02377
5. Velocidade $V[i]$, m/s	0,14276	0,13158	0,12221	0,11548	0,10960
6. Tempo instantâneo $T[i]$, s	70,049	76,002	81,825	86,595	91,243
7. Tempo avanço acum. T_{avc} , s **	70,049	146,050	227,876	314,470	405,713
8. Tempo de oportunidade $To[i]$, s					
To[1]	35,024	111,026	192,851	279,446	370,698
To[2]	-	38,001	119,826	206,421	297,664
To[3]	-	-	40,913	127,792	219,035
To[4]	-	-	-	43,297	134,54
To[5]	-	-	-	-	45,621
9. Vazão infiltrada $qi[i]$, m ³ /s/seg.					
qi[1]	$3,160 \cdot 10^{-4}$	$1,775 \cdot 10^{-4}$	$1,347 \cdot 10^{-4}$	$1,119 \cdot 10^{-4}$	$9,713 \cdot 10^{-5}$
qi[2]	-	$3,034 \cdot 10^{-4}$	$1,708 \cdot 10^{-4}$	$1,302 \cdot 10^{-4}$	$1,084 \cdot 10^{-4}$
qi[3]	-	-	$2,924 \cdot 10^{-4}$	$1,654 \cdot 10^{-4}$	$1,264 \cdot 10^{-4}$
qi[4]	-	-	-	$2,842 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$
qi[5]	-	-	-	-	$2,769 \cdot 10^{-4}$
10. Vazão Inf. acumulada q_{iac} , m ³ /s	$3,160 \cdot 10^{-4}$	$4,809 \cdot 10^{-4}$	$5,979 \cdot 10^{-4}$	$6,917 \cdot 10^{-4}$	$7,700 \cdot 10^{-4}$
11. Vazão início p. trecho $q[i]$, m ³ /s	0,00101	0,00085	0,00073	0,00064	0,00056
12. Volume Superficial ac. V_{sa} , m ³	0,0710	0,1240	0,1668	0,2007	0,2272
13. Volume Infiltrado ac. V_{ia} , m ³	0,0221	0,0702	0,1362	0,2176	0,3124
14. Volume Total V_{ta} , m ³	0,0932	0,1942	0,3031	0,4182	0,5396

* Segmento de espaço $\Delta s = 10$ metros

** Resultados do modelo.

APÊNDICE 3

LISTAGEM COMPLETA DO MODELO- SAVIS

LINGUAGEM PASCAL

```

program SAVIS;

uses crt,printer,
var
    qo,So,c1,c2,k,fo,a1, Tac, qiac,toi,ds,    :real;
    epson,no,via,vs                          :real;
    sxy, sx, sy,sx2,sy2,r,d2,d,d1,b1,b2,pm   :real;
    dif_y, dif_b, gama1, gama2              :real;
    Y, x, lnx, lny, pmi                     :array[1..50]of real;
    m, l, ll, oo                            :integer;
    i,j                                      :integer;
    a, v, t, qiac2, q2                      :array[1..1000]of real;
    Tav,q,Rh,n                             :array[0..1000]of real;
    S                                        :integer;

function expon(u:real; e:real): real;
begin
    if u=0 then
        expon:=0
    else
        expon:=exp(e*ln(u));
    end;
procedure entradas1;
begin
    writeln('Entre com os seguintes dados:');
    writeln('Entre com o número de pares de valores = ');
    read (m);
    writeln('Entre com os pares de valores ');
    for oo:= 1 to m do
        begin
            write(' B(',oo, ') = ');
            read(y[oo]);
            write(' Y(',oo, ') = ');
            read(x[oo]);
        end;
end;
end;
procedure entradas2;
begin
    writeln('Vazão de entrada (m3/s) = ');
    read(qo);

```

```

    writeln('Coeficiente inicial de rugosidade de Manning = ');
    read(no);
    writeln('Declividade do sulco (m/m) = ');
    read(So);
    writeln('K da equação de Kostiakov modificada = ');
    read(k);
    writeln('a1 da equação de Kostiakov modificada = ');
    read(a1);
    writeln('fo da equação de Kostiakov modificada = ');
    read(f0);
    writeln('Célula de espaço = ');
    read(ds);
    writeln('Comprimento do sulco = ');
    read(s);
end;
procedure regres;
begin
    sxy:=0; sx:=0; sy:=0; sx2:= 0; sy2:=0;
    for l:= 1 to m do
        begin
            sxy:=sxy+lnx[l]*lny[l];
            sx:=sx+lnx[l];
            sy:=sy+lny[l];
            sx2:=sx2+lnx[l]*lnx[l];
            sy2:=sy2+lny[l]*lny[l];
        end;
        d2:=(sxy-(sx*sy)/m)/(sx2-(sx*sx/m));
        d:=(sy-d2*sx)/m;
        r:=(sxy-(sx*sy/m))/(sqrt((sx2-(sx*sx/m))*(sy2-(sy*sy/m))));
    end;
procedure área;
begin
    a[i]:= c1*expon((q[i]*n[i-1]/sqrt(So)),c2);
end;
procedure raiohidraulico;
begin
    Rh[i]:= expon((n[i-1]*q[i]/(a[i]*sqrt(So))),1.5);
end;
procedure rugosidade;
begin;
    epson:=exp(ln(Rh[i])-expon(Rh[i],1/6)/(23.19/ln(10)*n[i]));
end;
procedure n_manning;
begin
    n[i]:=expon(Rh[i],1/6)/(23.19/ln(10)*ln(Rh[i]/epson));
end;

```

```

procedure velocidade;
begin
    v[i]:=q[i]/a[i];
end;
procedure tempo;
begin
    t[i]:=ds/v[i];
end;
procedure tempoacumulado;
begin
    tac:=tac + t[i];
    tav[i]:=tac;
end;
procedure vazãoinfiltrada;
    procedure tempo_oportunidade;
    begin
        toi:=tac - tav[j-1]-t[j]/2;
    end;
    procedure kostiakov;
    begin
        q[j]:=(k*expon(toi,a1)+fo)*ds;
    end;
begin
    qiac:=0;
    tav[0]:=0;
    for j:=1 to i do
        begin
            tempo_oportunidade;
            kostiakov;
            qiac:=qiac+q[j]; {Vazão acumulada infiltrada}
        end;
    end;
procedure resultados;
begin
    writeln('Comprimento do sulco =',S,' metros');
    writeln('Vazão =',qo*1000:3:2,' l/s,' Coeficiente de Manning n =',n[0]:5:5);
    writeln('Declividade do sulco =',So*100:4:4,'%');
    writeln('Parâmetro de forma C1 =',c1:5:5,' C2 =',c2:5:5);
    writeln('C. de Kostiakov K =',k:10:10,' a1 =',a1:6:6,' fo =',fo:10:10);
    writeln('célula de espaço =',ds:3:3);
    writeln(' ');
    writeln('DISTÂNCIA','TEMPO',' ','V.SUPERFICIAL',' ','V.INFILTRADO',' V.TOTAL');
    writeln('(metros) (minutos) (m3) (m3) (m3)');
    writeln(' ');
    for j:=1 to i-1 do
        begin
            via:=qiac2[j]*tav[j]; {Volume acumulado infiltrado}
            vs:=q2[j]*tav[j]; {Volume superficial acumulado}
        end;
    end;

```

```

if (abs(frac(j*ds/5)) < 0.0001) or (abs(frac(j*ds/5)) > 1-0.0001) then
    begin
        writeln(j*ds:3:0,'      ',tav[j]/60:5:2,'      ',vs:5:4,'      ',via:5:4,'      ',qo*tav[j]:5:4);
        end;
    end;
end;

procedure zerar;
begin
    for i:=1 to 1000 do
        begin
            a[i]:=0;
            v[i]:=0;
            t[i]:=0;
            via:=0;
            q[i]:=0;
            tav[i]:=0;
            toi:=0;
            tac:=0;
            n[i]:=0;
            rh[i]:=0;
        end;
end;
begin
    entradas1;
    for l:=1 to m do
        begin
            lnx[l]:=ln(x[l]);
            lny[l]:=ln(y[l]);
        end;
    regres;
    d1:=exp(d);
    b1:=d1/(d2+1);
    b2:=d2+1;
    for l:= 1 to m do
        begin
            pm:=0;
            for ll:= 1 to l do
                begin
                    dif_y:=x[ll]-x[ll-1];
                    dif_b:=y[ll]-y[ll-1];
                    pm:=pm+2*sqrt(sqrt(dif_y)+sqrt(0.5*(dif_b)));
                end;
            pmi[l]:=pm;
        end;
    for l:= 1 to m do

```



```

begin
  lny[l]:=ln(pmi[l]);
end;
regres;
gama1:=exp(d);
gama2:=d2;
c2:=3*b2/(5*b2-2*gama2);
c1:=b1*exp(c2*ln(exp((0.67*ln(gama1)))/exp(1.67*ln(b1))));

zerar;
entradas2;
clrscr ;
q[1]:=qo;
n[1]:=no;
n[0]:=no;
i:=1;
area;
raiohidraulico;
rugosidade;
i:=1;
while q[i] > 0 do
begin
  área;
  velocidade;
  tempo;
  tempoacumulado;
  vazãoinfiltrada;
  i:=i+1;
  q[i]:=qo-qiac; { Vazão no início do próximo trecho}
  q2[i-1]:=q[i];
  qiac2[i-1]:=qiac; { Vazão acumulada infiltrada}
  área;
  raiohidraulico;
  n_manning;
  if (i)*ds > s then
  begin
    q[i]:=0;
  end;
end;
resultados;
end.

```